

Oskari Peiponen

# 3D-tulostaminen ja metallilla pinnoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Bio- ja kemiantekniikka

Insinöörityö

10.2.2019

Tekijä Otsikko	Oskari Peiponen 3D- tulostaminen ja metallilla pinnoitus
Sivumäärä Aika	43 sivua + 5 liitettä 10.2.2019
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Bio- ja kemiantekniikka
Ammatillinen pääaine	Materiaali- ja pintakäsittelytekniikka
Ohjaajat	Tutkintovastaava Arto Yli-Pentti Toimitusjohtaja Jarmo Järvinen
<p>Insinööriä tehtiin Dreamsoft Oy:lle, joka on koneiden ja laitteiden agentuuritoimintaan erikoistunut yritys. Työn tavoitteena on tutkia 3D-tulostettujen kappaleiden sähkökemiallista pinnoitusta. Tarkoituksena on tutkia mitä muoveja voidaan 3D-tulostaa ja pinnoittaa, sekä voitaisiinko ripustin tulostaa suoraan kappaleisiin. Lisäksi tutkittiin linjaston täysautomaattisointia, piirilevyjen pinnoitusta suoraan kappaleisiin, sekä testattiin tulostettuja ja pinnoitettuja koekappaleita.</p> <p>Työn teoreettiseen osaan on sisällytetty 3D-tulostusta ja eri 3D-tulostusmenetelmiä käsittelevä osuus, sekä sähkökemiallista pinnoitusta ja muovin pinnoitusta käsittelevä osuus. Kokeellisessa osuudessa testattiin pinnoitettuja kappaleita vääntökokeella, tutkittiin pinnoitettujen kappaleiden pinnanlaatua visuaalisesti ja kokeiltiin asetonikäsittelyä ja sen toimivuutta jälkikäsittelymenetelmänä.</p> <p>Työssä saatiin selville, että pinnoitettavia ja 3D-tulostettavia muoveja ovat ABS, ABC/PC-seoste ja PA, joita pystytään tulostamaan FDM- ja SLS-menetelmillä. Pinnoitteen kiinnipysyvyys oli pinnoitetuissa kappaleissa riittävä vääntökokeen perusteella. Visuaalisissa tarkasteluissa huomattiin, että 3D-tulostuksen jäljet näkyvät selvästi pinnoitetuissa kappaleissa, minkä vuoksi jälkikäsittelylle on suuri tarve. Asetonikäsittelyllä ei saatu toteutettua tarpeeksi hyvälaatuisia pintaa tulostetuille kappaleille ja kappaleissa esiintyi käsittelyn jälkeen epämuodostumia.</p> <p>Jatkotoimiksi esitettiin eri 3D-tulostusmateriaalien vertailua ja tutkia mikä toimisi parhaiten.</p>	
Avainsanat	3D-tulostus, muovin pinnoitus, Sähkökemiallinen pinnoitus,

Author Title	Oskari Peiponen 3D printing and metallic surface treatment.
Number of Pages Date	43 pages + 5 appendices 10 February 2019
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Bio- and Chemical Engineering
Professional Major	Materials and Surface Engineering
Instructors	Arto Yli-Pentti, Project Manager Jarmo Järvinen, Managing Director
<p>The subject of the Bachelor's thesis was 3D printing and metallic surface treatment. The purpose of this project was to study and research what kind of plastics could be 3D printed and which of these plastics could be plated with metal, and if the hanger could be printed on the printed object. The possibility of full automatization of the overall process, printing of circuits on the 3D printed part were examined and plated 3D printed parts were tested. The commissioner of the project was Dreamsoft Oy, which is an enterprise specializing in agency of machinery and equipment.</p> <p>The theoretical part of this project includes 3D printing and different methods of 3D printing, as well as electroplating and the plating of plastics. The experimental part of the project included visual examinations and bend testing of 3D printed parts that have been plated. Polishing of the 3D printed parts using acetone was also tested.</p> <p>In conclusion, it was found that Polyamide, ABS and ABS/PC were all plastics that can be plated with metals and 3D printed through SLS- and FDM-methods. The adhesion of plated metal on the plastic part was sufficient based on the bend test. Visual examination showed that the patterns from 3D printing were still fully visible on the plated parts. Acetone polishing method could not produce sufficient smoothness and created malformations on the parts.</p> <p>For future actions it was presented that different 3D-print materials could be compared to see, which of them could work best in the plating process.</p>	
Keywords	3D-printing, plating on plastic, Electroplating

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	3D-tulostus	1
2.1	Materiaalia lisäävä valmistus yleisesti	1
2.2	3D-tulostuksen prosessi	2
2.2.1	3D-mallinnus	2
2.2.2	Laitteella tulostaminen	3
2.2.3	Kappaleen jälkikäsittely	3
2.3	Eri 3D-tulostus menetelmät	3
2.3.1	FDM-menetelmä	4
2.3.2	SL-menetelmä	6
2.3.3	SLS-menetelmä	8
2.4	3D-tulostuksen yleiset edut ja haitat	11
3	Muovin elektrolyttinen pinnoitus	12
3.1	Sähkökemiallinen pinnoitus	12
3.2	Muovin pinnoituksesta yleisesti	13
3.3	ABS muovin pinnoitusprosessi	14
3.3.1	Puhdistus	14
3.3.2	Etsaus	15
3.3.3	Neutralisointi	15
3.3.4	Katalysointi	15
3.3.5	Aktivointi	16
3.3.6	Autokatalyyttinen pinnoitus	16
3.3.7	Elektrolyttiset pinnoitteet	16
3.3.8	Kromaus	16
3.4	Polyamidin pinnoitusprosessi	16
4	Teoreettisen osuuden pohdintaa	18
4.1	Ripustimen tulostus kappaleeseen	18
4.2	3D-tulostettavat ja metallilla pinnoitettavat muovit	19

4.3	3D-tulostuksen edut perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna	19
4.4	Piirilevyjen tulostus suoraan kappaleisiin	20
4.5	3D-tulostus osana täysautomaattista pinnoituslinjastoa	21
5	Kokeellisen osuuden suunnitelma	23
5.1	3D-tulostettavat mallit	23
5.2	Tulostetun kappaleen jälkikäsittelyt	23
5.3	Kappaleiden pinnoitus	24
5.4	Testausmenetelmät	24
5.4.1	Silmin tehtävät tarkastelut	25
5.4.2	Pinnoitepaksuus	25
5.4.3	Kiinnipysyvyys testi	25
6	Kokeellisen osuuden toteutus ja tulokset	25
6.1	Ultimaker 2 Extended	25
6.2	3D- mallinnus ja tulostus	27
6.3	3D-kappaleen pinnoitusprosessi	31
6.4	Pinnoitettujen kappaleiden pinnoitteen tarkastelu	31
6.5	Pinnoitettujen kappaleiden testaus	32
6.6	Asetonikäsittelyn testaus	33
7	Kokeellisen osuuden tulosten analysointi	34
7.1	Kokeellisen osuuden pohdintaa	34
7.2	Asetonijälkikäsittely	34
7.3	Vääntökoe testi	35
7.4	Kappaleiden pinnoituksen visuaalinen tarkastelu	35
8	Yhteenveto	37
	Lähteet	40
	Liitteet	
	Liite 1. 3D kappaleiden mittakuvat.	
	Liite 2. Pinnoitetut 3D tulostetut kappaleet.	
	Liite 3. Vääntötestikuvat.	
	Liite 4. Mikroskooppikuvat.	
	Liite 5. Asetonikäsittelyt kappaleet.	

## Lyhenteet

3D	Kolmiulotteinen.
ABS	Akryyliniiriili-butadieeni-styreeni on kestopuovi, joka on ominaisuuksiltaan hyvin jäykkä ja pinnanlaadultaan usein kiiltävä.
CAD	Computer-aided design, eli tietokoneavusteinen suunnittelu.
DIY	Do it yourself, eli tee se itse.
DMLS	
FDM	Fused deposition modeling. Ekstruusioon perustuva 3D-tulostusmenetelmä.
FFF	Fused filament fabrication. Vaihtoehtoinen nimitys FDM-menetelmälle.
HIPS	Iskunkestävä polystyreeni on kestopuovi, joka on ominaisuuksiltaan polykarbonaatin lailla helposti työstettävä ja kestää hyvin iskuja. HIPS liukenee limoneeniin, minkä ansiosta voidaan käyttää tukiaineena 3D-tulostuksessa.
PBF	Powder bed fusion, eli jauhepetisulatus. 3D-tulostus menetelmä, jossa raaka-aineena käytetään jauhetta.
PC	Polykarbonaatti on helposti työstettävä iskuja kestävä kestopuovi.
PLA	Polyaktidi on kestopuovi, joka on valmistettu uusiutuvista raaka-aineista, jotka pääasiassa ovat kasvien sokereita.
PVA	Polyvinyylialkoholi on vesiliukoinen kestopuovi. Käytetään muun muassa liimana, kalvonpäällistysaineena, sekä 3D-tulostuksessa veteen liukenevana tukimateriaalina.
SL	Stereolithography, eli stereolitografia. Fotopolymeerin kovetukseen perustuva 3D-tulostusmenetelmä. Vaihtoehtoisena lyhennyksenä SLA.

SLS	Selective layer sintering, eli valikoiva lasersintraus. Jauhepetisulatukseen perustuva menetelmä, jossa jauhetta sulatetaan kerroksittain laserilla.
STL	Tiedostomuoto, joka mallintaa kappaleen pinnan kolmioina.

## 1 Johdanto

Projektin aiheena oli 3D-tulostettujen kappaleiden pinnoittaminen metallisella pinnoitteella. 3D-tulostuksessa keskityttiin ainoastaan muovin 3D-tulostukseen. Projektissa tutkittiin 3D-tulostimen käyttöä pinnoituslinjastoissa sekä sitä, olisiko linjaa mahdollista täysautomasoida ja tarkasteltiin 3D-tulostuksen taloudellisuutta sekä käytännöllisyyttä. Lisäksi testattiin ja tutkittiin, voisiko 3D-tulostetut kappaleet tulostaa suoraan ripustimeen ja kuinka se saataisiin sähköä johtavaksi. Teoreettisesti tarkasteltiin myös sitä, voitaisiinko 3D-tulostettuun kappaleeseen pinnoittaa piirilevy metallisella pinnoituksella, sekä mitä muoveja voidaan 3D tulostaa ja pinnoittaa. Projekti toteutettiin Dreamsoft Oy:lle, joka on erikoistunut koneiden ja laitteiden agentuuritoimintaan.

Projektissa 3D-tulostettiin ABS-kappaleita, jotka Conventya pinnoitti. Pinnoitetut kappaleet testattiin Metropolian laboratoriossa. Testeissä käytössä oli Ultimakerin valkoinen ABS-filamentti, joka oli tulostettu Ultimaker 2 Extended 3D-tulostimella. Kappaleista tarkasteltiin pinnoitteen kiinnipysyvyyttä, makro- ja mikrotasoisuutta ja ulkonäköä. Lisäksi kokeiltiin tulostettujen ABS-kappaleiden pinnan tasoittamista asetoni jälkikäsittely menetelmällä.

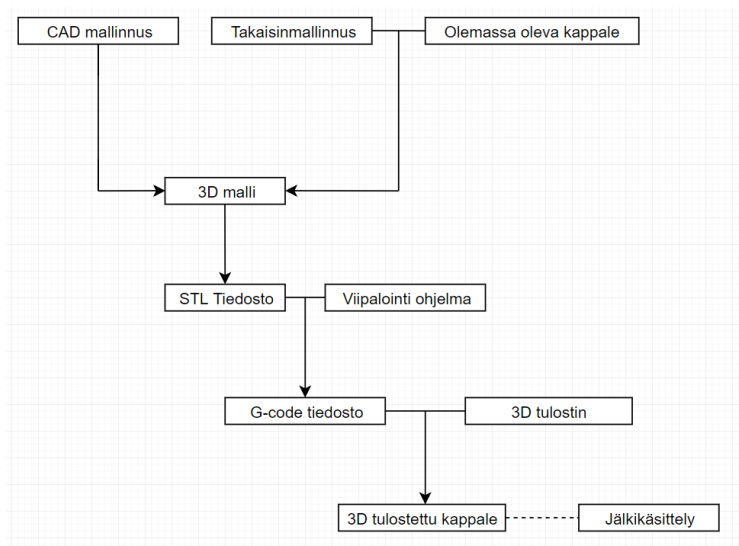
## 2 3D-tulostus

### 2.1 Materiaalia lisäävä valmistus yleisesti

Materiaalia lisäävä valmistus on tuotantomenetelmä, jossa tuote valmistetaan kerroksittain 3D-mallin pohjalta. Alun perin tuotantomenetelmä oli teollisuuden käytössä prototyyppien valmistuksessa sen nopeuden ja vaivattomuuden ansiosta, jolloin sitä kutsuttiinkin nimellä ”Rapid Prototyping”, eli nopea prototypointi. Teknologian edetessä nopea prototypointi kuitenkin menetti nimellisen tarkoituksensa, kun tuotantomenetelmää alettiin käyttää muihinkin tarkoituksiin. Tällöin alettiin käyttää nimeä ”Additive manufacturing”, eli materiaalia lisäävä valmistus. Lopulta 3D-tulostus tuli laajempaan käyttöön, kun kuluttajille suunnitellut laitteet tulivat markkinoille. [1, s. 1–4.]

Tuotantomenetelmä oli alun perin suunniteltu polymeerimateriaalien valmistukseen, mutta nykyään sillä pystytään myös valmistamaan komposiittisia, metallisia ja keraamisia kappaleita [1, s. 10].

## 2.2 3D-tulostuksen prosessi



Kuva 1. Yleinen valmistusprosessi 3D-tulostetulle kappaleelle.

Kuvassa 1 on nähtävillä yksinkertaistettu prosessikaavio 3D-tulostetuille kappaleille. Suurin osa menetelmistä ja laitteista käyttävät samoja prosessivaiheita, mutta käytettävät raaka-aineet, tulostuksen tarkkuus ja käytettävät tietokoneohjelmat voivat kuitenkin erota huomattavasti eri laitteiden ja menetelmien välillä. [1, s. 4.]

### 2.2.1 3D-mallinnus

Kaikki 3D-tulostettavat kappaleet valmistetaan 3D-mallista, joka voidaan mallintaa eri tietokoneavusteisilla suunnitteluohjelmilla, tai vaihtoehtoisesti käyttää takaisinmallinnusta laserilla tai muulla menetelmällä, jossa tulostettava kappale voidaan mallintaa suoraan 3D-malliksi olemassa olevasta kappaleesta. Tämän jälkeen 3D-mallin tiedostomuoto muutetaan STL-tiedostomuotoon, mikä pystytään toteuttamaan lähes kaikilla tietokoneavusteisilla suunnitteluohjelmilla. STL-tiedostomuoto kuvaa ainoastaan kappaleen pinnan geometriaa kolmioina. [1, s. 4, 44–45.]

STL-tiedostomuotoa käytettiin 3D Systemsin ensimmäisessä kaupallisessa stereolitografiaan perustuvassa 3D-tulostimessa, minkä jälkeen se on jäänyt teollisuusstandardiksi [1, s.44; 2, s. 25].

### 2.2.2 Laitteella tulostaminen

Ennen varsinaista tulostusta, joudutaan STL-tiedosto muuttamaan muotoon, joka kertoo tulostimelle, kuinka kappale on tulostettava. Tämä toteutetaan viipalointiohjelmalla, joka muodostaa g-koodin määritettyjen parametrien, kuten esimerkiksi täyttöasteen, seinämien paksuuden, suuttimen koon ja kerroskorkeuden perusteella. Pääasiassa parametrit ja niiden säädettävyys riippuvat käytettävästä viipalointiohjelmasta ja käytetystä 3D-tulostimesta. [1, s.44–45; 3; 2, s.197, 314.]

Vielä ennen tulostusta joudutaan laitteella säätämään tulostusasetukset materiaalin valmistajan suositusten mukaisesti. Vaikka tulostusvaihe itsessään on täysin automatisoitu, niin tästä huolimatta kannattaa valvoa tulostusta ajoittain tulostuksen mahdollisen epäonnistumisen tai sen aikana syntyvän virheen vuoksi. [1, s. 4–5.]

### 2.2.3 Kappaleen jälkikäsittely

Kappaleen valmistumisen ja jäähtymisen jälkeen voidaan se ottaa talteen. Riippuen tulostusmenetelmästä ja materiaalista, tulostetut kappaleet voivat vaatia jälkikäsittelyä karhean pinnanlaadun, tukirakenteiden tai muiden jäämien vuoksi [1, s. 5–6].

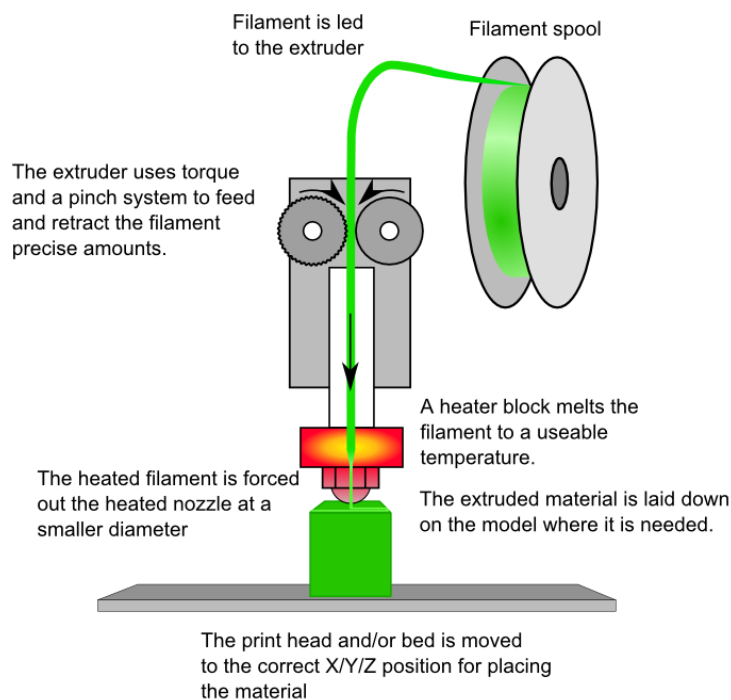
Kappaleiden pinnanlaatua voidaan parantaa esimerkiksi hiomalla hiekkapaperilla tasaisemmaksi, maalaamalla kappale, tai käyttämällä liuottimia, jotka pehmentävät muovin pintaa sulauttaen pinnan epämuotoja [4].

## 2.3 Eri 3D-tulostus menetelmät

Koska opinnäytetyössä keskitytään muovien 3D-tulostamiseen, niin tämän vuoksi ainoastaan käsitellään muovin yleisimpiä 3D-tulostus menetelmiä. Muovin 3D-tulostuksen yleisimmissä menetelmissä joko pursotetaan sulatettua tai pehmennettyä muovia, kove-tetaan nestemäistä fotopolymeeriä, ruiskutetaan sideainetta jauheen päälle tai sulate-taan tai sintrataan jauhetta. [5; 2, s.24–25.]

### 2.3.1 FDM-menetelmä

Fused deposition modeling-menetelmä on hyvin suosittu 3D-tulostus menetelmä sen yksinkertaisen ja edullisen laitteiston vuoksi, minkä vuoksi se on suosittu etenkin harrastelijoiden ja kuluttajien keskuudessa [2, s.33-34]. Menetelmässä laitteisto käyttää raaka-aineena muovilankaa, eli filamenttia, jota syötetään jatkuvasti laitteiston lämmittimeen. Lämmityskammiossa muovilanka sulaa ja jatkaa matkaa tulostuspäähän, josta se pursotetaan ulos. Laitteiston motoriikka liikuttaa tulostuspäätä ja lämmityskammiota leveys- ja pituustasolla samalla, kun muovia pursotetaan tulostuspäästä. Kerroksen valmistuttua rakennusalusta liikkuu korkeussuunnassa kappaleen kerroksen verran alaspäin, minkä jälkeen laitteisto aloittaa uuden kerroksen rakentamisen. [1, s.143–156; 2, s.33–34.]

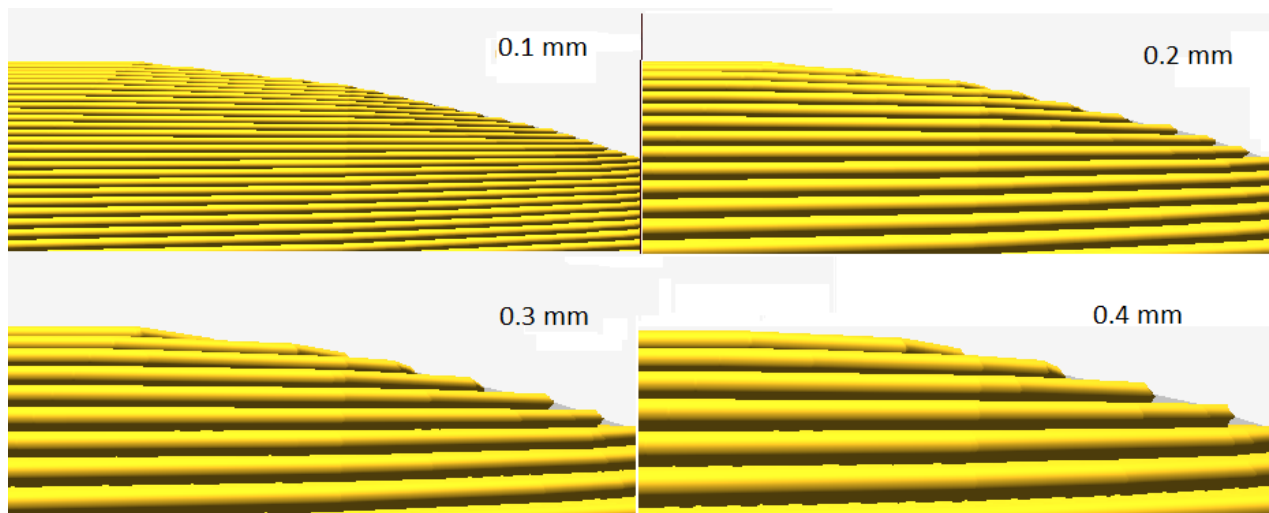


Kuva 2. FDM-menetelmä. [6]

FDM-menetelmän yleisimpänä etuna on laitteiden helppokäyttöisyys ja yksinkertaisuus, raaka-aineiden ja tulostimien halpa hinta. Materiaalien hinta on hyvin edullinen FDM-menetelmässä, koska filamentteja voidaan valmistaa jatkuvatoimisesti sekä niiden raaka-aineiden hinta on usein suhteellisen halpa. Lisäksi markkinoilla on olemassa useita eri filamenttien valmistajia, joiden filamentit sopivat useimpiin 3D-tulostimiin. Markkinoilta on saatavilla tee se itse- kittejä ja hieman kalliimpia valmiiksi koottuja tulos-

timia, jotka ollaan suunniteltu harrastelijoille ja kuluttajille, sekä teollisuudelle valmistettuja laitteita, joilla on erittäin suuri tulostinkammio, suhteellisen hyvä tarkkuus, sekä kaksi tulostuspäätä, mutta voivat maksaa useamman tuhannen euron. [1, s.157–158, 167; 2, s.33.]

Menetelmän rajoituksena on kuitenkin tarkkuuden ja nopeuden luoma suhde, jossa hyvin tarkkojen kappaleiden valmistus kestää hyvin pitkän ajan ja hyvin nopean kappaleen valmistuksessa tarkkuus on huono [1, s.160]. Suuttimen pyöreä muoto aiheuttaa myös ongelmia kulmissa, jotka eivät sen muodon vuoksi ole täysin teräväkulmaisia. Tulostettavien kerrosten epätasaisen rakenteen vuoksi kerrosten väliin voi jäädä huokosia [1, s.154–155,161]. FDM menetelmän yleisin ongelma on sen alhainen resoluutio, eli tarkkuus. Koska menetelmässä kappaleet muodostetaan kerroksittain, niin tällöin monimutkaisissa ja etenkin pyöreissä kappaleissa kerros korkeudella ja suuttimen koolla on suuri merkitys kerrosten ja pinnan laatuun, mikä on havainnollistettu kuvassa 3 [7].



