

3D-tulosteesta tarkkuusvalukappaleeksi

Lauri Linna

Opinnäytetyö

Toukokuu 2017

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Tuotantotekniikka

Tekijä(t) Linna Lauri	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä toukokuu 2017
	Sivumäärä 34	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi 3D-tulosteesta tarkkuusvalukappaleeksi		
Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Kivistö Hannu, Parviainen Miikka		
Toimeksiantaja(t) ProSolve Oy		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli ProSolve Oy. ProSolve on jyvaskyläläinen suunnittelutoimisto, joka on keskittynyt koneensuunnitteluun, mutta on jo monta vuotta tarjonnut 3D-tulosteita prototarkoitukseen. Yritys halusi kehittää palvelun, jolla voisi tuottaa valettuja kappaleita 3D-tulosteista, edullisesti ja nopeasti. Työ rajattiin tarkkuusvaluprosessin loppuvaiheisiin eli muottien tekoon, materiaaleihin ja valuun.</p> <p>Opinnäytetyössä selvitettiin mitä eri materiaaleja muottien valmistamiseen tarvitaan, mitä valumetallega on mahdollista käyttää prosessissa sekä oman tarkkuusvaluprosessin kannalta tärkeitä asioita. Valuteollisuuden ammattilaisia haastateltiin aina tarvittaessa. Teoria sovellettiin käytännössä kokeilla ja testeillä.</p> <p>Prosessi todettiin testeillä toimivaksi ja sen avulla voidaan tarjota asiakkaille haastavan muotoisia kappaleita alumiinista, valuraudasta ja teräksestä. Työn tuloksina saatiin valukappaleita teräksestä, alumiinista ja valuraudasta sekä tietoa materiaaleista, joita käytetään prosessissa. Opinnäytetyön aikana ilmeni monia jatkokehityksiä, joita tullaan tulevaisuudessa kehittämään.</p>		
Avainsanat (asiasanat) Tarkkuusvalu, 3D-tulostus,		
Muut tiedot		

Author(s) Linna Lauri	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2017 Language of publication: Finnish
	Number of pages 34	Permission for web publication: x
Title of publication Utilizing plastic 3D-printed parts in a precision casting		
Degree programme Mechanical and production engineering		
Supervisor(s) Kivistö Hannu, Parviainen Miikka		
Assigned by ProSolve Oy		
<p>Abstract</p> <p>This thesis was assigned by ProSolve Oy, based in Jyväskylä. ProSolve focuses on mechanical engineering. Although the main focus of the company is in mechanical engineering it has been providing 3D-printing services for many years. Now ProSolve wanted to develop a process utilizing 3D-prints in casting process. The main idea was to produce parts quickly and inexpensively. This thesis considers the steps that follows, after the 3D-print is ready to use. These steps are choosing of the materials, making of the mold and producing of the casting.</p> <p>To achieve this goal, it was necessary to first find out which materials are needed in precision casting and investigate these casting materials. Also issues that are relevant in developing own precision casting process were investigated. Casting industry specialist were interviewed. Theory was tested in practice.</p> <p>Process was found functional and it can be used when providing cast parts made of aluminum, steel and cast iron for customers. Cast part made of aluminum, steel and cast iron were also outcomes of the thesis. During the work, many improvement topics were found. These topics will get more attention in the future.</p>		
Keywords/tags (subjects http://vesa.lib.helsinki.fi/) Precision casting, 3D-printing		
Miscellaneous		

Sisältö

1	Käsitteet	3
2	Johdanto.....	4
	2.1 Yritys	5
	2.2 Opinnäytetyön aihe.....	6
	2.3 Aiheen rajaus.....	6
	2.4 Tavoitteet	7
3	Tarkkuusvalu	7
	3.1 Tarkkuusvaluprosessi	8
4	Muottimateriaalit.....	10
	4.1 Kipsimuotti	10
	4.2 Keraaminen muotti	11
	4.2.1 Keraamiliemi.....	12
	4.2.2 Tulenkestävät jauheet	12
5	Valumetallit	13
	5.1 Ei-rautametallit.....	13
	5.1.1 Alumiinit ja alumiiniseokset	13
	5.1.2 Kupari ja kupariseokset	14
	5.2 Rautametallit	14
	5.2.1 Valuraudat	15
	5.2.2 Valuteräiset.....	15
6	Työturvallisuus	15
	6.1 Valutyöt	15
	6.2 Muottien teko.....	16
	6.3 3D-tulostaminen.....	16
7	Oman tarkkuusvaluprosessin suunnittelu.....	17
	7.1 Muottimateriaalit	17
	7.1.1 Keraaminen liemi.....	18

	2
7.1.2 Tulenkestävät jauheet	19
7.2 Valumetallit	20
7.3 Valmistusprosessi	20
7.4 Tilat	22
8 Tulokset	23
8.1 Pinnanlaatu.....	24
8.2 Prosessin toimivuus ja kustannukset	25
9 Pohdinta	27
10 Lähteet.....	29

Kuviot

Kuvio 1. ProSolve Oy organisaatiorakenne.	5
Kuvio 2. ProSolve Oy logo	5
Kuvio 3. Kuorimuottimenetelmän vaiheet (Ruger n.d., muokattu)	10
Kuvio 4. Sintrattu keraamimuotti.....	11
Kuvio 5. Valetut kipsimuotit	18
Kuvio 6. Seostettu keraaminen liemi.	19
Kuvio 7. Molokiitin eri karkeus asteet.....	20
Kuvio 8 Tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessi	22
Kuvio 9. Valetun ja tulostetun kappaleen pintavertailu.	24
Kuvio 10. Asennon vaikutus pinnan laatuun.....	25

1 Käsitteet

Keraamiliemi	Muottikerroksen tekoon käytettävä liemi, johon valupuu kastetaan. Liemen tarkoitus on, että saadaan tulenkestävä jauhe tarttumaan sen pintaan.
Keraamimuotti	Keraamisesta materiaalista valmistettu tarkkuusvalu-muotti.
Molokiitti	Tulenkestävä jauhe, jota käytetään muun muassa tarkkuusvalussa muotin raaka-aineena.
Sintraus	Menetelmä, jossa keraamimuotti kovetetaan kovassa lämpötilassa. Orgaaninen aine palaa pois ja tulenkestävän hiekan partikkelit kiinnittyvät toisiinsa.
Sintrausuuni	Keraamimuotin sintraukseen (ks. sintraus) käytettävä uuni, jossa muotti kovetetaan.
Sulatusuuni	Metallin sulatukseen käytettävä uuni.
Tarkkuusvalu	Vanha valuprosessi, jossa metalli valetaan kertakäyttöisiin kuorimuotteihin. Valumalli on myös kertakäyttöinen ja se palaa/sulaa pois muotin sisältä prosessin aikana.
Tulenkestävä jauhe	Palamaton materiaali, jota käytetään tarkkuusvalumuotin tekoon. Jauheita on kolmea eri karkeusastetta ja montaa eri tyyppiä.
Valumalli	Vahasta tai muovista tehty malli kappaleesta, joka halutaan valaa. Valumalli on kertakäyttöinen eli se häviää tarkkuusvaluprosessin aikana.
Valupuu	Valukanavasta ja yhdestä tai useammasta kappaleesta koostuva kokonaisuus.
Zirkoni	Käytetään samoin kuin molokiittia (ks. molokiitti), mutta zirkoni kestää korkeampia lämpötiloja ja on reagoimaton materiaali.