Kuva 3. Kerroskorkeuden vaikutus tulostettavassa kappaleessa. Havainnollistettu Cura- viipalointiohjelmassa.

Menetelmän materiaaleina käytetään pääasiassa kestopuoveja, joista suosituimmat materiaalit ovat PLA ja ABS, mutta markkinoilla on olemassa hyvin laaja valikoima muitakin materiaaleja.

Polyaktidi on ympäristöystävällinen ja biohajoava polymeeri, joka on valmistettu kasvien sokereista. PLA:n hyvinä puolina on sen tulostamisen helppous FDM-menetelmällä, ha-

juhaittojen vähäisyys tulostuksen aikana, sekä filamenttikerien halpa hinta. PLA on etenkin harrastelijoiden ja kuluttajien suosima. PLA ei kuitenkaan kestä kovin hyvin korkeita lämpötiloja, sillä sen lasisiirtymä on 44–63 °C:n alueella ja sen kemiallinen kestävyys on hyvin huono. Lisäksi PLA:sta on olemassa täyteaineellisia filamentteja, joilla voidaan saavuttaa tulostetulle kappaleelle esimerkiksi metallinen tai puinen ulkonäkö. [2, s.65–67;8.]

Akryyliniiriili-butadieeni-styreeni on kestopuovi, joka on valmistettu kolmesta eri monomeerista. ABS:n hyvinä puolina on sen korkea lasisiirtymälämpötila, joka on 105 °C:n alueella. Lisäksi ABS on mekaanisesti kestävä ja jäykkä, sekä suhteellisen halpa materiaali [9; 1, s.159–160]. Yleisesti ABS on ominaisuuksiltaan PLA:ta parempi, mutta ongelmana on ABS:n keuhko tulostettavuus. ABS vaatii tulostettaessa 220 – 260 °C:n lämpötilan riippuen filamentin valmistajasta, sekä usein lämmitetyn alustan, joka auttaa vähentämään kerrosten välistä vääntymistä ja irtoamista kappaleen jäähtyessä. ABS:llä voi myös esiintyä hajuhaittoja tulostuksen aikana. [2, s.66–67; 9.]

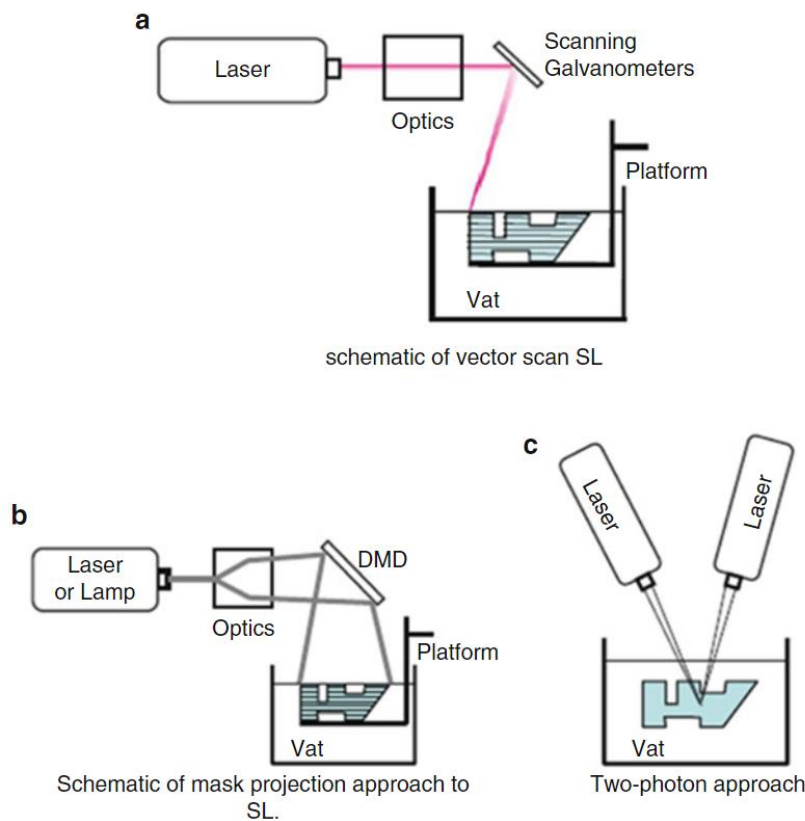
Näiden materiaalien lisäksi on käytössä polykarbonaatti, nylon, polyvinyylialkoholi, sekä iskunkestävä polystyreeni [2, s.67–69].

### 2.3.2 SL-menetelmä

Stereolitografia menetelmä oli ensimmäinen 3D-tulostusmenetelmä, joka keksittiin 1980-luvulla Charles Hullin tehdessä fotopolymeereille kokeita, joissa hän onnistui valmistamaan kolmiulotteisen kappaleen säätämällä nestemäistä fotopolymeeriä laserilla kerros kerrokselta muodostaen kolmiulotteisen kappaleen [1, s.61]. Näiden kokeiden pohjalta syntyi SL, eli stereolitografia.

Menetelmässä voidaan ainoastaan käyttää fotopolymeerejä, jotka ovat nestemäisiä hartseja, jotka kovettuvat tietyn aallonpituisten valon kohdistuessa niihin. Useimmat fotopolymeerit kovettuvat UV-valon vaikutuksesta, mutta on myös olemassa näkyvästä valosta kovettuvia. Prosessissa laserin tai muun valonlähteen avulla sädetetään altaassa olevaa fotopolymeerihartsia, joka kovettuu kemiallisesti valon vaikutuksesta kerroksittain alustalle, joka liikkuu kerrospaksuuden verran alas kerroksen valmistuttua. Hartsia kovetetaan kovetetun hartsin päälle, kunnes kappale on saatu valmiiksi. Tämän jälkeen kappaleelle tehdään vielä jälkikäsittely UV-kaapissa, jossa kappaleen kestävyyttä parannetaan ja varmistetaan kappaleen kokonaislaatuinen kovettuminen. [1, s.61; 10.]

Menetelmästä on yleisimmän yhtä sädettä käyttävän lisäksi myös olemassa maskiprojektio, jossa yhden pisteen valottamisen sijasta valotetaan koko kerros maskin avulla muodostaen kokonaisen kerroksen yhdellä valotuskerralla, sekä kaksoisfotonisäde, jossa kappale rakennetaan pisteittäin kahden fotonisäteen avulla. [1, s. 61–62.]



Kuva 4. Eri SL menetelmät: a) yksi säde. b) maskiprojektio. c) kaksoisfotonisäde. [1, s.62.]

SL-menetelmän hyvänä puolena on erinomainen tarkkuus, joka on etenkin kaksoisfotonimenetelmän puolella poikkeuksellisen erinomainen, ja sillä pystytään valmistamaan kappaleita mikrometrien tarkkuudella, mutta se ei kuitenkaan sovellu teolliseen valmistukseen sen hitauden vuoksi. Maski projektiolla voidaan valmistaa kokonaisia kerroksia, mikä nopeuttaa kappaleen valmistusta huomattavasti. [1, s.96–98; 2, s.25–26.]

Ongelmana kuitenkin menetelmällä on käytettävien valmistusmateriaalien rajallisuus ja niiden korkea hinta, mikä johtuu usein siitä, että ainoastaan laitteen valmistajan omat hartsimateriaalit sopivat käytettäväksi [11]. Vaikka markkinoilla on saatavilla muutamien satojen eurojen SL-tulostimia, niin tästä huolimatta suuri osa tulostimista maksaa yhä useita tuhansia euroja, mikä vähentää tulostimen suosiota kuluttajien ja harrastelijoiden keskuudessa [12].

SL-menetelmän materiaaleina voidaan käyttää ainoastaan fotopolymeerejä, mikä rajoittaa hyvin paljon käytettäviä materiaaleja [2, s.26]. Käytettävät hartsit koostuvat lähinnä nestemäisistä akrylaatti- ja epoksimonomeereista, fotoinitiaattoreista, reaktiivisista liuottimista, joustavuutta parantavista aineista ja stabilisaattoreista [1, s.65].

Akrylaattimonomeereista valmistetut hartsit ovat hyvin reaktiivisia, minkä vuoksi akrylaatti kappaleiden valmistus on hyvin nopeaa. Ongelmana kuitenkin on akrylaatin heikko tarkkuus, mikä johtuu akrylaatin 5-20 %:n kutistumisesta ja käpertymisestä kovettuessa. [1, s.64.]

Epoksipohjaisesta hartsista valmistetut kappaleet ovat tarkkuudeltaan, kovuudeltaan ja vahvuudeltaan akrylaatteja parempia, eivätkä ne kutistu kuin 1-2 %, minkä vuoksi käpertyminen on hyvin vähäistä. Suurimpana ongelmana kuitenkin on hidas valmistusnopeus epoksin hitaamman reaktiivisuuden vuoksi, sekä valmistettujen kappaleiden hauraus. [1, s.64–65]

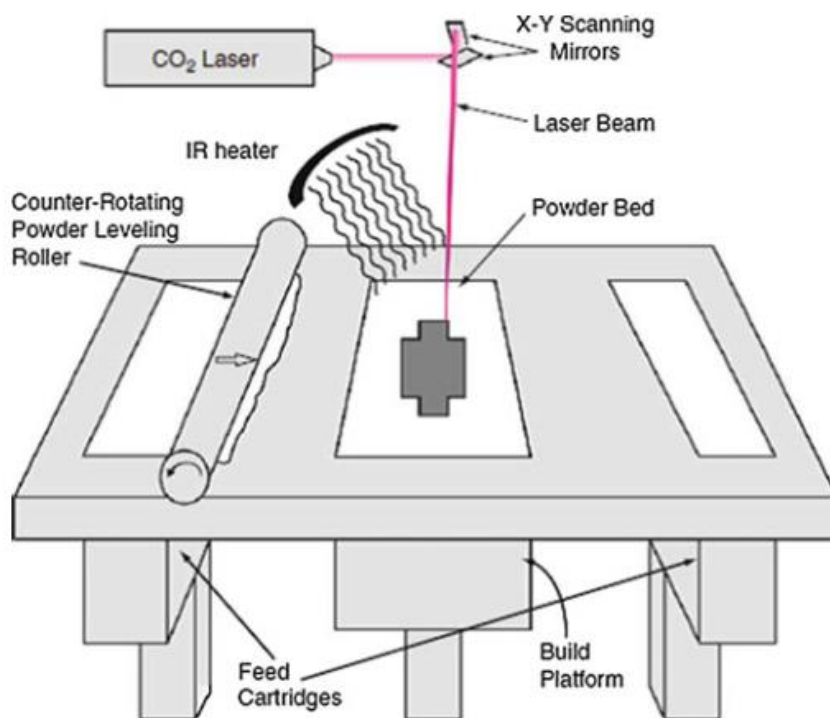
Pääasiassa markkinoilla olevissa hartseissa käytetään suurimmakseen osakseen epokseja, joiden sekaan on lisätty hieman akrylaatteja. Tällä tavoin saadaan vähennettyä epoksille ominaista haurautta, sekä valmistusvaiheessa parannettua kappaleen sisäistä yhtenäisyyttä. [1, s.65]

### 2.3.3 SLS-menetelmä

Selektiivinen laser sintraus, eli SLS, menetelmä oli alun perin kehitetty Texasin yliopistossa, Austinissa Yhdysvalloissa. SLS oli ensimmäinen jauhepetisulatus, eli PBF, menetelmään perustuva 3D-tulostus menetelmä, jossa jauhetta sulatettiin laserilla haluttuun muotoon. Alkuperäisenä tarkoituksena oli valmistaa muovisia prototyyppkejä, mutta nykyään menetelmää voidaan käyttää myös metallisille, keraamisille ja komposiittisille materiaaleille, sekä sitä voidaan käyttää valmistamaan tuotteita suoraan kuluttajien käyttöön. [1, s.103]

Kaikki PBF-menetelmät perustuvat siihen, että raaka-aineena käytetään jauhetta, josta muodostetaan kerroksia sulattamalla, sintraamalla tai liittämällä jauhepartikkelit kemiallisesti yhteen. Sintrauksessa voidaan sintrata joko raaka-ainetta toisiinsa, tai sintrata raaka-aineen seassa olevaa sideainetta. [1, s.104–105.]

SLS-menetelmässä raaka-aineena käytetään halutun materiaalin jauhetta, joka asetaan laitteessa olevaan materiaalikasettiin. Kasetista jauhetta syötetään rakennusalustalle aina kerrosten valmistuttua telalla, joka lisää ja tasoittaa jauhekerroksen. Koska materiaali on jauhetta, sekä prosessi on hyvin herkkä lämpötilanmuutoksille, niin näiden vuoksi laitteessa prosessi tapahtuu usein suljetussa kammiossa. Kammiossa jauhetta usein lämmitetään lämmittimillä lähelle materiaalin sulamispistettä. Lämmitys auttaa nopeuttamaan prosessia sulattamalla jauhepartikkelit yhteen nopeammin, sekä vähentää valmiin kappaleen alueellisista lämpötilaeroista johtuvaa vääntymistä. Kun rakennusalustalla on sopivan kokoinen kerros materiaalia, niin laite alkaa skannata jauhepedin pintaa laserilla valmistettavan kerroksen mukaisesti sulattaen jauheesta kerroksen. Kerroksen valmistuttua rakennusalustaa siirretään kerrospaksuuden verran alaspäin, minkä jälkeen tela syöttää lisää jauhetta. Prosessi jatkuu niin kauan, kunnes kappale on saatu valmiiksi, minkä jälkeen kappaleet poistetaan laitteesta ja puhdistetaan sulamattomista jauhepartikkeleista. [1, s.104–105, 138.]



Kuva 5. SLS- menetelmä. [1, s.104.]

Periaatteessa menetelmä toimii kaikille materiaaleille, jotka voidaan sulattaa toisiinsa lämmittämällä materiaalista valmistettua jauhetta. Kuitenkin korkeaa lämpötilaa vaativat

metallit ovat hyvin haasteellisia, koska ne vaativat kammiolta jatkuvaa korkeaa lämpötilaa, sillä jos kerrokset jäähtyvät eri aikoina, niin tällöin lämpöliikkeet aiheuttavat kappaleessa käpertymistä ja valmis kappale on muodostaan vääntynyt kulmista. Lisäksi helposti lämpöä johtavat materiaalit voivat aiheuttaa lämmön siirtymistä ei-halutuille alueille, mikä johtaa epämuodostumisiin ja muihin virheisiin lopullisessa kappaleessa. Tämän vuoksi SLS-menetelmässä on lähinnä käytössä muoviset raaka-aineet. [1, s.138–140.]

Hyvänä puolena jauheisessa valmistusmateriaalissa on se, että tukimateriaalille ei ole tarvetta, sillä jauhe itsessään toimii tukimateriaalina. Tällä tavoin voidaan nopeuttaa kokonaisprosessia, kun tukiainetta tai -osia ei ole tarvetta poistaa liuottamalla tai työstämällä. Tästä huolimatta useimmat metalliset osat tarvitsevat tukirakenteita, jotta voidaan välttää osien vääntymiseltä. SLS-menetelmässä muita 3D-tulostusmenetelmiä parempana ominaisuutena on se, että laitteen tulostustilavuutta voidaan hyödyntää paremmin, koska koko tulostusalue on tuettu jauheella tulostuksen aikana. Muilla menetelmillä jouduttaisiin kappaleille tekemään tukirakenteita, jotka myöhemmin jouduttaisiin poistaa. [1, s.140.]

Menetelmän tarkkuus on täysin riippuvainen siitä, minkä kokoisia partikkeleita käytetään valmistukseen. Suuremmat partikkelit ovat hieman halvempia niiden yksinkertaisemmän valmistuksen ansiosta, mutta niillä valmistetut kappaleet eivät saavuta yhtä hyvää tarkkuutta, kuin hienommilla jauheilla valmistetut. Tästä huolimatta SLS-menetelmällä ei voida saavuttaa yhtä hyvää tarkkuutta, kuin SL-menetelmällä. [1, s.140–141.]

Teoriassa SLS-menetelmällä pystytään valmistamaan tuotteita kaikista materiaaleista, jotka voidaan sulattaa ja kovettaa SLS-menetelmällä. Näihin materiaaleihin lukeutuvat kestopuovut, metallit sekä keraamiset materiaalit.

Yleisimpänä materiaalina muovikappaleiden valmistukseen käytetään nylonjauhetta, johon voidaan myös seostaa lasipartikkeleita, jotka tekevät lopullisesta kappaleesta jäykempiä ja lujempia, mutta huonontavat sitkeyttä. [1, s.138.]

Metalliset materiaalit vaativat paljon korkeamman lämpötilan ja tehokkaamman laserin, minkä vuoksi metallisille materiaaleille on kehitetty direct metal laser sintering-menetelmä [13].

## 2.4 3D-tulostuksen yleiset edut ja haitat

3D-tulostuksen ehdottomasti tärkeimmät edut ovat valmistusprosessin nopeus kokonaisuudessaan, sekä menetelmän joustavuus. Kuten aiemmin on mainittu, niin 3D-tulostus alun perin kehitettiin prototyyppien valmistukseen, johon menetelmää yhä käytetään. Tulostettujen kappaleiden käytännöllisyyttä ja toimivuutta voidaan kokeilla näiden prototyyppien avulla ennen lopullisen esineen valmistusta. Perinteisissä muovin valmistusmenetelmissä jouduttaisiin valmistamaan prototyyppi joko koneistaen tai valmistamalla muotti, joista kumpikin vie paljon aikaa ja rahaa. 3D-tulostuksella voidaan luoda prototyyppi hyvin lyhyellä aikavälillä ilman korkeita kustannuksia.

Valmistuksessa 3D-tulostetut kappaleet ovat siitä hyviä, että ne eivät vaadi laitteille uusia muotteja tai muita työstövaiheita, vaan ainoastaan 3D-mallin, joka viipaloidaan ja tulostetaan [2, s.44–45]. Tällä tavoin ei ole tarvetta varastoida vanhoja ruiskuvalumuotteja tai valmistaa ylimäärin varaosia, jotka vievät tilaa varastossa ja mahdollisesti eivät välttämättä tule koskaan myydyksi. 3D-mallit, joiden pohjalta kappaleet tulostetaan, vievät kovalevyillä ja pilvipalveluissa mitättömän verran tilaa. Lisäksi olemassa olevia malleja voidaan muokata ja päivittää aina tarpeen tullen, mikä voi kestää muutamia minuutteja riippuen päivityksen laajuudesta. Myöskään valmistettavan kappaleen vaihdon kesto ei kestä kauempaa, kuin tulostettavan kappaleen vaihtaminen tulostimessa [2, s.45].

Etenkin vanhojen autojen, laitteiden ja muiden esineiden varaosien hinta olisi huomattavasti edullisempi, sekä saatavuus parempi, jos näistä esineistä olisi olemassa alkuperäinen 3D-malli, jonka avulla tulostettaisiin varaosa.

Kuten aiemmin on mainittu, niin varastoinnin määrä ja tarpeellisuus laskisi huomattavasti, kun esineitä ja varaosia voidaan tulostaa aina tarpeen mukaan. Tällöin tuotteiden varastoinnin sijasta varastoitaisiin ainoastaan 3D-tulostukseen käytettäviä materiaaleja. [2, s.46.]

3D-malliin helposti tehtävien muutosten ansiosta tuotteiden personalisointi ja kustomointi on mahdollista toteuttaa erittäin sujuvasti. Tuotteen valmistaja voi antaa asiakkaalle mahdollisuuden lisätä nimikirjaimet, muuttaa esineen muotoa tämän tarpeiden mukaisesti tai muita mahdollisuuksia muokata tuotetta. [2, s.55–57.]

Yleisesti tuotteiden valmistuksessa halutaan käyttää mahdollisimman kustannustehokasta menetelmää, mikä tarkoittaa käytännössä tuotteiden valmistusta halvalla työvoimalla, halvoilla materiaaleilla, halvoilla laitteilla sekä muita keinoja vähentää valmistuskustannuksia. Näin yritys voi myydä tuotteita edullisemmalla hinnalla ja saavuttaa laajemman asiakaskunnan. Tällöin tuote valmistetaan siellä missä se on edullisinta, mikä voi aiheuttaa tuotteen valmistuksen jakautumisen useaan eri maahan. Tämä tarkoittaa kuljetuskustannusten ja tuotteen valmistuksen keston kasvamista.

3D-tulostus mahdollistaa tuotteiden valmistuksen lähempänä asiakasta, koska valmistus on melkein täysin automaattista, eikä työvoimaa juurikaan tarvita. Muutamien kappaleiden valmistus on hyvin kätevää ja helppoa, eikä laitteelle jouduta eri kappaleiden valmistuksen välissä tekemään mitään muutoksia, kuten vaihtamaan muotteja. Ainoastaan materiaali voidaan joutua vaihtamaan, ja se voidaan toteuttaa suhteellisen nopeasti. Tuotteen valmistuksen ollessa lähempänä asiakasta pystytään säästämään tuotteen kuljetuksista syntyvistä kustannuksista, ja tuotteen tilaus onnistuu suoraan valmistajalta, jolloin välikäsien viemät kustannukset vähenevät. [2, s.334.]

Ongelmana kuitenkin 3D-tulostuksessa on eri menetelmien omat rajallisuudet sekä raakamateriaalin vaatimukset. Kaikilla 3D-tulostusmenetelmillä on ongelmana tuotteen valmistuksen pitkä kesto, joka kuitenkin voidaan korjata hankkimalla useampi 3D-tulostin. Tulostettujen tuotteiden tarkkuus 3D-malliin verrattuna voi myös erota hieman, minkä vuoksi tuotetta valmistaessa joudutaan ottamaan huomioon parametrien mahdolliset muutokset lopullisessa tuotteessa.

### **3 Muovin elektrolyyttinen pinnoitus**

#### **3.1 Sähkökemiallinen pinnoitus**

Sähkökemiallisessa pinnoituksessa on tarkoituksena pinnoittaa kappale saostamalla metalli-ioneista metallinen pinnoite katodin pinnalle. Sähkökemialliseen pinnoittamiseen tarvitaan virtalähde tai pelkistyskemikaalia, elektrolyytti, katodi ja anodi. Elektrolyytti on liuos, johon on liotettu metallisuolaa, johtosuoloja, kostutusaineita ja muita kylvyn ominaisuuksia parantavia aineita, sekä autokatalyyttisessä pinnoituksessa pelkistinaineita. Elektrolyytin päätehtävänä on toimia väliaineena, joka mahdollistaa metalli-ionien liikkumisen ja saostumisen katodin pinnalle. Katodina toimii aina pinnoitettava kappale, joka

on usein sähköä johtava metallinen kappale, mutta voi myös olla esikäsitelty muovinen kappale. Anodina toimii usein elektrolyyttiin liukeneva metallinen kappale, joka on samaa metallia kuin saostettava pinnoite, tai sitten anodina voi toimia liukenematon sähköä johtava kappale. Sähkökemiallisessa pinnoituksessa voidaan kappale joko pinnoittaa sähkövirran avulla tai pelkistysaineiden avulla. Sähkövirtaa käytettäessä sitä kutsutaan usein elektrolyyttiseksi pinnoittamiseksi ja pelkistysaineita käytettäessä kemialliseksi tai autokatalyyttiseksi pinnoittamiseksi. [14, s.4, 22, 88, 94]

Elektrolyyttisessä pinnoituksessa katodiin johdetaan elektroneita virtalähteen avulla. Tällöin katodi saa negatiivisen varauksen, joka vetää puoleensa positiivisesti varautuneita metalli-ioneita, jotka on joko lisätty valmiiksi metallisuolana pinnoitusaltaaseen tai jotka ovat lienneet anodin oksidoituessa. Metallionit liikkuvat katodin pinnalle, jossa ne redusoituvat varautumattomaksi atomiksi elektronin siirtyessä katodilta metalli-ionille, mikä tarkoittaa metallin saostumista pinnoitteeksi katodin päälle. [14, s.94–96; 15, s.10–17.]

Kemiallisessa pinnoituksessa ei käytetä sähkövirtaa, vaan metalli-ionit redusoidaan pelkistimen avulla. Reaktiossa pelkistin oksidoituu redusoiden metalli-ionin, jolloin metalli-ioni saostuu metalliatomeiksi katalyyttiselle pinnalle. Katalyyttisenä pintana toimii usein pinnoitettava kappale, mutta myös kylpyaltaan seinämät ja pienet saostumat elektrolyttisissä toimivat katalyyttisenä pintana, mikä aiheuttaa hukka saostumaa. [15, s.15–16; 14, s.89–91.]

### 3.2 Muovin pinnoituksesta yleisesti

Muovin elektrolyyttisen pinnoituksen suosio nousi 1960-luvun alussa, kun akryylinitriili-butadieeni-styreenille, eli ABS:lle, kehitettiin menetelmä, jolla sen pinta saatiin vastaanottamaan autokatalyyttisiä pinnoitteita [16]. Menetelmä otettiin käyttöön pääasiassa ajoneuvoteollisuudessa, jossa aiemmin metalliset osat kuten ritalät, lamppujen sisäosat, pölykapselit ja listat vaihdettiin pinnoitettuun muoviin [16; 17, s.204–205]. Menetelmä on käytössä niin koristetarkoituksissa, kuin teknisissä ja mekaanisissa käyttötarkoituksissa LVI-teollisuudessa, kodinkoneissa ja elektroniikkateollisuudessa [17, s. 204–205].

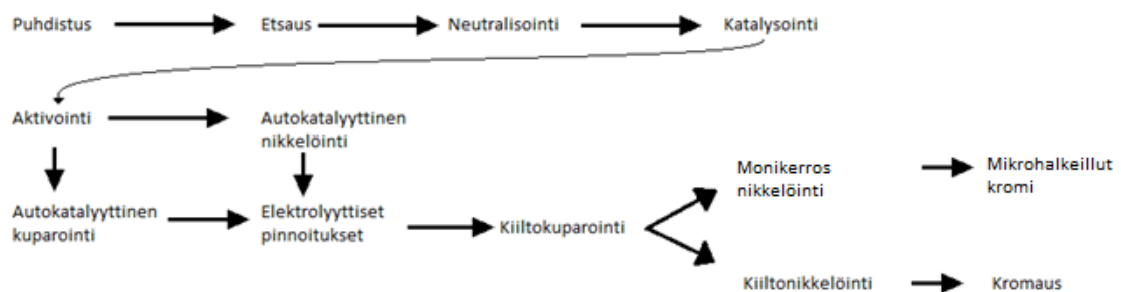
Muovisen kappaleen mekaaniset ominaisuudet paranevat melkein kaikin puolin, mutta erityisesti kulutuskestävyydeltä. Lisäksi kappale saadaan johtamaan pinnalta lämpöä tai

sähköä, ja itse muovi suojataan kemiallisilta ja UV-valon altistumiselta. Metallinen pinta myös hylkii bakteereja sen epäorgaanisuuden vuoksi. Ongelmina kuitenkin muovin pinnoituksessa on sen prosessin korkea vaatimustaso, niin kappaleen, kuin pinnoitusprosessin osalta, sekä lopputuotteen kokonaiskustannusten nousu. [17, s.204.]

Myös polykarbonaattia, polyamideja, polysulfooneja, sekä ABS/PC seosteita voidaan pinnoittaa, mutta teollisuudessa pinnoitettavista muoveista ABS on pinnoitettuinta muovia noin 90 %:n markkinaosuudella. [16; 18, s.202.]

### 3.3 ABS muovin pinnoitusprosessi

Yleisesti pinnoitusprosessissa ABS:n pinta ensin etsataan kemikaaleilla mikrohuokoiseksi, jotta sen pintaan absorboituisi metallisia partikkeleita. Nämä metalliset partikkelit vastaanottavat autokatalyyttisen pinnoitteen, jonka päälle pinnoitetaan erityyppisiä elektrolyyttisiä pinnoitteita. Prosessissa käytetään useaa erityyppistä elektrolyyttistä pinnoitetta, jotka lopuksi pinnoitetaan joko kovakromi- tai kiiltokromipinnoitteella. [18, s.202–204.]



Kuva 6. ABS muovin tyypillinen pinnoitusprosessi. Kaaviosta on jätetty pois huuhtelut. [18, s.203]

#### 3.3.1 Puhdistus

Pinnoitettavan kappaleen puhdistus on erittäin tärkeää etenkin silloin, kun valmistettu kappale on tuotu muualta. Kuljetuksen aikana kappale on saattanut likaantua kosketuksesta tai kuljetustilan epäsiisteydestä. Yleisimmin puhdistuksessa käytetään alkaalista

pesua, mutta myös muita puhdistusmenetelmiä voidaan käyttää. Kesto on täysin riippuvainen käytetyistä puhdistustavoista ja kemikaaleista, mutta yleisesti kemialliset puhdistukset voivat kestää muutamista minuuteista 15 minuuttiin. [18, s.202–203.]

### 3.3.2 Etsaus

Etsaus on pinnoitteen kiinnipysyvyyden kannalta tärkein prosessivaihe. Etsauksessa ABS muovin pinnalta syövytetään butadieeni molekyylejä, jolloin muovin pintaan syntyy mikroskooppisia huokosia, joihin palladium- ja tina-kolloidipartikkelit voivat adsorboitua katalysointivaiheessa. Tärkeää prosessissa on se, että pinnoitettava kappale on valmistettu virheettömästi, sillä muuten kappaleen etsaus voi epäonnistua. Jos etsaus epäonnistuu, niin tällöin etsausta seuraavat vaiheet todennäköisimmin myös epäonnistuvat. Kylvyn koostumus on usein kromihappo/rikkihappoliuos, mutta markkinoilla on myös olemassa uusia permanganaattipohjaisia etsauskemikaaleja, joiden on tarkoitus korvata kuudenarvoiset kromauskemikaalit. Etsauksen kesto on 5–10 minuuttia. [18, s.203.]

### 3.3.3 Neutralisointi

Neutralisoinnissa muovin pinnalta poistetaan kaikki mahdollinen siirre, joka on saattanut jäädä etsauksen jälkeen. Kromijäänteet voivat estää tina- ja palladium-kolloidipartikkelien absorboitumisen, ja tällöin katalysointi estyisi. [18, s.203.]

### 3.3.4 Katalysointi

Katalysointi kylpy sisältää palladium- ja tina-kolloidipartikkeleita, jotka kiinnittyvät ABS:n pintaan. Katalysoinnin tehtävänä on saada pinnalle palladiumkerros, joka mahdollistaa pinnan vastaanottamaan autokatalyyttisen pinnoituksen. Tinan tehtävänä on hakeutua muovin pinnalle ja palladiumin tarkoituksena on vastaanottaa autokatalyyttinen pinnoite. Palladium ei kuitenkaan pysty vastaanottamaan pinnoitetta heti katalysoinnin jälkeen, koska se on kolloidipartikkeleissa tina-atomien sisällä. Katalysoinnin kesto on noin 2–10 minuuttia. [18, s.203.]

### 3.3.5 Aktivointi

Aktivoinnissa pinnalta poistetaan ylimääräinen tina, jolloin saadaan kolloidipartikkelien sisällä oleva palladium esille. Ilman aktivointia tina estäisi palladiumin autokatalyyttisen pinnoittamisen. Kesto ainoastaan muutama minuutti. [18, s.203.]

### 3.3.6 Autokatalyyttinen pinnoitus

Autokatalyyttisessä pinnoituksessa käytetään joko nikkelöintiä tai kuparointia. Pinnoitteen tehtävänä on luoda sähköä johtava kerros, jonka päälle voidaan tehdä paksumpi elektrolyyttinen kerros. Pinnoituksen kesto on täysin riippuvainen käytettävistä kemikaaleista ja halutusta pinnoitepaksuudesta, mutta yleisesti 5–15 minuuttia. [18, s.203–204.]

### 3.3.7 Elektrolyyttiset pinnoitteet

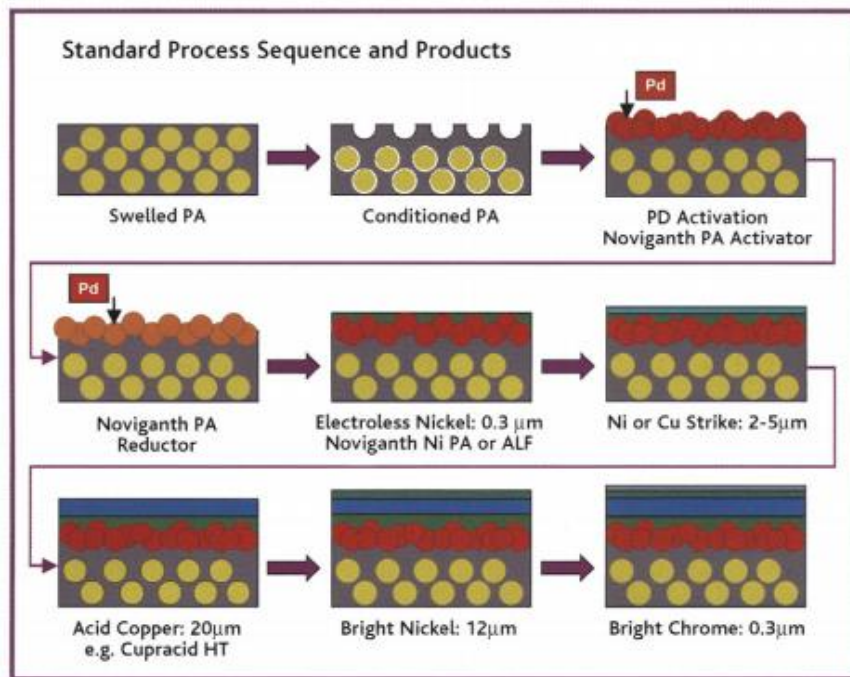
Elektrolyyttisessä pinnoituksessa käytetään ensin esinikkelöintiä tai -kuparointia, joilla pyritään kasvattamaan pinnoitteen kerrosta, jotta vältetään pinnoitteen palamiselta. Esi-pinnoituksen jälkeen käytetään usein hapanta kiiltokuparointipinnoitetta, joka tasoittaa pintaa, parantaa lopullisen pinnoitteen ulkonäköä, sekä lievittää pinnoitteen jännitettä korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi voidaan käyttää muita pinnoitteita kasvattamaan pinnoitteen kokonaispaksuutta. Kesto on täysin riippuvainen käytettävistä pinnoitteista, kemikaaleista, sekä halutuista pinnoitepaksuuksista. [18, s.204.]

### 3.3.8 Kromaus

Viimeinen pinnoite vaikuttaa suurimmakseen osakseen lopullisen pinnoitteen ulkonäköön, minkä vuoksi se valitaan usein käyttökohteesta riippuen. Useimpina pinnoitteina käytetään nikkeli-kromiyhdistelmää, jossa elektrolyyttisten pinnoitteiden päälle pinnoitetaan kiiltonikkeli kerros, joka viimeistellään kromauksella. Kromauksessa voidaan käyttää kiiltokromausta, tai kovakromausta. [18, s.204–205.]

## 3.4 Polyamidin pinnoitusprosessi

Polyamidin pinnoitusprosessi muistuttaa joissain määrin ABS:n pinnoitusta, mutta eroaa hyvin paljon etsauksen kohdalla.



Kuva 7. Noviganth polyamidin pinnoitusprosessi. [19]

Pinnoitusprosessi aloitetaan normaalisti puhdistamalla pinta epäpuhtauksista niin, että seuraavat vaiheet onnistuisivat. Polyamidia ei pystytä suoraan etsaamaan kemikaaleilla, vaan sitä joudutaan ensin turvottamaan orgaanisilla liuoksilla, jotka tekevät polyamidin pinnasta mikrotasolla karhean, mikä parantaa aktivoinnissa käytettävän palladiumin kiinnipysyvyyttä. Ennen polyamidin aktivoimista sen pinta käsitellään käsittelyliuoksella, joka poistaa pinnalta liuosten jäänteet. [19.]

Käsittelyn jälkeen polyamidikappale upotetaan aktivointikylpyyn, jossa kappaleeseen absorboituu palladiumioneita. Palladiumionit redusoidaan seuraavassa vaiheessa, jolloin kappaleen pinnalle muodostuu hyvin ohut palladiumpinnoitekerros, joka pinnoitetaan autokatalyyttisellä pinnoitteella. Polyamidin autokatalyyttiseen pinnoittamiseen voidaan käyttää esimerkiksi ammoniakkivapaata nikkelifosforikylpyä. Autokatalyyttisen nikkeli-pinnoitteen päälle pinnoitetaan vielä elektrolyyttiset pinnoitteet, joihin kuuluu esinikkelöinti tai -kuparointi, hapan elektrolyyttinen kuparointi, kiiltoonikkelöinti ja viimeiseksi pinnoitteeksi kiiltokromaus. [19.]

## 4 Teoreettisen osuuden pohdintaa

### 4.1 Ripustimen tulostus kappaleeseen

Ripustimen tulostus kappaleeseen on tarpeellista, jos halutaan automatisoida koko pinnoituslinjasto. Kokeellisesta osuudesta on mainittava, että vaikka kappaleet saatiin osittain pinnoitettua, kuitenkin kappaleissa ollut ripustin ei ole sopiva malli pinnoituksen kannalta, koska pinnoitettavasta muovista on saatava erittäin jäykkä ote. Kappaleisiin tulostettu koukkuripustin, johon lisättäisiin metallinen johdin, ei takaisi riittävää kontaktia muoville. Ripustuksessa on oltava ripustin, joka on jatkuvasti kontaktissa kiinnittimen kanssa.

Koukku ja muut avonaiset ripustimet eivät sovellu muovin metalliseen pinnoitukseen. Parempana ripustimena olisi kolmion, neljäkkään tai soikio muotoinen aukko, joka on kooltaan siitä läpivietävää ripustusosaa hieman pienempi. Tällöin saadaan hyvin jäykkä ja vahva ote kappaleesta.

Vaihtoehtoisesti tulostukseen voitaisiin suunnitella kehikko, jonka sisälle mallinnetaan haluttu kappale. Kehikon olisi tarkoitus toimia kaikille kappaleille ripustimena, jolloin automaattisessa linjastossa ei olisi tarvetta suunnitella jokaiselle kappaleelle omaa ripustinta, eikä tällöin jouduttaisi suunnittelemaan jokaiselle eri kappaleelle omaa ohjelmaa automaation puolelta. Ongelmana kehikolle on kuitenkin se, että kehikko ei ota huomioon kehikon irrotusta itse kappaleesta.

Tulostettaessa ripustin kiinni kappaleeseen on aina tarpeen pinnoittaa myös ripustin metallilla, koska muuten kappaletta ei saada pinnoitettua elektrolyyttisellä pinnoitteella muovin sähköä johtamattomuuden vuoksi.

Toinen mahdollisuus olisi tulostaa 3D-tulostimella metallisen ripustimen ympärille tulostettava esine, mutta tällöin jouduttaisiin suunnittelemaan rakennettavan kappaleen g-koodi manuaalisesti, jotta laite osaisi tulostaa metallisen ripustimen ympärille, eikä tulostuspää osuisi metalliseen osaan.

#### 4.2 3D-tulostettavat ja metallilla pinnoitettavat muovit

Pinnoitettavia ja 3D-tulostettavia muoveja ovat ABS, ABS/PC-sekoitus ja polyamidi. Näistä muoveista ABS ja ABS/PC ovat suosituimmat ja laajimmin pinnoitetut muovit. Polyamidin pinnoittamiseen löytyy kaupallisia yhdisteitä [20;21], mutta sen pinnoittamisen ongelmina on alttius absorboida vettä.

Näistä muoveista 3D-tulostettavissa FDM-menetelmällä ovat ABS, ABS/PC sekoitus ja polyamidi, sekä SLS-menetelmällä ainoastaan polyamidi. Materiaalivalikoima on hyvin riippuvainen myös käytettävästä tulostimesta. Esimerkiksi Stratasysilla on olemassa laaja valikoima ABS-, ABS/PC- ja PA-materiaaleja, mutta nämä materiaalit käyvät ainoastaan Stratasysin valmistamiin tulostimiin, joihin ei käy muiden valmistajien materiaalit.

#### 4.3 3D-tulostuksen edut perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna

3D-tulostuksen edut riippuvat täysin valitusta menetelmästä sekä valmistettavan kappaleen käyttötarkoituksesta.

3D-tulostus pystyy periaatteessa mahdollistamaan metallilla pinnoitettujen muovikappaleiden täysautomaattisen valmistuksen. Asiakas voi lähettää kappaleen valmistajalle STL-tiedostomuodossa olevan 3D-mallin ja valita tietyt kappaleen ominaisuudet, kuten muun muassa täyttöasteen, seinämien paksuuden ja kerrokorkeuden, tai vaihtoehtoisesti lähettää valmiiksi viipaloidun tiedoston. Jos asiakkaalla on ainoastaan kappaleesta pohjapiirustukset, niin mahdollisuuksien mukaisesti voidaan kappale myös mallintaa valmistajalla. Tämän jälkeen valmistaja voi laskea viipalointiohjelmista näkyvien informaatioden, kuten materiaalikulun ja tulostusajan, perusteella kappaleiden hinnan riippuen mitä viipalointiohjelmaa käytetään. Koska kappaleen koko on tiedossa, niin voidaan kappaleen pinta-ala laskea sen perusteella tai vaihtoehtoisesti CAD-ohjelmistolla voidaan saada suoraan kappaleen pinta-ala. Pinta-alatietojen perusteella saadaan pinnoituskulujen kemikaalikulutuksen määrä laskettua. Asiakkaalle voidaan lähettää suhteellisen tarkka hinta-arvio saatavilla olevien tietojen perusteella.

Verrattuna ruiskuvalettuihin tai suulakepuristettuihin kappaleisiin, 3D-tulostuksessa ei ole tarvetta valmistaa muotteja, joten prototyyppierän valmistus on hyvin edullista ja nopeaa.

Kuitenkin ongelmana 3D-tulostuksessa on suurien tuotantoerien kesto, minkä vuoksi sen soveltuvuus suuriin tuotantotieriin on huono verrattuna ruiskuvalettaviin tai suulakepuristettaviin kappaleisiin, jos halutaan hyvälaatuisia kappaleita. Jos halutaan valmistaa suuria eriä nopeammin, niin tällöin joudutaan alentamaan kappaleen tarkkuutta tulostamalla paksummilla kerroksilla, suuremmalla suuttimella tai vähentämällä kappaleen täyttöastetta.

FDM-menetelmällä valmistettavissa tuotteissa pinnanlaatu ja mekaaniset ominaisuudet eivät ole yhtä hyviä kuin ruiskuvalu- tai suulakepuristusmenetelmillä valmistetut tuotteet, sillä kappale on osittain ontto, eikä se ole rakenteellisesti yhtä yhtenäinen.

Yleisesti 3D-tulostus sopii erinomaisesti alihankkijayrityksille sen joustavuuden, halpojen investointikulujen, tuotannon nopean aloituksen vuoksi, sekä rajallisten tuotantoerien edullisen tuotantohinnan vuoksi.

#### 4.4 Piirilevyjen tulostus suoraan kappaleisiin

Piirilevyjen tulostus kappaleisiin voidaan toteuttaa joko pinnoittamalla kappaleen sisäpuolelta selektiivisesti kuparilla, tai vaihtoehtoisesti tulostamalla piirilevy sähköä johtavalla filamentilla. Pinnoitettaessa sähköä johtamatonta materiaalia joudutaan alue pinnoittamaan autokatalyyttisellä kuparilla, koska elektrolyyttisessä pinnoituksessa joudutaisiin jokaiseen pinnoitettavaan alueeseen liittää sähköä johtava johde, ja tämän toteutus on hyvin hankalaa ja epäkäytännöllistä.

Periaatteessa kappale voidaan pinnoittaa elektrolyyttisellä pinnoitteella, minkä jälkeen piirilevyn kuviointi luodaan jälkikäteen esimerkiksi laserin tai muun menetelmän avulla, jolla saadaan poistettua kuparia kappaleen päältä.

Muovin selektiivinen pinnoittaminen pystyttäisiin toteuttamaan esimerkiksi maskaamalla tietyt alueet materiaalilla, joka estää maskattujen alueiden pinnoittamisen eikä myöskään reagoi tai liukene pinnoituskemikaaleihin.

FDM-menetelmällä tämä voitaisiin toteuttaa valmistamalla kappale tulostimella, jossa on kaksi tulostuspäätä. Toisesta tulostuspäästä tulostetaan pinnoitettavaa muovia, kun taas

toisesta muovia, joka ei pinnoitu. Kun kappale pinnoitetaan, niin ainoastaan halutut alueet pinnoittuvat.

Maskauksessa käytettävä muovi voi esimerkiksi olla HIPS, joka pinnoituksen jälkeen voidaan liuottaa limoneenilla. Maskausmuovi voidaan myös jättää kappaleeseen, jos siitä ei ole haittaa tuotteelle. Valittava muovi on kuitenkin parasta valita siten, että se kestää pinnoituskemikaaleja. Tämä menetelmä ei kuitenkaan toimisi SLS-menetelmässä, jossa usean eri materiaalin käyttö samaan aikaan tulostuksessa on mahdotonta. Maskaus voidaan myös toteuttaa peittämällä pinnoitettava alue pinnoituksen ajaksi muotilla, jota pysyttäisiin pinnoituksen jälkeen käyttämään seuraavan kappaleen maskaamiseen. Tällöin kuitenkin jouduttaisiin valmistamaan maskaus kappale erikseen uusille tuotteille. Maskausmuotin käyttäminen voisi olla myös automatisoinnin kannalta hyvin hankalaa.

Piirilevyjen tulostusta varten on olemassa menetelmiä, jotka ovat lähellä sähkökemiallisia pinnoitusmenetelmiä. Yhdessä menetelmässä piirilevyn päälle levitetään epoksin ja butadieenin emulsio, josta etsataan pois butadieeni ja pinnoitetaan ABS-muovin tavoin. Vaihtoehtoisena metodina on olemassa myös polyamidin pinnoituksen tapainen menetelmä, jossa piirilevyn päälle pinnoitetaan epoksikerros, jota turvotetaan ja etsataan, minkä jälkeen se pinnoitetaan polyamidin ja ABS-muovin tavoin. [22, s.67].

Piirilevyn tulostus on periaatteessa mahdollista toteuttaa, mutta se ei mahdollisesti ole käytännöllisin vaihtoehto. Piirilevystä ei myöskään voi tehdä kaksipuolista, jos piirilevy on pinnoitettu kappaleeseen.

#### 4.5 3D-tulostus osana täysautomaattista pinnoituslinjastoa

3D-tulostus parantaisi linjaston automatisointia ja joustavuutta, mutta samalla toisi mukana jälkikäsittelyn tarpeen tulostuksen jälkeen. Jälkikäsittely tuottaa suurimman osan ongelmista, koska sen toteutus täysin automaattisesti on hyvin haasteellista. Hiontaa on lähes mahdotonta toteuttaa automaattisesti, mutta jos asetonikäsittely saadaan toimimaan luotettavasti, niin linjaston täysautomaatisointi on mahdollista. Asetonin sijaan voidaan myös käyttää dikloorimetaania tai metyylietyyliketonia. Liuotinpohjaisessa jälkikäsittelyssä on kuitenkin lisääntynyt syttymisriski, koska kyseiset aineet voivat syttyä erittäin helposti. Lisäksi ongelmana on jälkikäsittelyiden kesto, joka helposti voi viedä yli 18

tuntia. Vaikka itse käsittely voi vähimmillään kestää muutamia sekunteja, niin tästä huolimatta kappaleita kannattaa kuivata useamman tunnin ajan, koska liuotinjäämät voivat aiheuttaa ongelmia pinnoituksessa. Markkinoilla on olemassa kaupallisia laitteita, joilla pystytään tasoittamaan tulostetun muovin pintaa kemiallisilla liuottimilla. [23]

FDM-tulostin on automatisoinnin kannalta toimiva, sillä FDM-tulostimet toimivat myös aukinaisella tulostuskammioilla. Avonainen tulostuskammio kuitenkin voi aiheuttaa ongelmia tulostuksessa, jos kerrokset jäähtyvät liian nopeasti, koska tällöin kerrokset voivat vääntyä ja irrota toisistaan. SLS-tulostimissa kammiota ei voi pitää avonaisena, minkä vuoksi automatisointia kyseiselle tulostimelle on erittäin hankala toteuttaa.

Tulostuksen kesto on yksi ongelmista linjastossa, koska 3D-tulostuksessa voi kestää tunnista yli 48 tuntiin, riippuen kappaleen koosta, tulostustarkkuudesta ja suuttimen koosta. Kappaleen tulostuksen kesto voidaan laskea joillain viipalointiohjelmilla, jolloin saadaan suhteellisen tarkka arvio kestosta. Kappaleen jälkikäsittely liotinkäsittelyllä voi kestää maksimissaan 18 tuntia, jos halutaan varmistaa liuottimien poistuminen kappaleesta. Kappaletta voidaan siis päästä pinnoittamaan tällöin vasta noin 66 tunnin päästä, jos ei oteta huomioon 3D-mallille tehtävää suunnittelua. Kappaleen pinnoituksen kestoa on hankala arvioida, koska se riippuu täysin kappaleen käyttöolosuhteista, käytettävistä kemikaaleista ja pinnoitettavista kerroksista, mutta se voi olla arviolta 2–4 tuntia. Kappaleen koolla on tässä tapauksessa paljon merkitystä siihen, kuinka monta tulostinta on kannattavaa hankkia linjastolle.

Vaikka 3D-tulostimen käyttö on hyvin helppoa ja nopeaa, niin sen käyttö usein kuitenkin vaatii jonkun, joka käynnistää tulostuksen. Useissa tulostimissa tulostus käynnistetään tulostimen omasta valikosta, mikä voi hankaloittaa täysautomatisointia, koska teollisuusrobotin ohjelmoiminen siten, että se tietää mitä tuotetta halutaan tulostaa, milloin se on valmis, ja uuden kappaleen tulostuksen aloitus on hyvin hankala toteuttaa. Ei myöskään ole takuita, että teollisuusrobotti pystyisi edes käyttämään valikkoa. Materiaalin vaihto ja täydentäminen laitteeseen voi myös tuottaa ongelman, sillä sen tekemiseen vaaditaan ihminen. Ongelmia tuottavat myös mahdolliset tulostusvirheet ja tulostusten epäonnistumiset, joiden havaitsemiseen ja ratkomaan teollisuusrobotti ei pysty. Näiden vuoksi koko linjasto vaatii aina jonkun työntekijän, joka pystyy ratkomaan ongelmatilanteen. Varsinainen pinnoitusprosessi on toteutettavissa automaattisesti, kunhan kappaleet saadaan ripustettua oikealla tavalla.

## 5 Kokeellisen osuuden suunnitelma

Testien tarkoituksena on tutkia pinnoitteen kiinnipysyvyyttä 3D tulostetussa ABS muovissa, sekä tarkastella pinnoitetun kappaleen pinnoitteen laatua.

### 5.1 3D-tulostettavat mallit

Tulostuksessa käytetään joko kahta erilaista mallia, jotka suunnitellaan omiin testeihinsä, tai vaihtoehtoisesti yksi kappale, joka sopii useampaan testiin. Näistä malleista suunnitellaan kaksi erilaista variaatiota, joista toisessa käytetään ripustinta ja toisessa pientä silmukkaa.

Raportissa tulostettujen kappaleiden puoliin viitataan alapuolella yläpuolella ja sivuilla. Alapuoli on puoli, joka on koko tulostuksen aikana ollut kiinni tulostusalustassa, minkä vuoksi sillä on usein yläpuolelta selvästi tasaisempi kerros. Yläpuoli on puoli, joka on tulostuksessa viimeinen kerros, ja sillä on tasaisissa kappaleissa selvästi nähtävät tulostusjäljet. Loput puolet ovat sivut, joissa on nähtävissä tulostuksen jokainen kerros.

### 5.2 Tulostetun kappaleen jälkikäsittelyt

Tulostettujen kappaleiden jälkikäsittely on hyvin tarpeellista etenkin FDM-menetelmällä, koska kappaleeseen jää jälkiä 3D-tulostuksen jäljiltä. Yleisesti 3D-tulostettuja kappaleita voidaan jälkikäsittää esimerkiksi hiomalla tai maalaamalla, mutta hionta joudutaan tekemään käsin suhteellisen tarkasti, ja maalauksen jälkeen ABS:ä ei pystytä enää pinnoittamaan kemiallisin keinoin. Tämän vuoksi haluttiin tutkia, pystytäänkö ABS kappaleita jälkikäsittämään siten, ettei se vääristäisi kappaleen muotoja liikaa.

Kokeellisessa osuudessa myös tarkastellaan jälkikäsittelyiden toimivuutta ja mahdollista toteutusta tulostettuihin kappaleisiin sekä sitä, pystytäänkö jälkikäsiteltäviä kappaleita pinnoittamaan. Osuudessa ABS tulostettuja kappaleita käsitellään asetonilla eri tavoin, minkä jälkeen ne pinnoitetaan. Pinnoitetuista kappaleista tutkitaan sitä, eroaako pinnanlaatu jälkikäsittelemättömistä kappaleista, sekä pystytäänkö asetonikäsiteltäviä kappaleita edes pinnoittamaan.

Yhtä kappaleista pidettiin dekantterilasissa, jonka seinämille laitettiin asetoniin kostutettuja paperinpaloja. Kappaletta pidettiin lasissa siten, että kappale ei tulisi kontaktiin asetonin kanssa. Kappaletta pidettiin lasissa yhteensä noin 2 tuntia ja 15 minuuttia. Kappaletta tarkistettiin väliajoin, ja dekantterilasiin lisättiin asetonia sen verran, että paperinpalat olivat kosteat. Tarkoituksena testillä on tutkia, kuinka hyvin haihtunut asetoni pystyy tasoittamaan kappaleen pinnan epätasaisuuksia. Kolme muuta kappaletta upotettiin asetoniin 5, 15 ja 30 sekunniksi, minkä jälkeen niiden annettiin kuivua, ja niistä tutkittiin pinnanlaadun muutoksia.

### 5.3 Kappaleiden pinnoitus

Kolme neliönmallista kappaletta pinnoitettiin uusilla kolmenarvoisilla kromauskemikaaleilla, joista kaksi pinnoitettiin nikkelillä, ja yksi pinnoitettiin kuparilla. Toinen nikkelöidystä kappaleista etsattiin, ja toista kappaletta ei etsattu. Lisäksi yksi vetokoekappale ja yksi neliönmallinen kappale pinnoitettiin kromilla, käyttäen perinteisiä kuudenarvoisia kemikaaleja.

**Taulukko 1. Pinnoitettujen kappaleiden pinnoitteet.**

	Etsattu	1. pinnoitekerros	2. pinnoitekerros	3. pinnoitekerros	4. pinnoitekerros
Testikappale 1a	Kyllä	Kemiallinen kuparointi	-	-	-
Testikappale 1b	Kyllä	Kemiallinen nikkelöinti	-	-	-
Testikappale 1c	Ei	Kemiallinen nikkelöinti	-	-	-
Testikappale 2a	Kyllä	Kemiallinen kuparointi	Elektrolyyttinen kuparointi	Kiiltoonikkelöinti	Kromaus
Testikappale 2b	Kyllä	Kemiallinen kuparointi	Elektrolyyttinen kuparointi	Kiiltoonikkelöinti	Kromaus

### 5.4 Testausmenetelmät

Testausmenetelmissä tutkittiin ja testattiin pinnoitettuja, sekä asetonilla käsiteltyjä kappaleita. Pinnoitteen laatua ja pinnoittuvuutta katsasteltiin silmin sekä mikroskoopin avulla, ja pinnoitteen kiinnipysyvyyttä vääntökokeella.

#### 5.4.1 Silmin tehtävät tarkastelut

Silmin tehtävissä tarkasteluissa tutkitaan kappaleen ulkonäköä silmin, sekä kirjataan pinnoitteessa näkyvät epäkohdat. Lisäksi tarkastellaan pinnoitteen laatua, sekä miltä se näyttää ja arvioidaan 3D-tulostuksen vaikutusta pinnanlaatuun ja pinnoittavuuteen.

#### 5.4.2 Pinnoitepaksuus

Mikroskoopilla kappaleesta tehdään hie, josta mikroskoopin avulla voidaan tutkia pinnoitteen paksuutta. Lisäksi mikroskoopilla tarkastellaan pinnoitetta, sekä sen jakautumaa hieellä.

#### 5.4.3 Kiinnipysyvyys testi

Kiinnipysyvyyttä testataan vääntökokeella, jossa kappaletta väännetään ruuvipenkissä tasaisesti 90°:n kulmaan. Testin aikana pinnoitetta seurataan jatkuvasti halkeamien varalta sekä määritetään, missä kulmassa pinnoite suurin piirtein halkesi. Lisäksi tutkitaan sitä, halkesiko pinnoite pohjamateriaalin halkeamisen johdosta.

## 6 Kokeellisen osuuden toteutus ja tulokset

### 6.1 Ultimaker 2 Extended

Kappaleiden 3D tulostukseen käytettiin Ultimaker 2 Extended 3D-tulostinta (kuva 9), sekä tulostusmateriaalina käytettiin Ultimakerin 2,85 mm:n valkoista ABS filamenttia.



- |                        |                     |                      |                 |                |
|------------------------|---------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| 1 Näyttö               | 4 Alusta            | 7 Tulostuspää        | 10 Syöttölaite  | 13 USB-liitin  |
| 2 SD-korttipaikka      | 5 Alustan pidikkeet | 8 Bowden-putki       | 11 Kelan pidin  | 14 Virtakytkin |
| 3 Pyöritettävä painike | 6 Alustan ruuvit    | 9 Tulostuspään johto | 12 Virtapistoke |                |

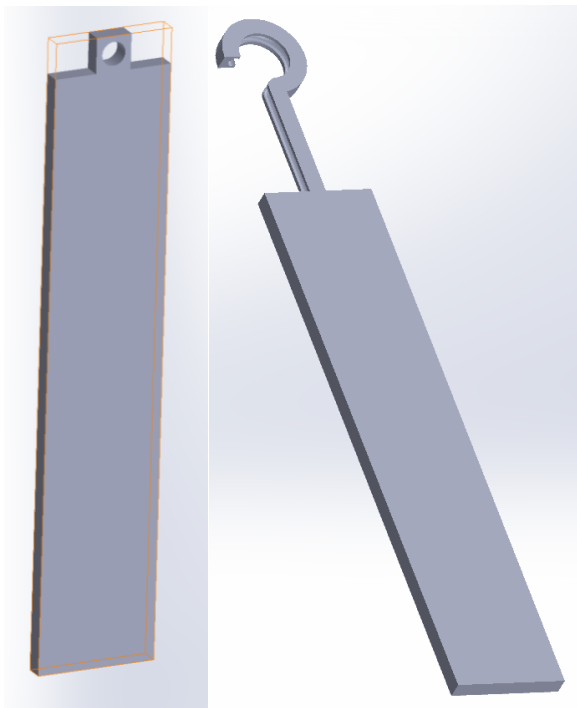
Kuva 8. Ultimaker 2 Extended 3D tulostin. [24.]

#### Tulostimen tuotetiedot:

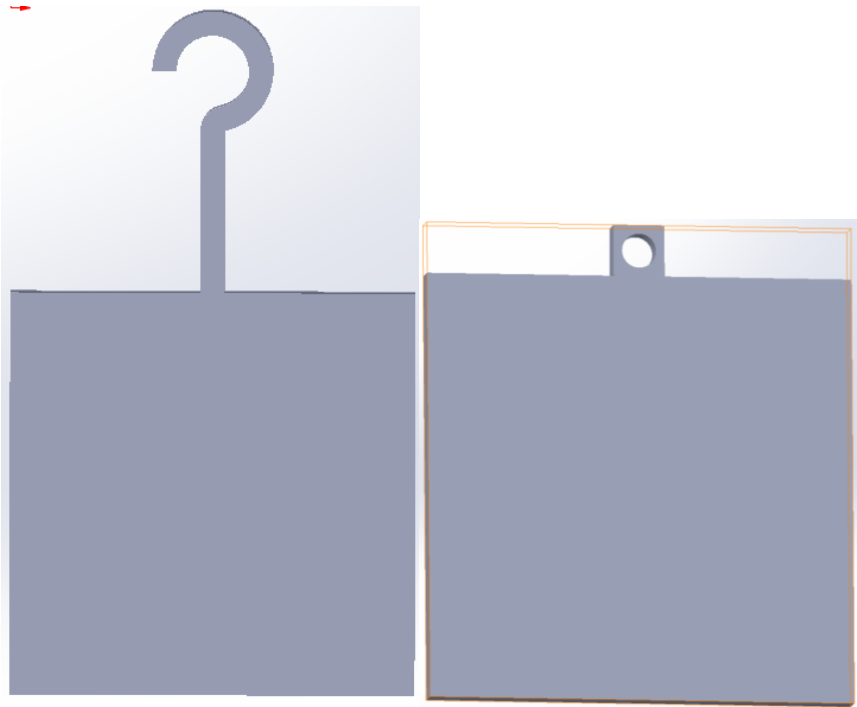
- tulostimen koko: 357 x 342 x 488 mm
- tulostusalueen koko: 223 x 223 x 305 mm
- kerrosten tarkkuus: 200 - 20  $\mu$ m
- suuttimen koko: 0,4 mm
- suuttimen lämpötila: 180 - 260 °C
- alustan lämpötila: 50 - 100 °C
- käytettävän filamentin halkaisija: 2,85 mm
- mukana toimitettava ohjelmisto: Cura-viipalointiohjelma.

## 6.2 3D- mallinnus ja tulostus

Tulostettavat kappaleet mallinnettiin Solidworks 3D CAD -suunnitteluohjelmistolla. Alun perin 3D-malleja tehtiin yksi, jonka tarkoituksena oli toimia kaikissa testeissä, mutta kappaleen tulostuksen epäonnistuessa suunniteltiin yhden kappaleen tilalle kaksi pienempää kappaletta, jotta tulostus olisi mahdollista. Kummastakin kappaleesta oli tehty kaksi muunnelmää, joista toisessa oli koukku ja toisessa silmukka.

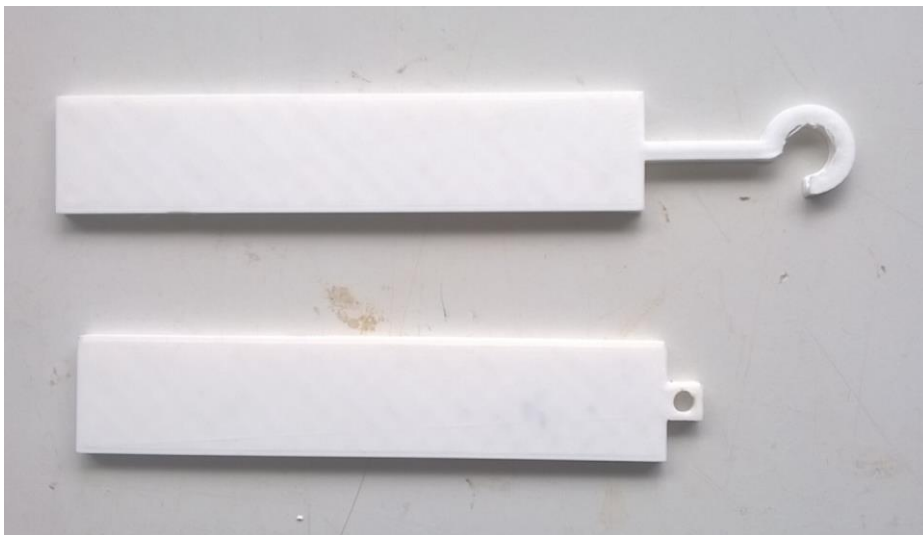


Kuva 9. Tulostettavien vääntökoekappaleiden 3D mallit. Silmukka(vas.) ja koukku(oik.) muunnelmät.

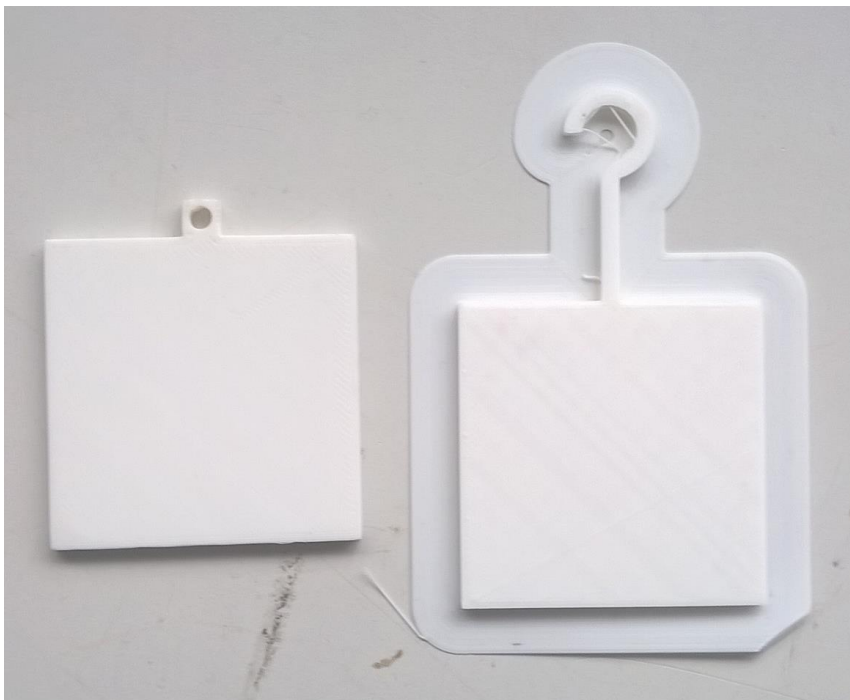


Kuva 10. Tulostettavien neliökappaleiden 3D-mallit. Silmukka(oik.) ja koukku(vas.) muunnelmät.

3D-mallit tulostettiin STL-tiedostomuotoon Solidworksissa, minkä jälkeen ne viipaloitiin Cura- viipalointiohjelmalla.



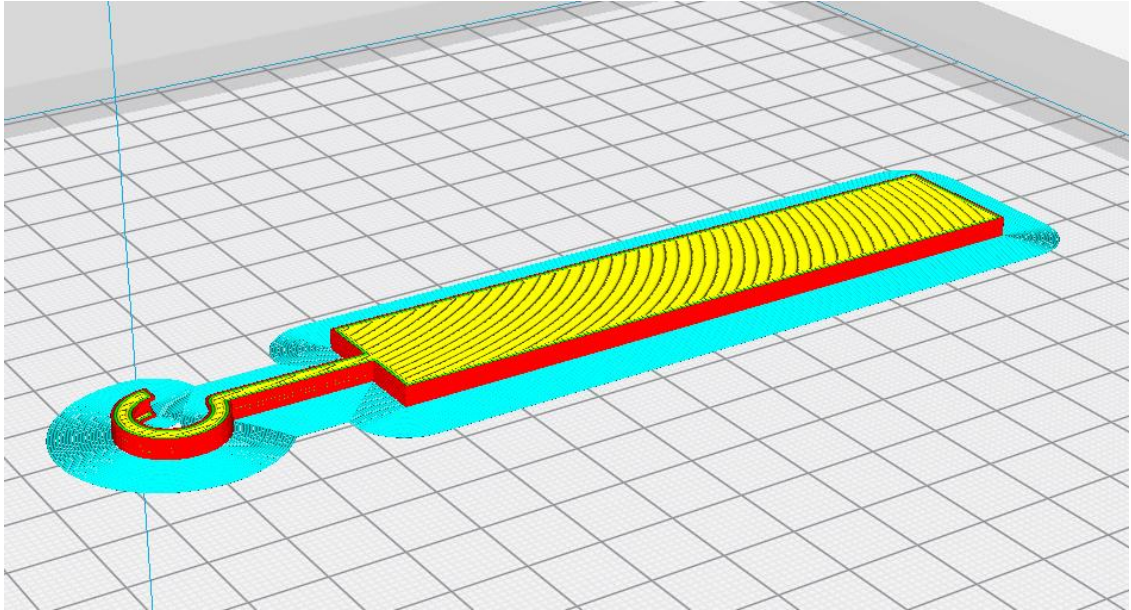
Kuva 11. Tulostetut vääntökoekappaleet.



Kuva 12. Tulostetut neliömalliset kappaleet.

Curassa kerroskorkeutena käytettiin 0,1 mm, täyttöasteena 20 % ja muut asetukset ohjelmiston suositusten mukaisesti. Kappaleet tulostettiin kuvan 13 mukaisesti vaakasuunnassa. Kuvassa syyaanin värinen rakenne viittaa kappaleen kiinnipysyvyyttä varmistavaan tukirakenteeseen, punainen viittaa kappaleen sivuseinämiin ja keltainen kappaleen pohjaan ja kattoon. Tukirakenne on 0,3 mm paksu kerros, joka on tulostettu kappaleen ensimmäisen kerroksen mukana.

Neliömallisen kappaleen tulostus kesti noin 55 minuuttia, ja vääntökoe kappaleen tulostamisessa noin 50 minuuttia.



Kuva 13. Koukullisen vääntökoekappaleen 3D-mallin viipalointi Curassa.

Ultimakerin tulostimen asetuksina ABS tulostettaessa käytettiin seuraavia parametrejä:

- suuttimen lämpötila: 260 °C
- virtaama (Flow): 97 %
- alustan lämpötila: 80 °C
- tuuletin: 50 %

Tulostettujen kappaleiden kiinnipysyvyys oli erinomainen tulostetun tuen ansiosta, eikä kappaleissa ollut silmillä havaittavia virheitä, kuten kerrosten käpertymistä ja irtoilua toisistaan. Tulostukset irrotettiin lasisesta alustasta, minkä jälkeen tukirakenteet ja sen jäänteet poistettiin veitsellä.

Vetokoekappaleita tulostettiin neljä, joista puolet oli koukuttomia ja puolet koukullisia, ja neliönmallisia kappaleita tulostettiin neljä, joista puolet oli koukuttomia ja puolet koukullisia.

Myöhemmin tulostettiin neljä ylimääräistä neliömallista koukutonta kappaletta, joille tehtiin asetonikäsittely.

### 6.3 3D-kappaleen pinnoitusprosessi

3D-tulostetut kappaleet pinnoitettiin kolmenarvoisen kromipinnoiteyhdistelmän kemikaaleilla. Kahdelle neliönmallisista kappaleista pinnoitettiin nikkelipinnoite ja yhdelle kuparipinnoite. Yhdelle nikkelipinnoitteiselle kappaleelle ei tehty etsausta, mutta muille kappaleille tehtiin. Tällä tavalla tarkasteltiin, pystyttäisiinkö kappaleet pinnoittamaan ilman etsausta niiden pinnanmuodon ansiosta. Tarkoituksena oli myös tutkia, pystytäänkö 3D-tulostettuja kappaleita yleensäkin pinnoittamaan kyseisillä kemikaaleilla. Lisäksi pinnoitettiin yksi vetokoekappale ja neliönmallinen kappale pinnoitettiin kuudenarvoisella kromipinnoiteyhdistelmällä.

### 6.4 Pinnoitettujen kappaleiden pinnoitteen tarkastelu

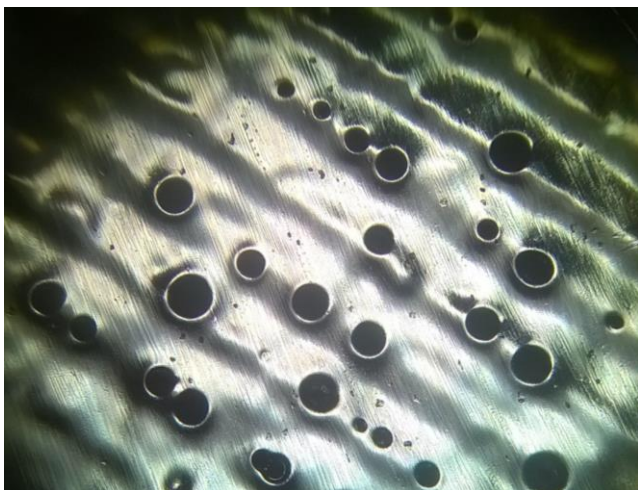
Kuvista liitteessä 2 voidaan nähdä, että nikkelillä ja kuparilla pinnoitetut etsatut kappaleet pinnoittuivat suurimmakseen osakseen pieniä alueita lukuun ottamatta. Etsaamaton kappale pinnoittui ainoastaan keskeltä hyvin heikosti, mikä osoittaa etsauksen tarpeellisuuden kunnollisen pinnoitteen saavuttamiseksi. Kromatuista kappaleista ainoastaan vääntökoekappale saatiin pinnoitettua kokonaan. Neliönmallisessa kromilla pinnoitetussa kappaleessa toinen puoli saatiin pinnoitettua täysin, mutta toisella puolella hieman yli puolet pinta-alasta jäi pinnoittumatta.

Kaikkien kappaleiden pinnoitteessa on selvästi nähtävillä 3D-tulostuksesta jääneet raitamaiset jäljet. Vaikka pinnoitusyhdistelmä pystyy tasoittamaan hieman pintaa, niin tästä huolimatta pinnanlaatu ei ole hyvä. Tämän vuoksi 3D-tulostettu kappale, joka halutaan pinnoittaa, joudutaan jälkikäsittelemään joko hiomalla epätasaisuudet, tai käsittelemään asetonilla, jos halutaan saavuttaa täysin tasainen pinta. Tulostuksen vaikutus on etenkin nähtävissä kappaleen pohjalla, jossa pinnalla on selvästi nähtävissä uria ja suomumaisia jälkiä. Kappaleiden yläpinnalla ja sivuilla kromatuissa kappaleissa pinta on hieman tasoittunut, vaikkakin niistä on yhä selvästi nähtävissä tulostuksen jäljet.

Kuparilla ja nikkelillä pinnoitetuissa kappaleissa yläpuoli on selvästi pohjaa mattapintaisempi, kun taas kromatuilla kappaleilla kiiltävyyden ero on pienempi.

Kromilla pinnoitetuissa kappaleissa on nähtävissä saostumia kappaleen kulmissa. Tältä mahdollisesti olisi voitu välttyä, jos kappaleen kulmat olisivat olleet pyöristettyjä.

Kummassakin kromilla pinnoitetussa kappaleessa on myös silmillä havaittavia pistemäisiä epäkohtia, jotka paljastuivat mikroskooppitarkastelussa mikrohuokosiksi. Mikrohuokosia havaittiin ainoastaan tulostettujen kappaleiden yläpuolella. Sivupinnoilla ja kappaleen pohjalla ei havaittu silmillä tai mikroskoopilla mikrohuokosia.



Kuva 14. Mikrohuokosia näkyvillä neliönmallisessa kappaleessa (10-kertainen suurennos).

Makrotasoituvuusominaisuuksiltaan vetokoekappaleesta tehdyssä poikkileikkauksessa voidaan nähdä, että pinnoite on ohuempi ylä- ja alapuolella. Mikrotasoituvuusominaisuuksiltaan kromatuissa kappaleissa voidaan nähdä, että pinnoiteyhdistelmä pystyy tasoittamaan hieman pinnan epätasaisuuksia, mutta melko heikosti.

Pinnoitteiden paksuutta ei pystytty mittaamaan mikroskoopilla luotettavasti, minkä vuoksi sitä ei suoritettu.

## 6.5 Pinnoitettujen kappaleiden testaus

Pinnoittamatonta vääntökoekappaletta saatiin väännettyä noin 65–70 °:n kulmaan, kunnes kappale katkesi kiinnityskohdasta. Pinnoitettu vääntökoekappale taas ei vääntynyt kuin muutamia asteita, kunnes kappale katkesi. Pinnoite ei kuitenkaan kuoriutunut pinnoitetun muovin päältä, eikä irronnut silmillä havaittavasti. Pinnoite ja muovi katkesivat yhdessä samasta kohtaa, ja pinnoittamattoman ja pinnoitetun kappaleen murtumajäljet muistuttavat hyvin paljon toisiaan.

Väännettäessä huomattiin, että pinnoitettu kappale oli selvästi pinnoittamatonta kappaletta hauraampi, mutta myös lujempi.

## 6.6 Asetonikäsittelyn testaus

Dekantterilasissa pidetty kappale oli yhteensä noin 2 tuntia ja 15 minuuttia asetonikäsitelyssä. Ensimmäisellä kerralla 25 minuutin käsittelyn jälkeen kappaleessa ei havaittu muuta, kuin pinnan muuttumista kiiltäväksi, mikä todennäköisimmin johtui kappaleen pinnan kostumisesta asetonilla. 55 minuutin jälkeen kappaleessa oli huomattavissa pientä sulautumista tulostusjäljissä. 85 minuutin jälkeen pinta oli hieman sulautuneempi kuin aikaisemmin. 110 minuutin jälkeen kappaleen pinnanlaatu oli lähes sama, kuin 85 minuutin jälkeen. Lisäksi kappaleessa havaittiin pyöristymistä kulmissa, sekä yhdessä kulmassa hieman vääntymistä. 135 minuutin jälkeen testi lopetettiin, eikä kappaleen pinnanlaadussa huomattu merkittävää muutosta.



Kuva 15. Asetonihöyryssä pidetty kappale jälkeen (vas) ja ennen (oik.).

Dekantterilasissa pidetty kappale oli testin lopussa pinnanlaadultaan hieman parempi, mutta kappaleessa esiintyi pientä vääntymää yhdessä kulmassa, sekä yläpuoli oli tasaantunut ainoastaan pieneltä alueelta tasaiseksi. Kappaleen alapuoli oli hieman tasoituneempi tulostuksen jäljistä, mutta pinnalla oli myös havaittavissa uusia epätasaisuuksia. Kappaleen sivuilla ei näkynyt tulostuksen muodostamia kerroksia, mutta sivut olivat kokonaisuudessaan myös hieman pyöristyneitä. Lisäksi kappaleen kulmat eivät enää olleet yhtä kulmikkaita, sekä silmukka oli selvästi epämuodostunut.

Asetoniin upotetuista kappaleista viisi sekuntia upoksissa ollessa kappaleessa havaittiin pinnanlaadun paranemista hieman, mutta tulostusjäljet olivat vielä selvästi nähtävissä. Kappaleessa ei havaittu vääntyilyä tai muita virheitä, joita asetonikäsittely olisi voinut aiheuttaa. 15 ja 30 sekuntia upoksissa olleet kappaleet olivat tasaantuneet pinnanlaadultaan. Yläpuolella oli havaittavissa pieniä pistemäisiä kohtia ja uria, joissa kappale ei ollut tasoittunut, mutta samalla myös kappaleiden pinnalle muodostui uusia epätasaisuuksia. Kummankin kappaleen alapuoli oli myös parantunut, vaikkakin tasoittamattomia uria oli yhä nähtävissä, sekä pinnalle oli muodostunut epätasaisuuksia. Kaikissa kolmessa kappaleessa sivut olivat tasaantuneet, eikä niissä ollut nähtävissä tulostuksen jälkiä. Epämuodostumat ovat voineet johtua kappaleiden irtiottovaiheessa tulostusalueesta, koska irrotettaessa 30 sekuntia upotetussa kappaleessa alapuolella havaittiin pientä murtumaa kerrosten välillä. 15 sekuntia upotuksissa ollut kappale oli myös hyvin jäykästi kiinni tulostusalueella.

## **7 Kokeellisen osuuden tulosten analysointi**

### **7.1 Kokeellisen osuuden pohdintaa**

Kokeellisessa osuudessa saavutettiin osa halutuista tavoitteista, mutta pinnoitettujen kappaleiden määrä tekee kokeellisesta osuudesta epätarkan. Lisäksi osaa suunnitelluista testeistä ei saatu toteutettua. Kuitenkin kokeissa saatiin todistettua, että 3D-tulostettuja muovikappaleita pystytään pinnoittamaan elektrolyytisesti. Lisäksi pystyttiin todistamaan, että pinnoitteen kiinnipysyvyys on suhteellisen hyvä sekä riittävä käytännössä.

### **7.2 Asetonijälkikäsittely**

Asetonilla jälkikäsittelyllä ei saatu tasaisia tulosteita, minkä vuoksi voidaan todeta, että asetonikäsittely ei ole sopiva jälkikäsittelymenetelmä.

Testissä huomattiin, että asetonikäsittely toimi suhteellisen hyvin kerrosten (sivujen) tasoittajana, mutta ei niinkään ylä- ja alapuolilla. Koska kappaleen kerrokset oli tulostettu 0,1 mm:n tarkkuudella, niin tällöin kerrosten jäljet tasoittuivat paremmin, kun taas ylä- ja

alapohjien kerrokset oli valmistettu 0,3 mm:n tarkkuudella, mikä vaikeutti käsittelyn toimivuutta. Mahdollisesti konkreettisimmilla kappaleilla, joissa ylä- ja alapohjien pinta-ala on pienempi ja sivujen on suurempi, oltaisiin voitu saada paremmin testattua käsittelyn toimivuutta.

Ongelmana oli kuitenkin lähinnä kappaleiden vääntyily ja epämuodostumat, jotka tekevät menetelmästä toimimattoman. Tulostettujen kappaleiden vääristymiseen on saattanut vaikuttaa seinämien paksuus, jota lisäämällä oltaisiin mahdollisesti voitu vähentää vääristymistä. Seinämien paksuuden lisääminen taas voi vaikuttaa kappaleen epätasaiseen jäähtymiseen, mikä taas voi aiheuttaa kerrosten vääntyilyä, jolloin kerrokset voivat irrota toisistaan.

### 7.3 Vääntökoe testi

Vääntökoetestissä voidaan havaita, että pinnoitteen kiinnipysyvyys on riittävän kestävä väännettäessä eikä pinnoite ala irrota ennen kuin itse muovi on haljennut. Testattaessa huomattiin, että pinnoite parantaa selvästi kappaleen lujuutta, mutta huononsi sen sitkeyttä merkittävästi. Pinnoittamaton kappale saatiin väännettyä noin 60–70 °:n kulmaan, kun taas pinnoitettu kappale saatiin väännettyä noin 5 °:n kulmaan. Kuvat kappaleista liitteessä 3.

Todellista syytä pinnoitettujen kappaleiden sitkeyden alenemiseen ja lujuuden paraneamiseen on hankala sanoa, mutta suurimmalla todennäköisyydellä se johtuu metallisesta pinnoitteesta. Mahdollista on myös se, että pinnoituskemikaalit ovat vaikuttaneet muovin ominaisuuksiin.

### 7.4 Kappaleiden pinnoituksen visuaalinen tarkastelu

Kromilla pinnoitetuissa kappaleissa (liite 2) ei ollut pinnoitteissa muita ongelmia, kuin mikrohuokokset, pinnoittumattomat alueet, sekä saostumat kappaleiden kulmissa. Kromatuissa kappaleissa on yhä näkyvissä 3D tulostuksen jäljet, mutta jäljet ovat kuparoituja ja nikkelöityjä kappaleita paremmin tasoittuneita. Kuparilla ja nikkelillä pinnoitetut kappaleet (liite 2), jotka oltiin etsattu, olivat myös pinnoittuneet suhteellisen hyvin, vaikkakin molemmissa kappaleissa voidaan yhä nähdä tulostuksen aiheuttamaa kuviointia,

sekä paikoittaista pinnoittumattomuutta. Pohjan ja yläpinnan erona voidaan huomata myös, että pohja on selvästi kiiltävämpi, kun taas yläpinta on selvästi himmeämpi. Tämä voi johtua siitä, että pohjalla on selvästi tasaisempia alueita, koska tulostuksessa pohja on painautuneena koko ajan tulostusalustalle, kun taas yläpinta ei pääse tasoittumaan missään vaiheessa samanlailla.

**Taulukko 2. Pinnoitettujen kappaleiden pinnoittuvuus, sekä visuaalinen tarkastelu.**

	Pinnoit- tuvuus	Kommentit
Testikappale 1a	n. 90 %	Pinnoite ulkonäöltään hyvä, mutta paikoittainen sävyeroja yläpuolella. Yläpuoli ei myöskään ole yhtä kiiltävä, kuin alapuoli. Tulostusjäljet selvästi näkyvissä sivuilla, sekä ylä- ja alapuolella.
Testikappale 1b	n. 95 %	Pinnoite ulkonäöltään erinomainen, eikä sävyeroja ole lähes ollenkaan. Kiilto on myös lähes sama koko kappaleessa. Tulostusjäljet selvästi näkyvissä koko kappaleessa
Testikappale 1c	n. 70 %	Pinnoite ulkonäöltään huono. Vaikka kappale on pinnoittunut suurimmakseen osakseen, niin pinnoitteen ulkonäkö on kokonaisuudessaan hyvin matta, sekä sävyeroja on näkyvissä kaikkialla. Kappale on lähinnä pinnoittunut ylä- ja alapuolelta, mutta sivut ovat lähestulkoon pinnoittumattomia, muutamia pieniä alueita lukuun ottamatta. Tulostusjäljet ovat selvästi näkyvissä koko kappaleessa.
Testikappale 2a	n. 75 %	Pinnoite ulkonäöltään erinomainen, lukuun ottamatta pinnoittumattomia alueita ja mikrohuokosia. Kiilto ja sävy ovat yhtäläisiä kaikkialtaan. Tulostuksen jäljet ovat sivuilta lähes kokonaan tasaantuneita, sekä hieman tasaantuneita ylä- ja alapuolilta. Kappaleessa on myös saostumakohtia kappaleen kulmissa.
Testikappale 2b	n. 100 %	Pinnoite ulkonäöltään erinomainen mikrohuokosia lukuun ottamatta. Kappale on täysin kokonaan pinnoittunut, eikä kappaleessa ole saostumia kulmissa. Tulostusjäljet ovat tasoittuneet yhtä paljon, kuin kappaleessa 2a. Myös 2b:ssä on näkyvissä mikrohuokosia yläpuolella. Sävy ja kiilto ovat yhtäläiset 2a:n kanssa.

Mikroskooppikuvista (liite 4) voidaan huomata, että pinnoitteessa on runsaasti mikrohuokosia. Mikrohuukokset voivat mahdollisesti johtua pinnalla olleesta liasta, kappaleen pinnan epätasaisuuksista tai pinnoitusvaiheessa muodostuneista vetykuplista, jotka ovat estäneet pinnoittumisen paikoittain. Mikroskooppikuvista voidaan myös huomata se, että vääntökoekappaleen pinnoite on hieman paksumpi kappaleen sivuilla ja kulmissa, kun taas kappaleen ylä- ja alapuolella sen paksuus on hieman ohuempi.

Pinnoitteen tasaisuutta voitaisiin myös parantaa pinnoittamalla 3D-tulostettu kappale paksummalla autokatalyyttisellä pinnoitteella, mutta ongelmana tällöin olisi kappaleen

kokonaishinnan kasvaminen, jolloin taloudellisuus kärsisi. Lisäksi liian paksut pinnoitekerrokset voivat aiheuttaa uloimman pinnoitekerroksen halkeilua lämpötilojen vaihdellessa.

Vaikka visuaalisesti kappaleet eivät välttämättä näytä edustuskelpoisilta, kuitenkin on otettava huomioon, että pinnoituslinjoilla käytetään usein tiettyä muovilaatua, joka on optimoitu pinnoitettavaksi. Testeissä käytettyjä tulostusfilamentteja ei oltu suunniteltu pinnoitettavaksi metallisilla pinnoitteilla, eikä kyseisiä pinnoituskylpyjä oltu suunniteltu käytettäväksi tulostusfilamentteja varten.

## 8 Yhteenveto

Työllä pyrittiin selvittämään muovin 3D-tulostuksen ja metallilla pinnoituksen yhteensopivuutta pintakäsittelylinjastolla, sekä mitä muoveja pystytään pinnoittamaan ja 3D-tulostamaan. Lisäksi selvitettiin koko linjaston täysautomatisointia, ja tutkittiin pinnoitettuja 3D-tulostettuja kappaleita.

Työssä saatiin selvitettyä, että 3D-tulostettavia muoveja, joita pystytään pinnoittamaan metallilla elektrolyyttisesti, ovat ABS, ABS/PC ja PA, joista FDM-menetelmällä pystytään tulostamaan kaikkia kyseisiä muoveja, ja SLS-menetelmällä ainoastaan PA:ta.

3D-tulostuksesta osana pintakäsittelylinjastoa saatiin selvitettyä, että se parantaisi huomattavasti tuotteiden valmistuksen joustavuutta, uuden tuotteen valmistuksen aloituksen nopeutta ja lisäisi asiakkaiden kiinnostusta hyvin pienten tuotantomäärien edullisen hinnan vuoksi. 3D-tulostus toimii parhaiten, kun halutaan tuottaa pieniä määriä useaa eri tuotetta. Suurien erien tuotantoon menetelmä ei välttämättä ole sopivin. Vaikka yhden kappaleen tulostus kestää suhteellisen pitkään, niin tästä huolimatta tuotantoa voidaan parantaa lisäämällä tulostimien määrää. 3D-tulostimilla harvemmin tulee tuotantotilauksia, koska tulostimien koot eivät ole läheskään yhtä suuria, kuin esimerkiksi ruiskupuristuslaitteet.

Tuotantolinjaston täysautomatisointia on hyvin hankala toteuttaa, koska tulostimia ei varsinaisesti ole suunniteltu sitä varten. Periaatteessa se kuitenkin on mahdollista, mutta

käytännössä sen toteuttaminen olisi hyvin haastavaa. Vika tilanteissa se johtaisi tuotannon keskeytymiseen tai virheellisiin tuotteisiin. Joka tapauksessa linjastolla täytyisi olla joku, joka valvoo tuotteiden oikeanlaista tulostumista.

Koeosuudessa havaittiin, että 3D tulostetun kappaleen pinnoitus on mahdollista, ja itse pinnoitteen kiinnipysyvyys tulostetussa kappaleessa on tarpeeksi vahva. Asetonikäsittelyn testauksessa saatiin hieman parannettua tulostettujen kappaleiden ulkonäköä, mutta kappaleissa havaittiin myös negatiivisia vaikutuksia käsittelyn johdosta. Asetonikäsittelyprosessi ei selvästi ole toimiva jälkikäsittelymenetelmä 3D-tulostetuille kappaleille. Parhaiten tulostusjäljistä päästäisiin tulostamalla kappaleet mahdollisimman pienellä kerroskoolla, ja käyttämällä mahdollisimman pientä tulostussuutinta. Tämä kuitenkin tarkoittaisi tulostusaikojen kasvua.

Piirilevyjen pinnoittaminen kappaleille on periaatteessa mahdollista toteuttaa, mutta sen käytännöllisyyttä ja toimivuutta olisi hyvä testaa käytännössä.

Työssä jäi toteuttamatta pinnoitepaksuuden mittaus, sekä asetonikäsitteltyjen kappaleiden pinnoitus ja testaus.

**Taulukko 3. Testien yhteenveto.**

Testi	Yhteenveto
Asetoni höyry	Kappaleen muoto ja dimensiot muuttuneet hieman. Tulostuksen jäljet tasoittuneet hieman. Liian pitkä kesto, sekä kappaleen vääristyminen tekevät menetelmästä epäkäytännöllisen. Ainoastaan sivut ovat tasoittuneet, mutta myös samalla pyöristyneet.
Asetoniin upotus 5s	Kappaleen muoto ja dimensiot pysyneet samoina, mutta tulostuksen jäljet eivät ole tasoittuneet lähes ollenkaan.
Asetoniin upotus 10s	Kappaleen kulmat ovat vääntyneet hieman, sekä ala- ja yläpuolilla kehittynyt virheitä asetonikäsittelyn johdosta. Tulostuksen jäljet hieman tasoittuneet, mutta vielä selvästi nähtävissä.
Asetoniin upotus 15s	Kappaleella sama tilanne, kuin 10s upotettuna olleella. Tulostuksen jäljet eivät ole kovinkaan paljon parempia, ja kappaleessa muodostunut virheitä asetonikäsittelyn johdosta. Asetoniin upotus ei selvästi ole toimiva metodi.
Vääntökoe	Pinnoite ja muovi katkenneet samaan aikaan. Sitkeys selvästi huonompi pinnoitetussa kappaleessa, mutta samalla lujuus on selvästi parempi. Pinnoittamaton kappale katkennut noin 60 - 70 ° kulmassa, kun taas pinnoitettu noin 5° kulmassa.
Visuaalinen tarkastelu	Etsaus selvästi vaaditaan, jotta voidaan saavuttaa hyvin pinnoittunut kappale. Tulostusjälkien näkyvyys on hieman tasoittunut kromatuissa kappaleissa, mutta muissa kappaleissa ne ovat vielä täysin selvästi nähtävissä, eikä merkittävää muutosta ole juuri lainkaan. Kappaleet ovat pinnoittuneet suhteellisen hyvin, vaikka pinnoituslinjastoja ei oltu optimoitu kyseisille kappaleille.

Tutkimuksen jatkoksi voitaisiin tutkia parhaiten pinnoitukseen sopivia kaupallisia 3D-tulostusmateriaalin valmistajan materiaaleja ja tutkia, mikä niistä sopisi parhaiten pinnoitukseen. Virtapiirien tulostuksen toteuttamista voitaisiin myös kokeilla esimerkiksi tulostamalla kappaleeseen maski muovilaadulla, joka kestää pinnoituskemikaaleja eikä pinnoitu niiden vaikutuksesta. Pinnoitettaville muoveille voitaisiin myös tehdä testejä, joissa tutkitaan pinnoituskemikaalien vaikutusta pinnoitettavien muovien ominaisuuksiin, kuten lujuuteen sitkeyteen haurauteen tai dimensioiden muutoksiin.

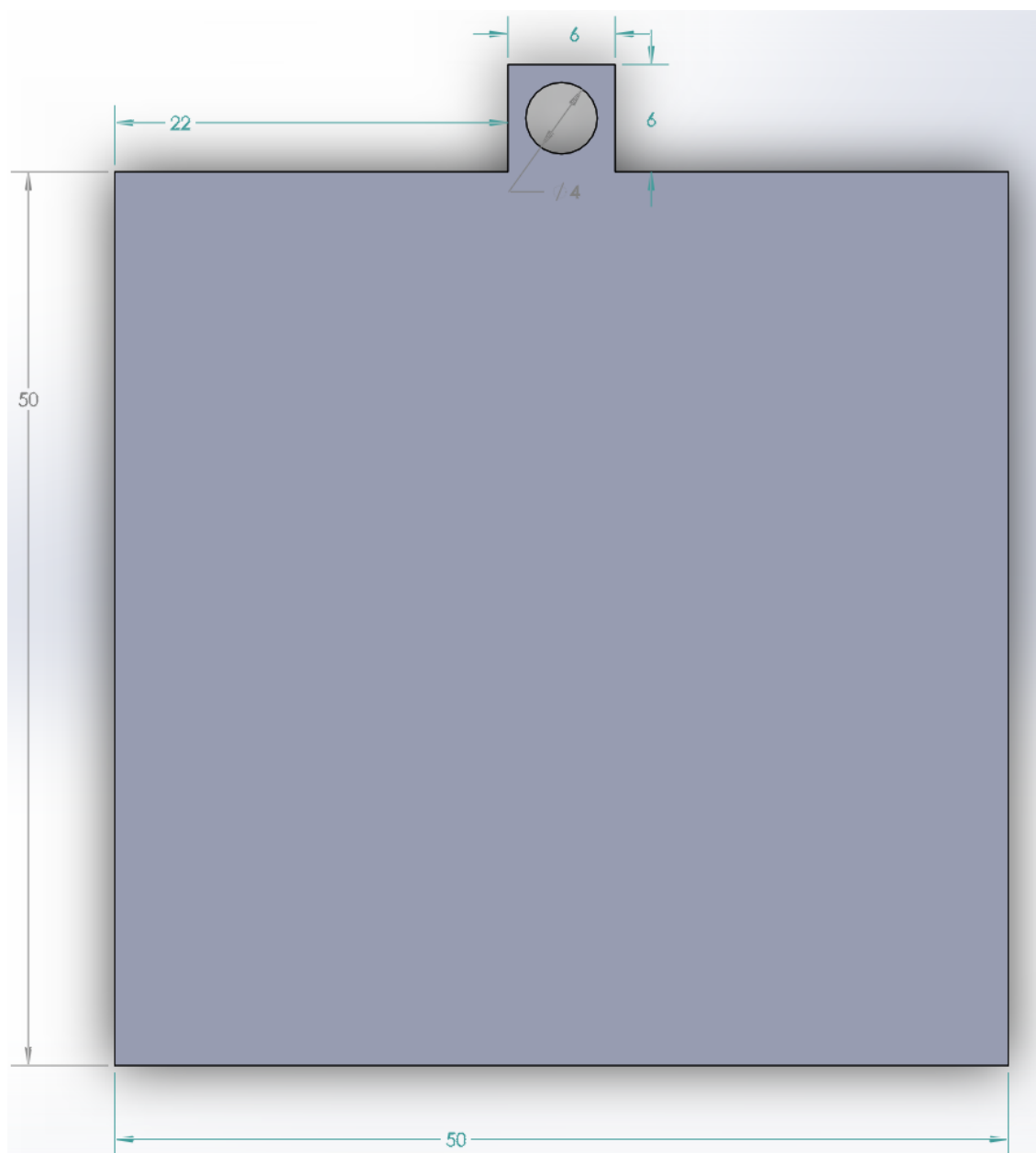
## Lähteet

- 1 Gibson, Ian; Rosen, David & Stucker, Brent. 2015. Additive Manufacturing Technologies. New York: Springer.
- 2 Hausman, Kalani Kirk & Horne, Richard. 2014. 3D Printing For Dummies. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- 3 What is slicing software, and what does it do? 2016. Verkkoaineisto. GoPrint3D. <<https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>>. Luettu 22.3.2018
- 4 Finishing processes. 2018. Verkkoaineisto. Stratasys. <<http://www.stratasys.com/solutions/finishing-processes/smoothing-fdm-parts>>. Luettu 16.8.2018.
- 5 What is 3D printing? 2018. Verkkoaineisto. 3D Printing. <<https://3dprinting.com/what-is-3d-printing/>>. Luettu 18.3.2018.
- 6 Fused filament fabrication. 2016. Verkkoaineisto. RepRap <[reprap.org/wiki/FFF](http://reprap.org/wiki/FFF)>. Luettu 10.4.2018
- 7 The impact of layer height on a 3D Print. 2018. Verkkoaineisto. 3D Hubs. <<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/impact-layer-height-3d-print>>. Luettu 3.4.2018.
- 8 Everything You Need To Know About Polylactic Acid (PLA). 2015. Verkkoaineisto. Creative Mechanisms. <<https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>>. Luettu 3.4.2018.
- 9 Everything You Need To Know About ABS Plastic. 2015. Verkkoaineisto. Creative Mechanisms. <<https://www.creativemechanisms.com/blog/everything-you-need-to-know-about-abs-plastic>>. Luettu 3.4.2018.
- 10 The Ultimate Guide to Stereolithography (SLA) 3D printing. 2018. Verkkoaineisto. Formlabs. <<https://formlabs.com/blog/ultimate-guide-to-stereolithography-sla-3d-printing/>>. Luettu 5.4.2018.
- 11 FDM vs SLA: 3D Printing Explained and Compared. 2015. Verkkoaineisto. All3DP. <<https://all3dp.com/fdm-vs-sla/>>. Luettu 5.4.2018.
- 12 20 Best Resin (SLA/DLP) 3D Printers 2018. 2018. Verkkoaineisto. All3DP. <<https://all3dp.com/1/best-resin-dlp-sla-3d-printer-kit-stereolithography/>>. Luettu 5.4.2018.
- 13 Direct Metal Laser Sintering. 2018. Verkkoaineisto. Protolabs. <<https://www.protolabs.co.uk/services/3d-printing/direct-metal-laser-sintering/>>. Luettu 25.5.2018.

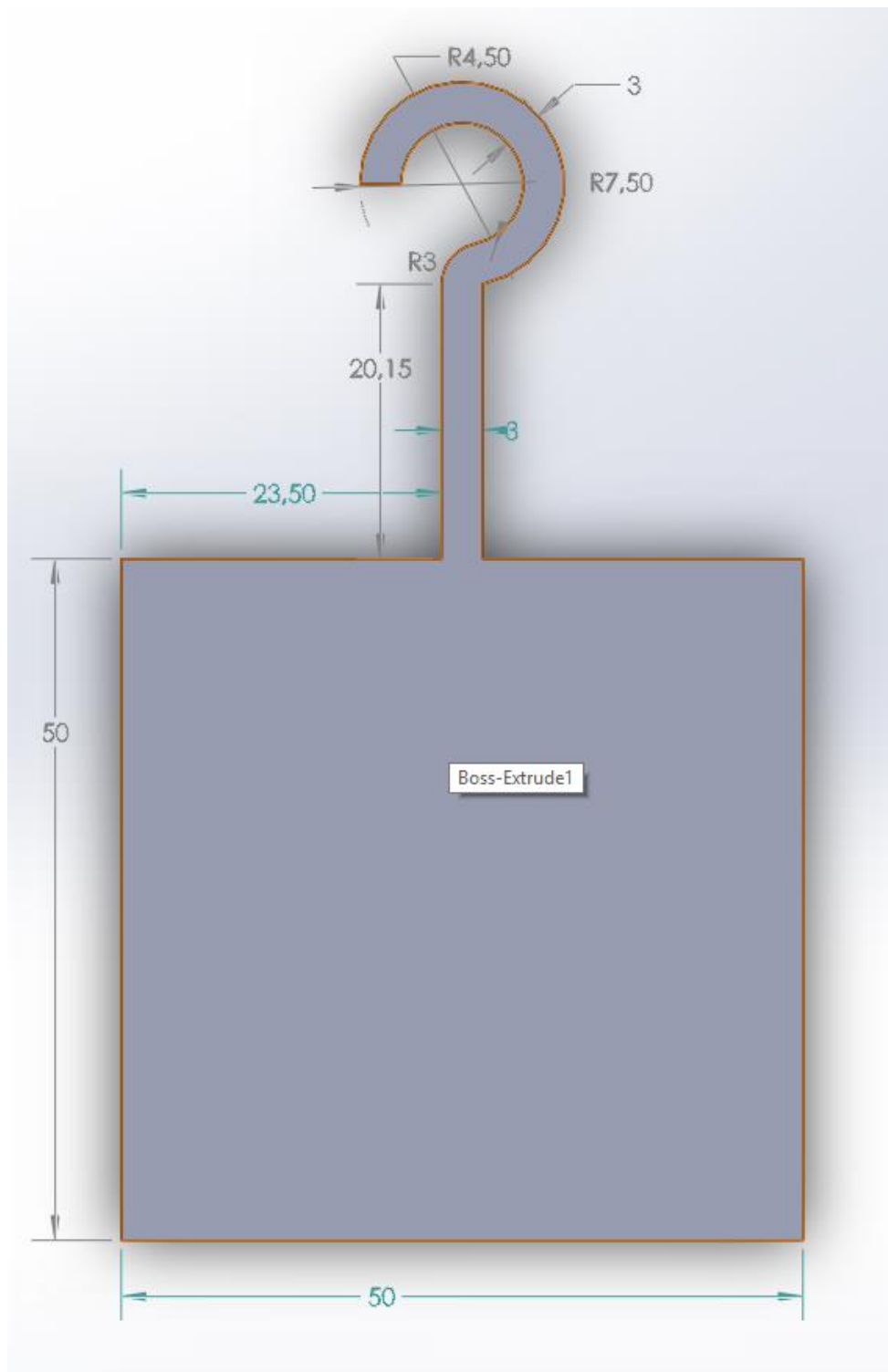
- 14 Kanani, Nasser. Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice. 2004. Oxford, UK: Elsevier Ltd.
- 15 Schlesinger, Mordechai & Paunovic, Milan. Modern Electroplating. 2011. New Jersey: John Wiley & Sons.
- 16 Electroplating on plastics. 2018. Verkkoaineisto. Sharrets Plating Company. <<http://www.sharrettsplating.com/base-materials/plastics>>. Luettu 2.3.2018
- 17 Suomen Galvanotekninen Yhdistys. 1996. Kemiallinen ja Sähkökemiallinen pinta-käsittely Osa I. Vantaa: Tummavuoren kirjapaino Oy.
- 18 Lawrence J., Durney. 1984. Electroplating Engineering Handbook Fourth Edition. New York: Van Nostrand Reinhold Company Inc.
- 19 Brandes, Mariola & Fels, Carl Christian. 2008. Reliable Pretreatment of Polyamide (PA) Substrates. Metal Finishing. Vuosikerta 106, Numero 6. s.22.
- 20 PA (Polyamide) Electro-plating Process. 2018. Verkkoaineisto. Winstar Chemicals. <<http://winstarchemhk.com/products/plastic-plating-process/pa-polyamide-electro-plating-process/>>. Luettu 3.5.2018.
- 21 Plating on plastics / decorative coatings. 2018. Verkkoaineisto. Atotech. <<https://www.atotech.com/decorative-coatings/>>. Luettu 3.5.2018.
- 22 Panda, Himadri. 2017. Handbook on Electroplating with Manufacture of Electrochemicals. 2017. Asia Pacific Business Press Inc.
- 23 Electroplating with FDM Masters. 2018. Verkkoaineisto. Stratasys. <<http://www.stratasys.com/solutions/finishing-processes/electroplating>>. Luettu 3.5.2018.
- 24 Ultimaker 2 Extended Käyttöopas. 2018. Verkkoaineisto. Ultimaker. <<https://ultimaker.com/download/7609/UserManual-UM2Extended-v2.1-FIN.pdf>>. Luettu 25.5.2018.

### 3D mallien mittakuvat

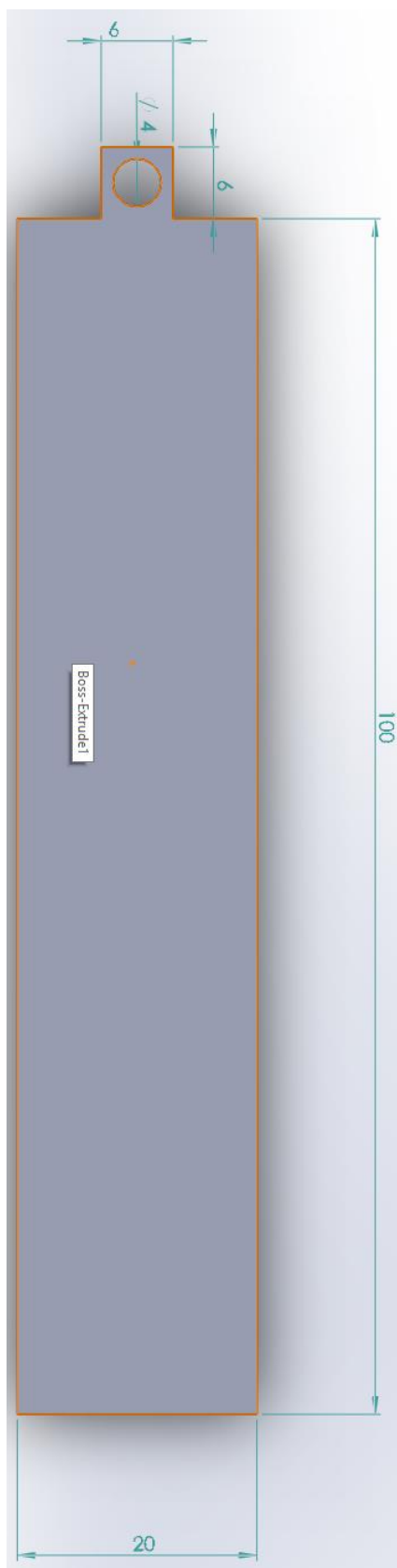
Mitat millimetreinä



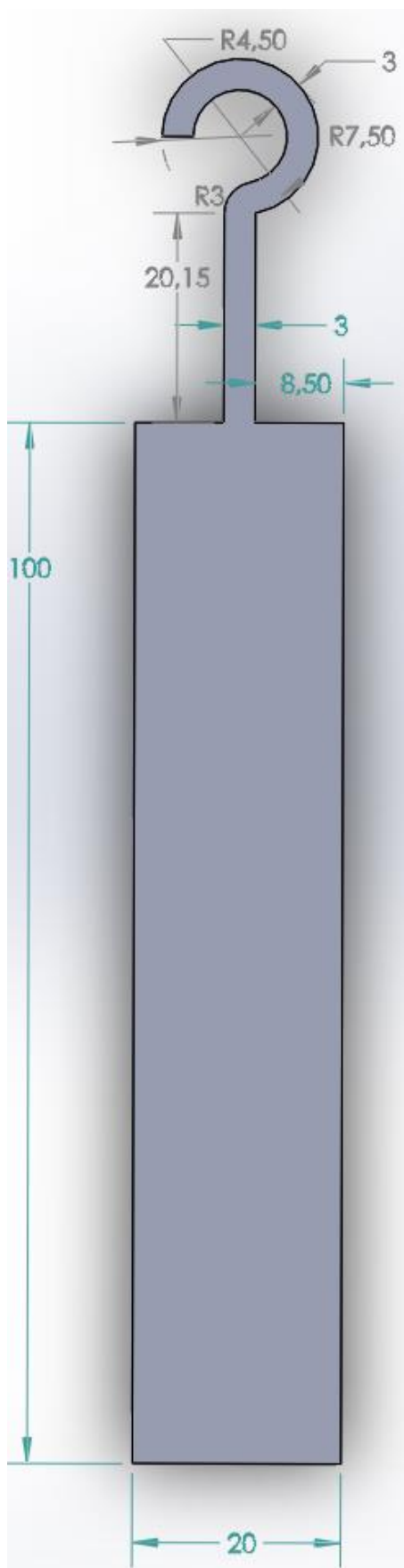
Neliö kappale ilman koukkua.



Neliö kappale koukulla.

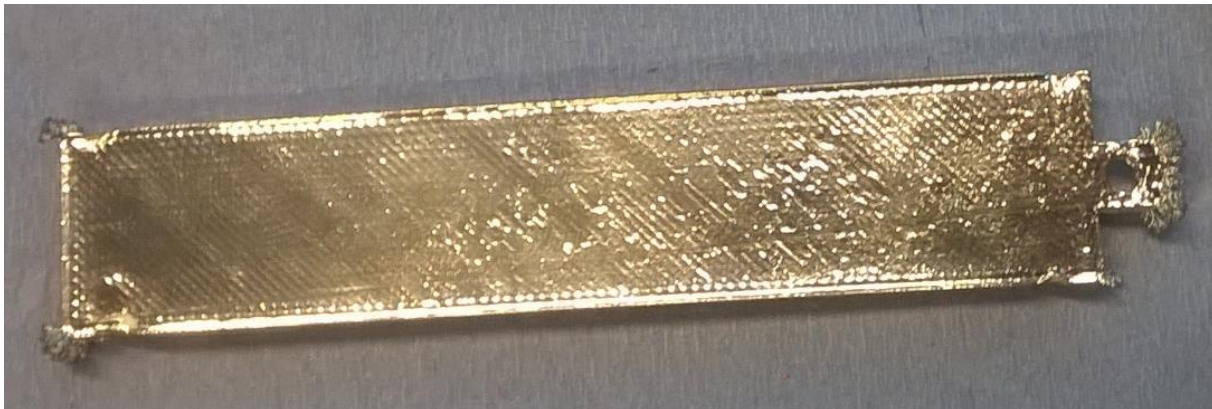


Vääntökoe kappale ilman koukkua.



Vääntökoekappale koukulla.

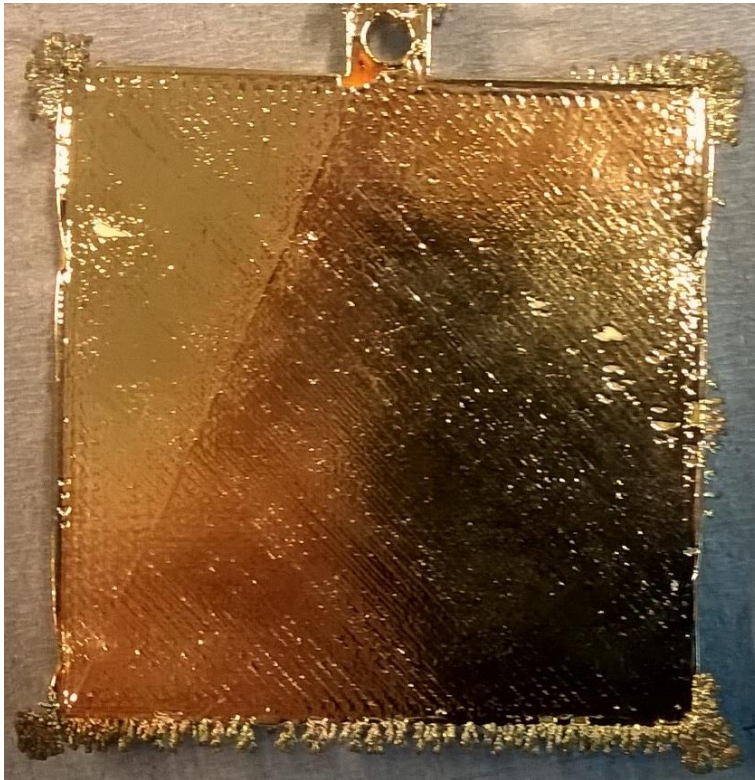
**Pinnoitetut 3D tulostetut kappaleet**



Testikappale 2b, kromilla pinnoitettu vääntökoekappale, yläpuoli.



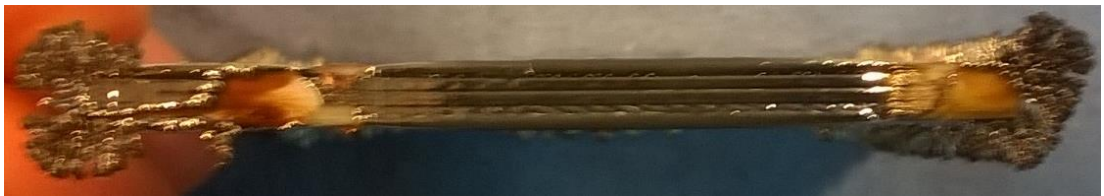
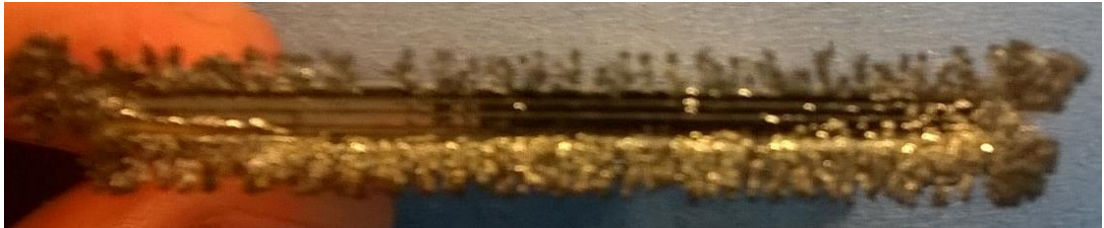
Testikappale 2b, kromilla pinnoitettu vääntökoekappale, alapuoli.



Testikappale 2a, kromilla pinnoitettu neliönmallinen kappale, yläpuoli.



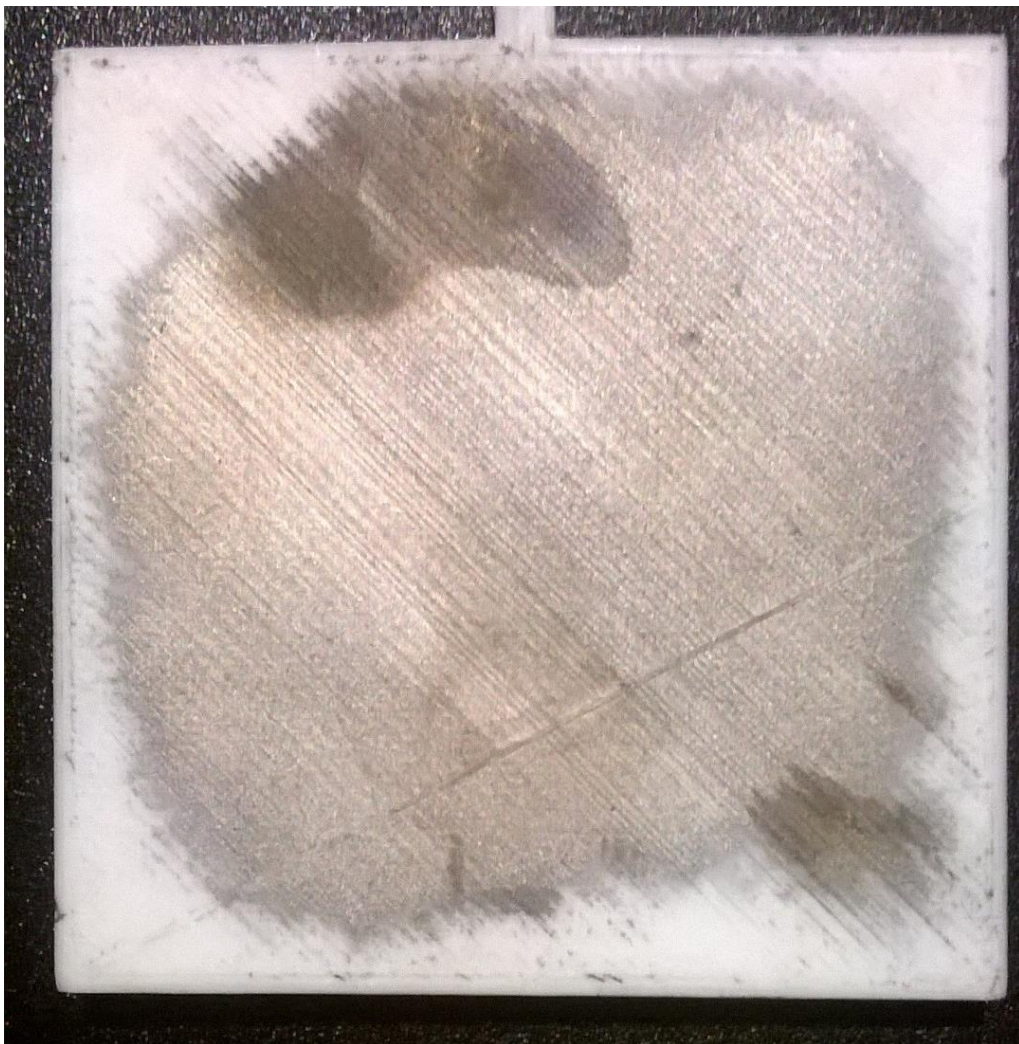
Testikappale 2a, kromilla pinnoitettu neliönmallinen kappale, alapuoli.



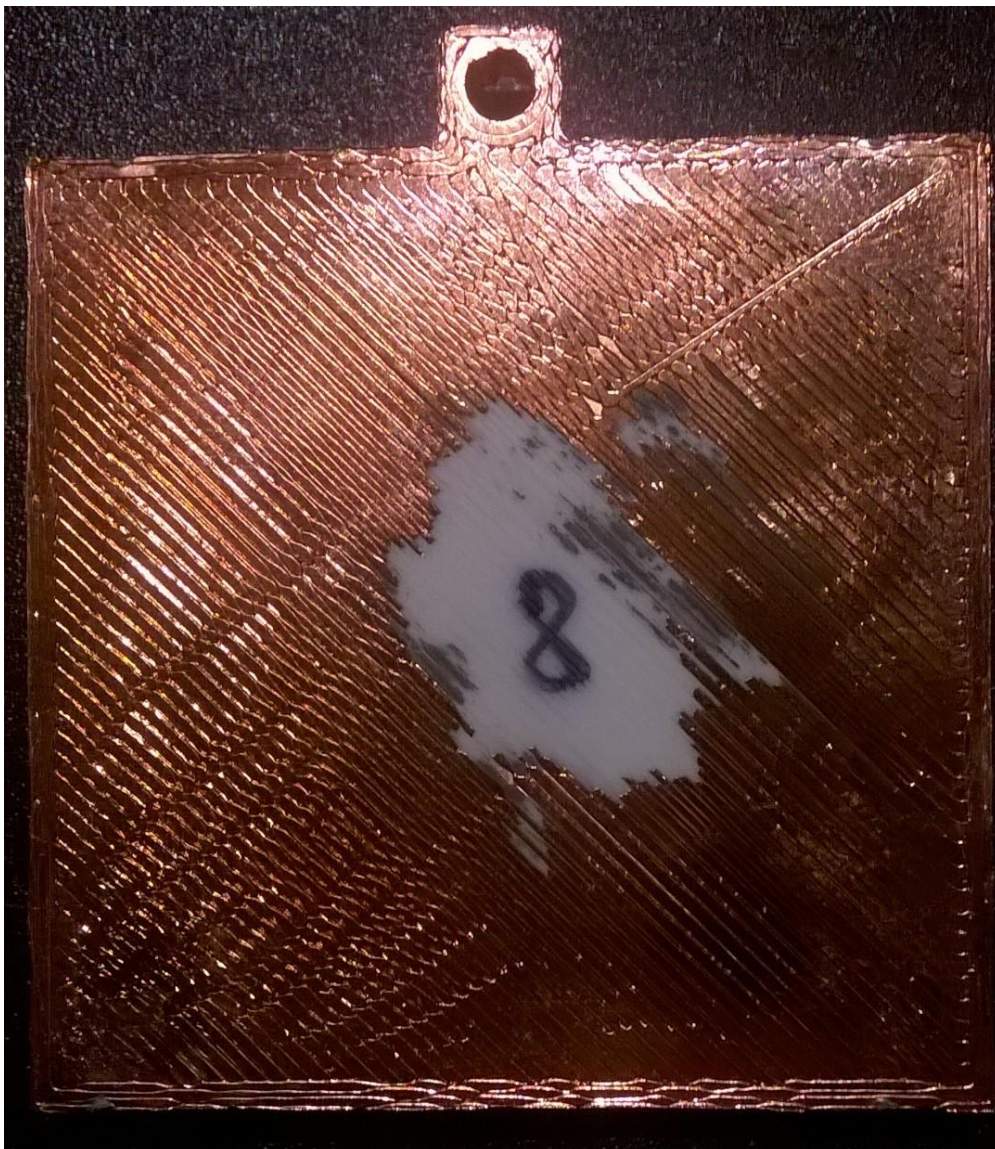
Testikappale 2a, kromilla pinnoitettu neliönmallinen kappale, sivuilta.



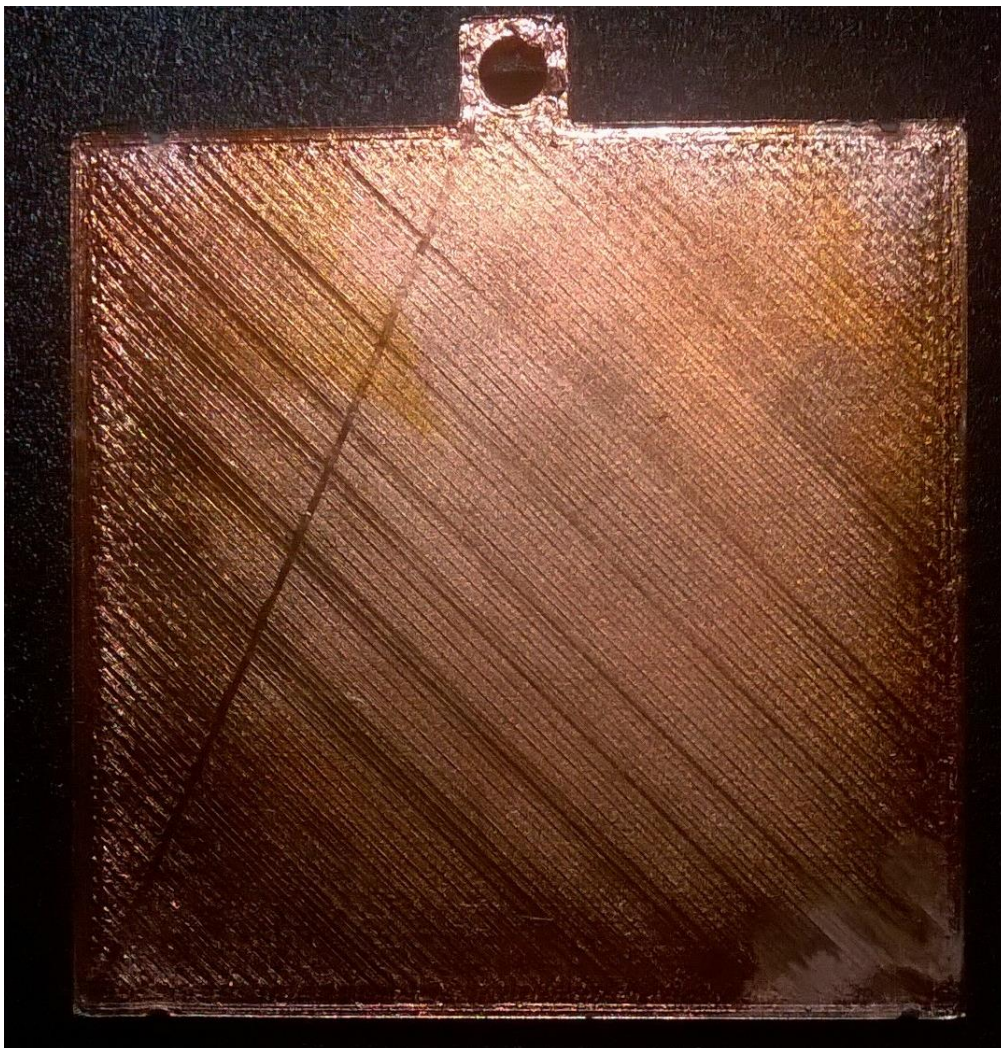
Testikappale 1c, kemiallisella nikkelillä pinnoitettu etsaamaton kappale, alapuoli.



Testikappale 1c, kemiallisellanikkelillä pinnoitettu etsaamaton kappale, yläpuoli.



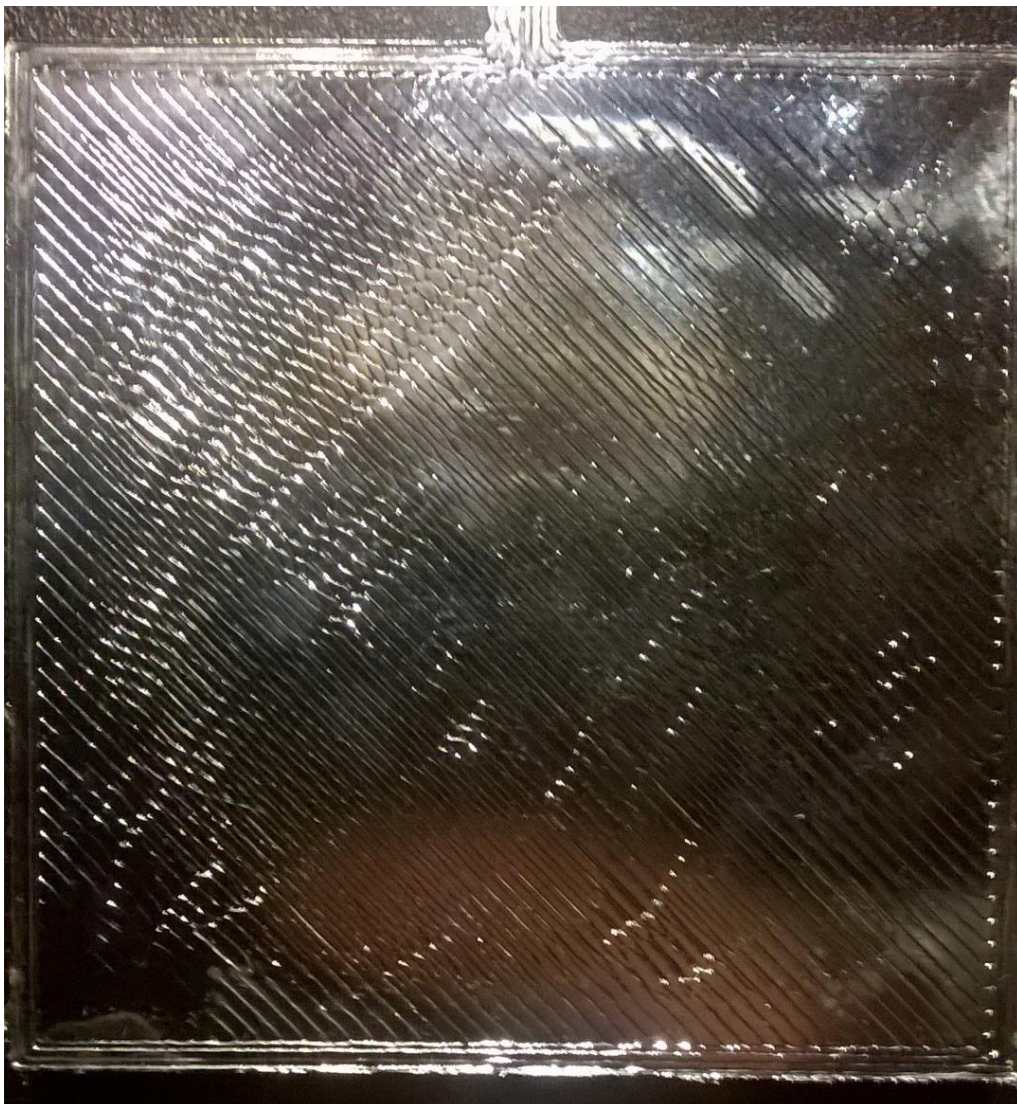
Testikappale 1a, kemiallisella kuparilla pinnoitettu etsattu kappale, alapuoli.



Testikappale 1a, kemiallisella kuparilla pinnoitettu etsattu kappale, yläpuoli.



Testikappale 1b, kemiallisella nikkelillä pinnoitettu etsattu kappale, yläpuoli.



Testikappale 1b, kemiallisella nikkelillä pinnoitettu etsattu kappale, alapuoli.

### Vääntötesti kuvat



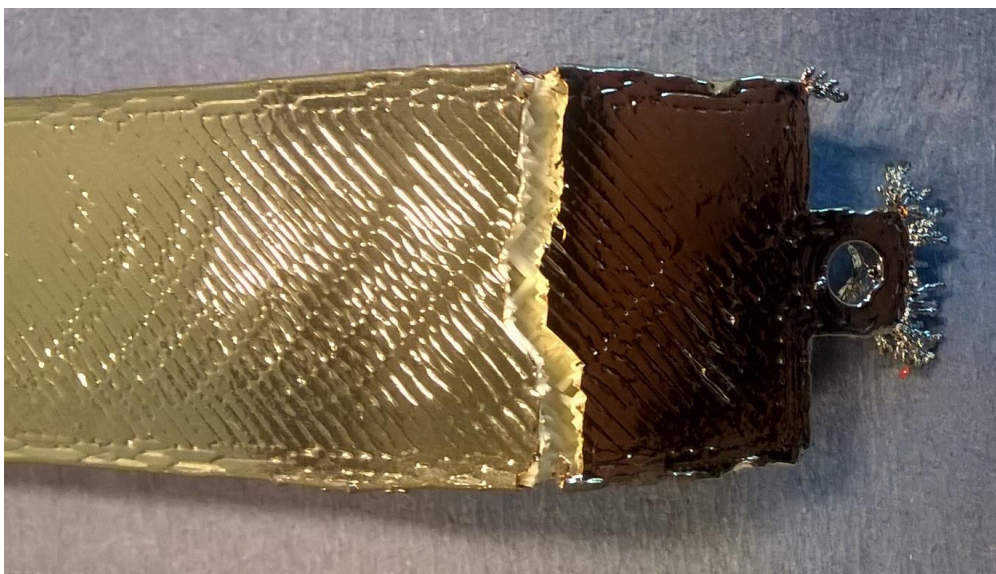
Vääntökoe, pinnoittamaton kappale juuri ennen katkeamista.



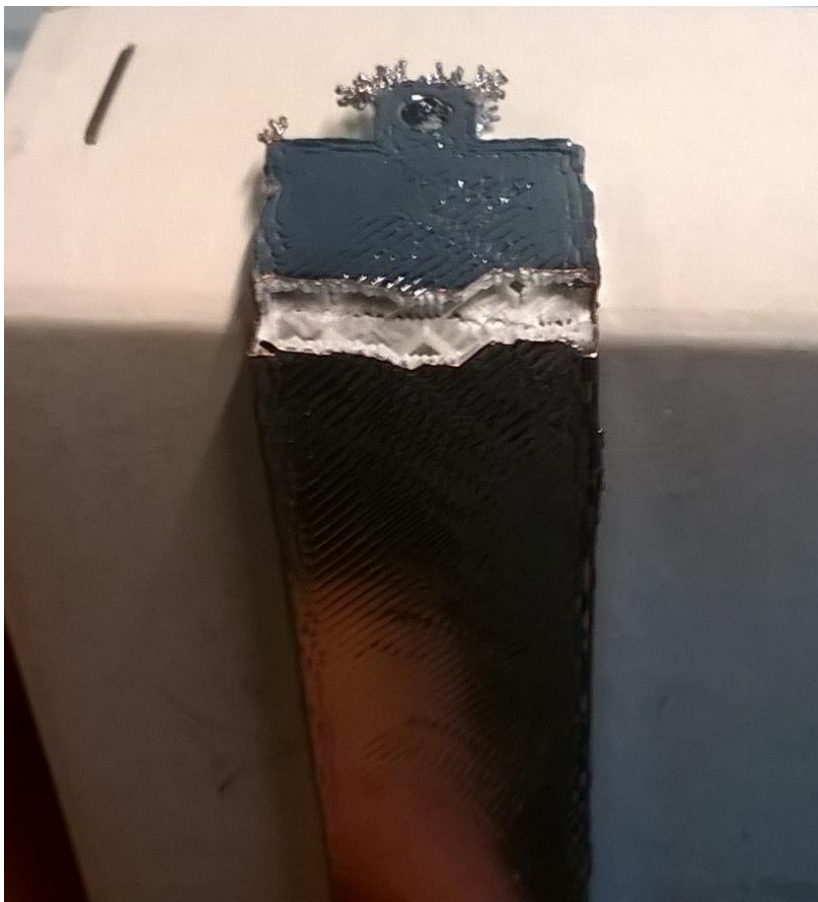
Testikappale 2b, kromilla pinnoitettu vääntökoekappale juuri ennen katkeamista.



Pinnoittamaton kappale katkeamisen jälkeen.

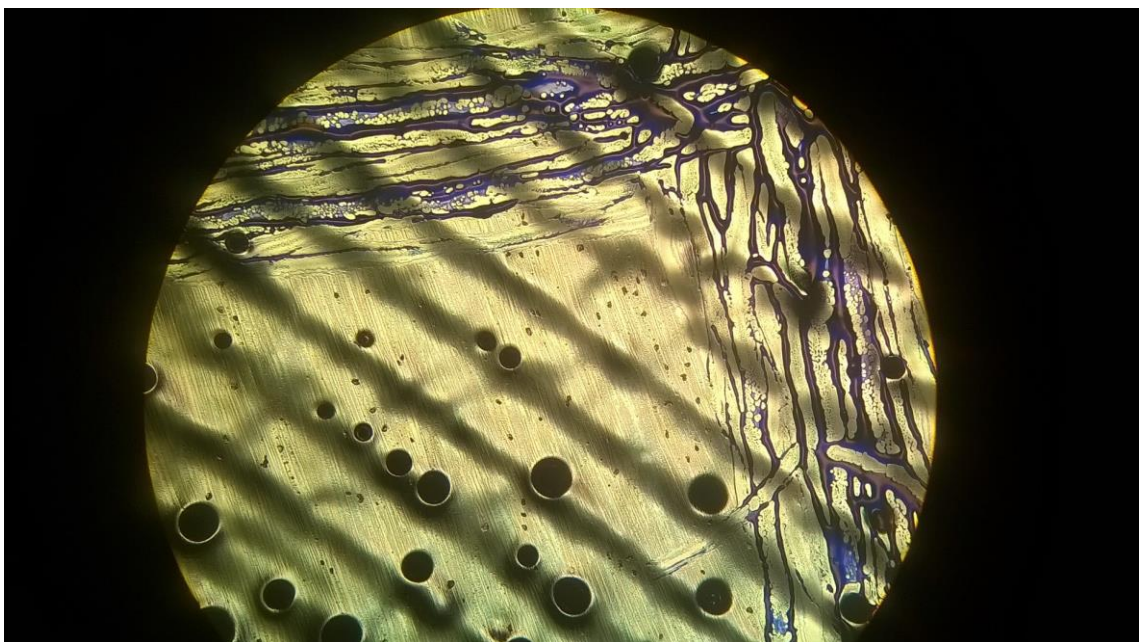
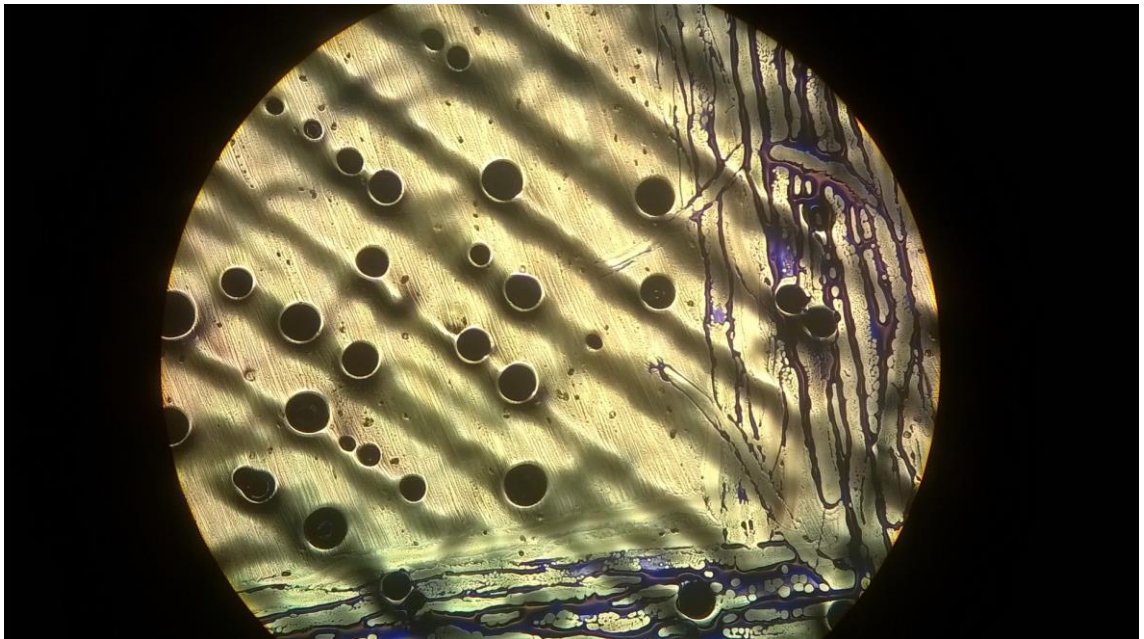


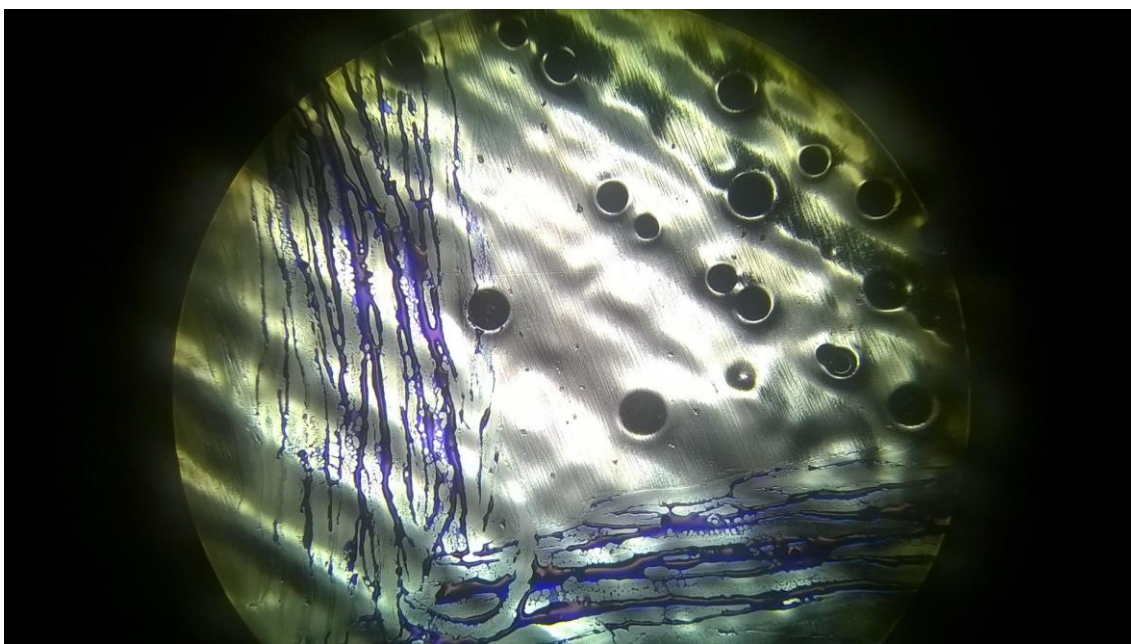
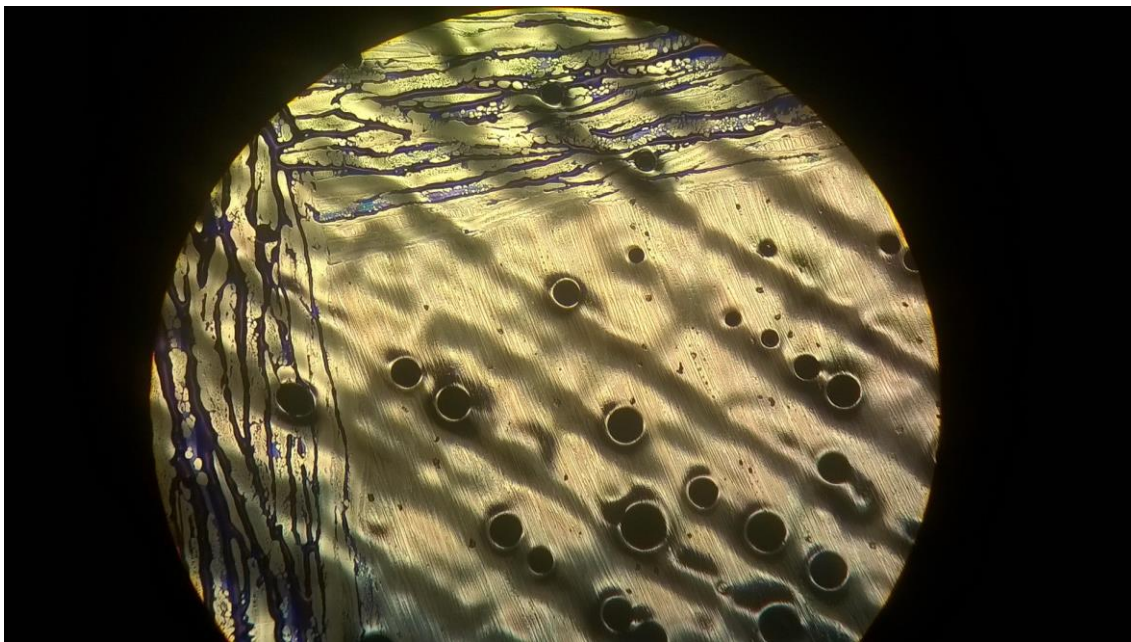
Testikappale 2b, kromilla pinnoitettu kappale katkeamisen jälkeen.



Testikappale 2b, kromilla pinnoitettu kappale katkeamisen jälkeen.

**Mikroskooppikuvat**

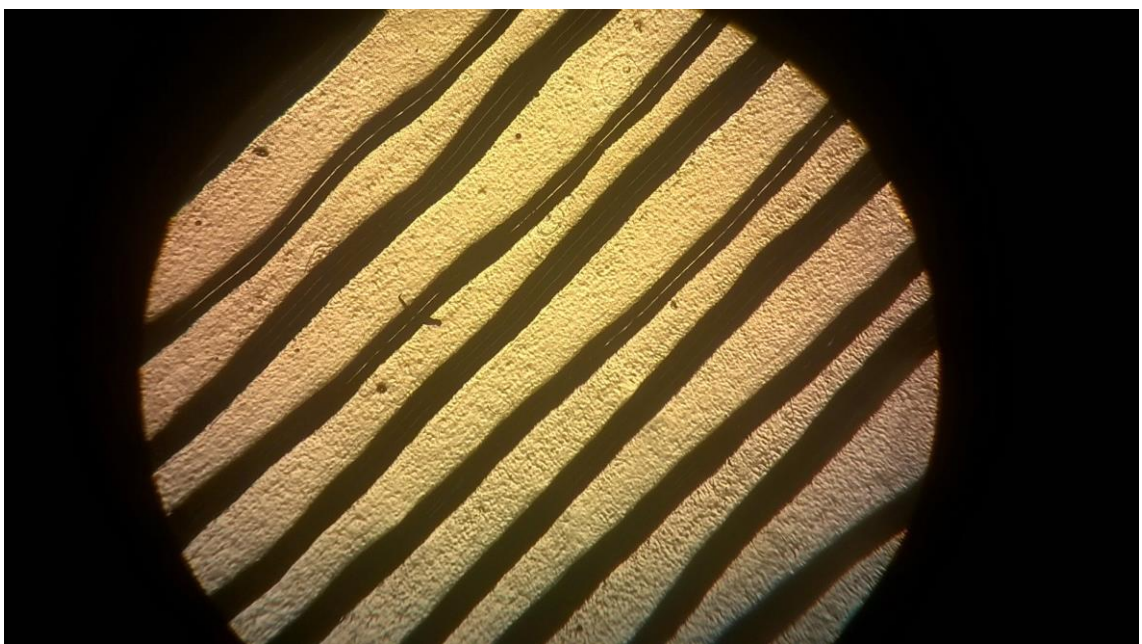




Mikroskooppikuvia mikrohuokosista neliönmallisella testikappaleella 2a. (10 kertainen suurennos)



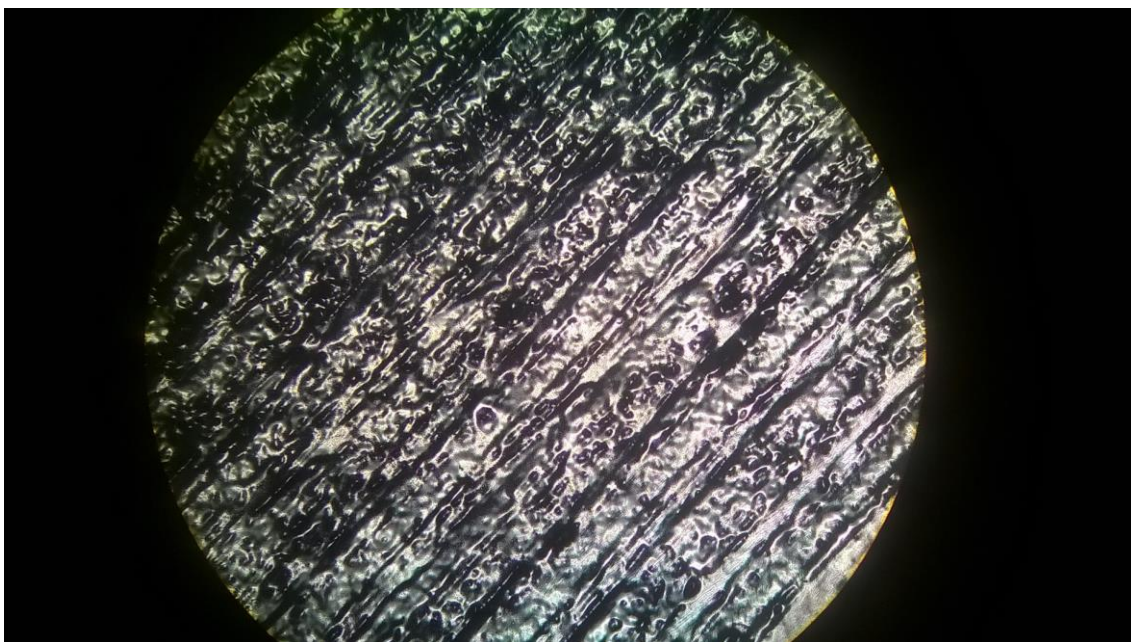
Alue, jolta aiemmat mikrohuokoskuvat ollaan otettu. Testikappale 2a, yläpuoli.



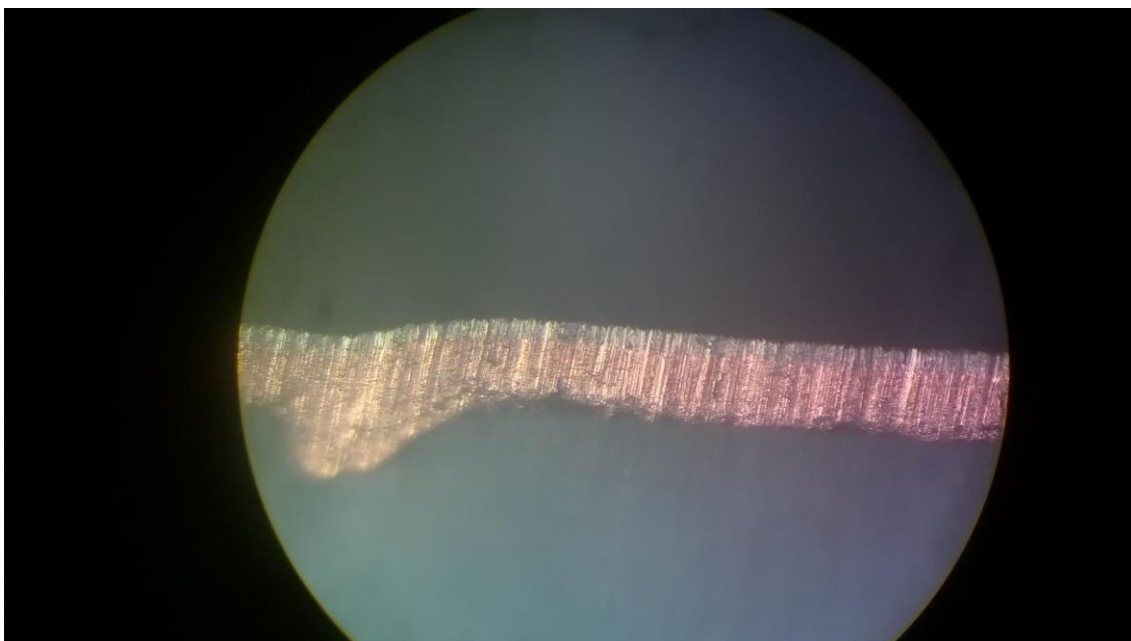
Kromilla pinnoitettu neliönmallinen testikappale 2a, alapuoli. (10 kertainen suurennos)



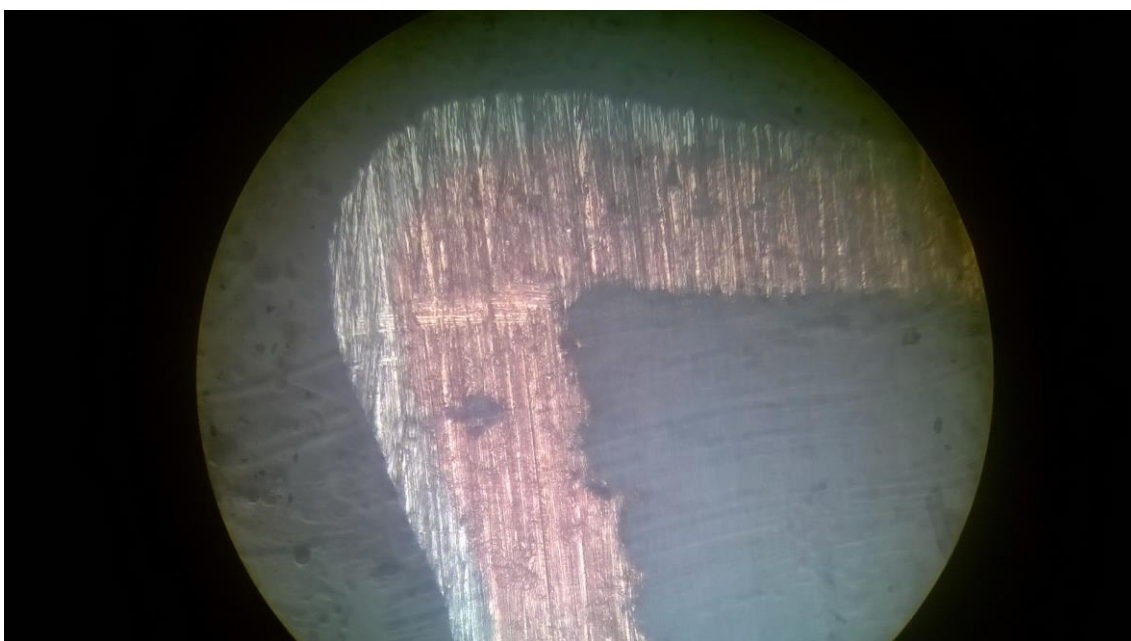
Kromilla pinnoitettu neliönmallinen testikappale 2a, yläpuoli. (10 kertainen suurennos)



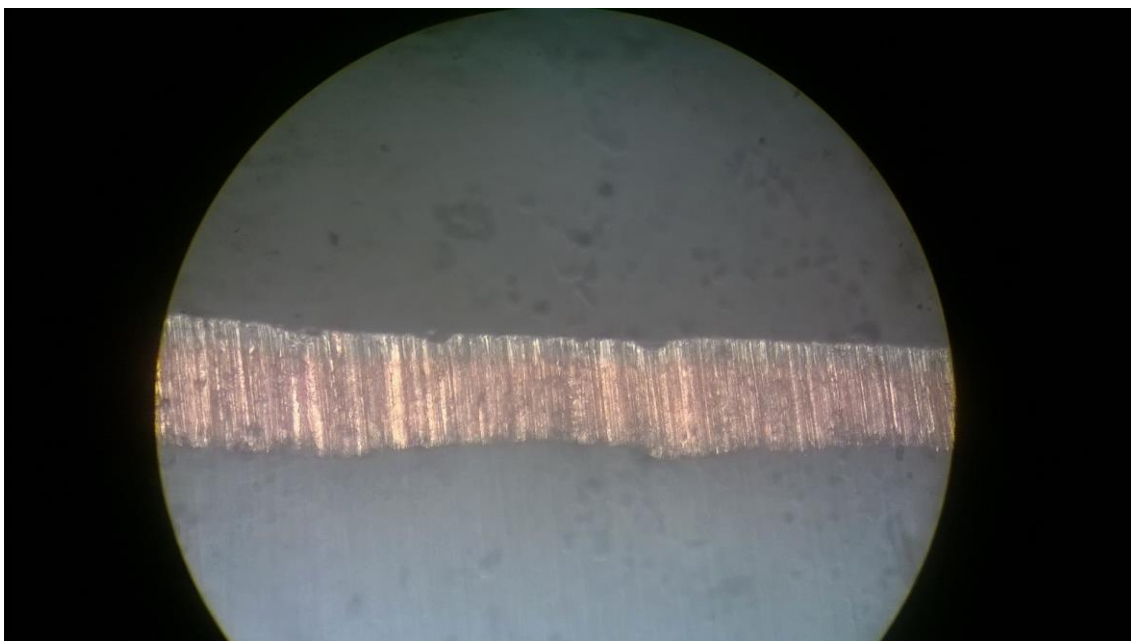
Kemiallisella nikkelillä pinnoitettu testikappale 1b, yläpuoli. (10 kertainen suurennos)



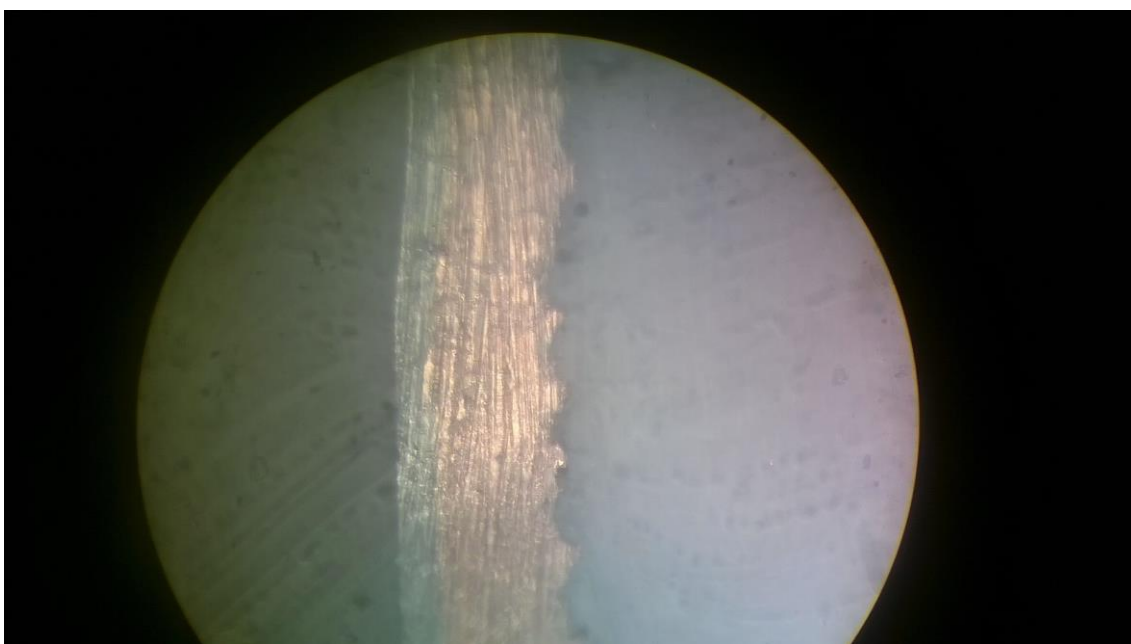
Hie testikappale 2b:n yläpuolesta. (20 kertainen suurennos)



Hie testikappale 2b:n kulmasta. (20 kertainen suurennos)



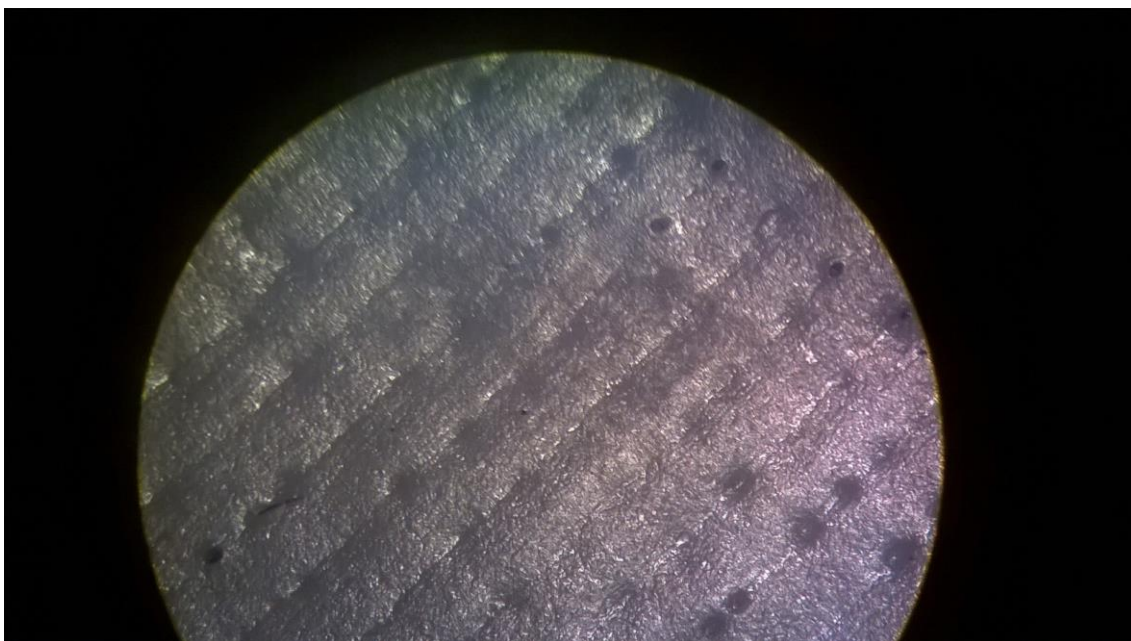
Hie testikappale 2b:n alapuolesta. (20 kertainen suurennos)



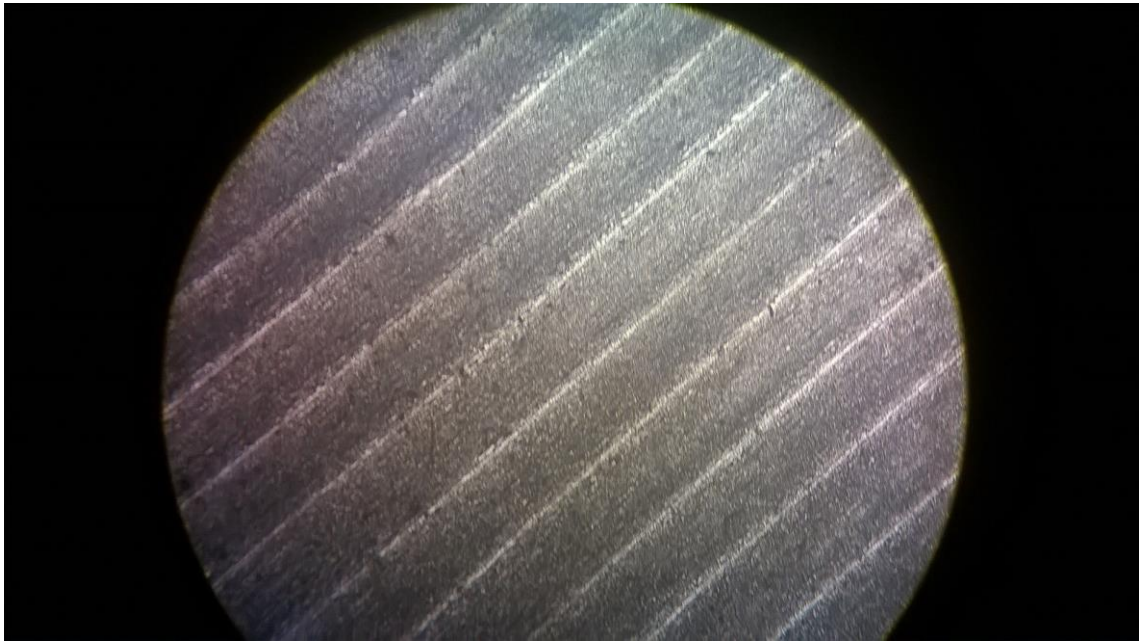
Hie testikappale 2b:n sivusta. (20 kertainen suurennos)



Epäonnistunut hie testikappaleesta 2b.



15 sekuntia asetoniin upotettu kappale, yläpuoli. (10 kertainen suurennos)



15 sekuntia asetoniin upotettu kappale, alapuoli. (10 kertainen suurennos)



Poikkileikkaus testikappale 2b:stä.

**Asetoni käsitellyt kappaleet**



Asetoni höyryssä käsitelty kappale, yläpuoli.



Asetoni höyryssä käsitelty kappale, alapuoli.



5 sekuntia asetoniin upotettu kappale, alapuoli



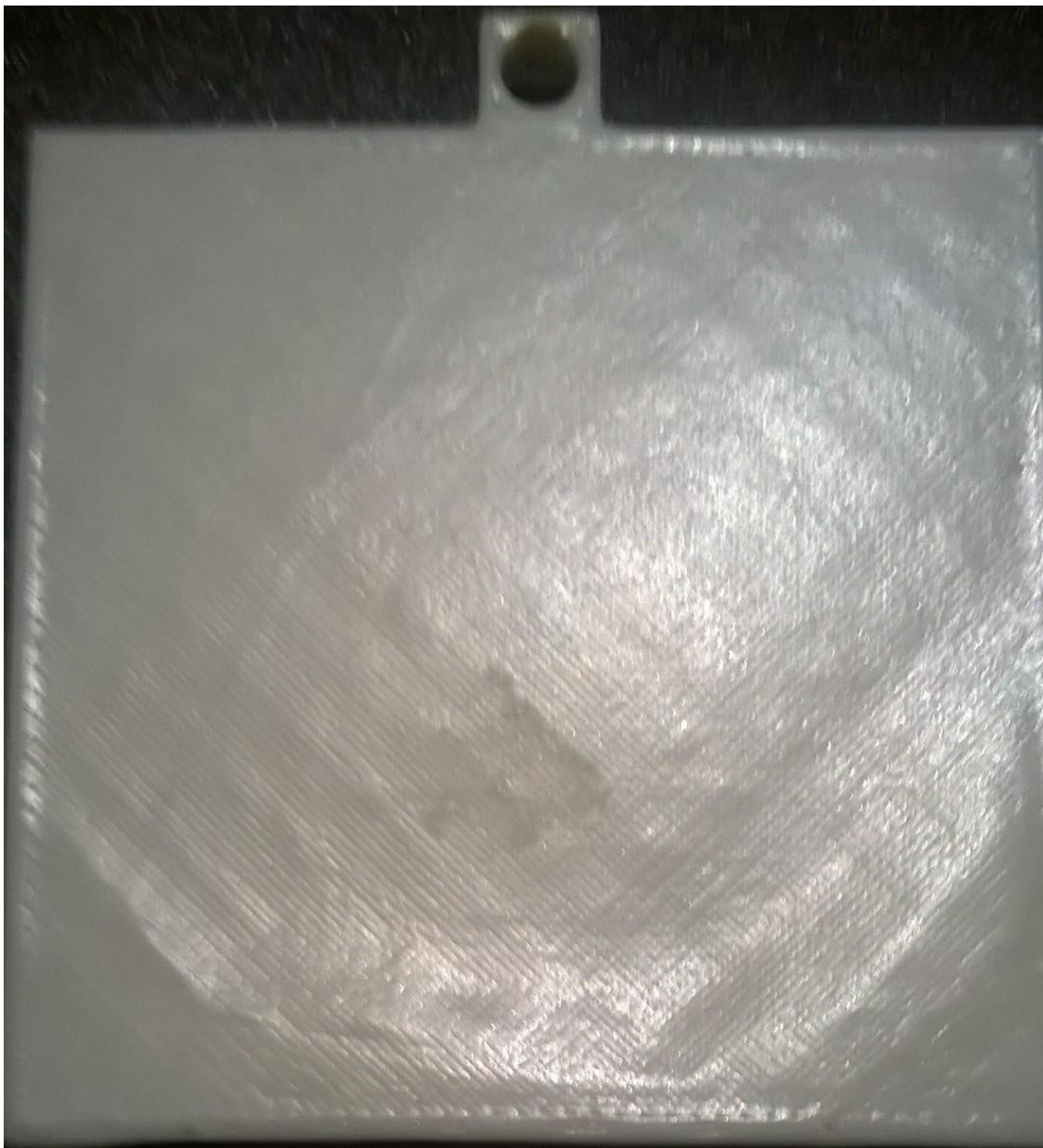
15 sekuntia asetoniin upotettu, alapuoli.



30 sekuntia asetoniin upotettu kappale, alapuoli.



5 sekuntia asetoniin upotettu kappale, yläpuoli.



15 sekuntia asetoniin upotettu kappale, yläpuoli.



30 sekuntia asetoniin upotettu kappale, yläpuoli. Kappaleesta leikattu osa oikealta alakulmasta.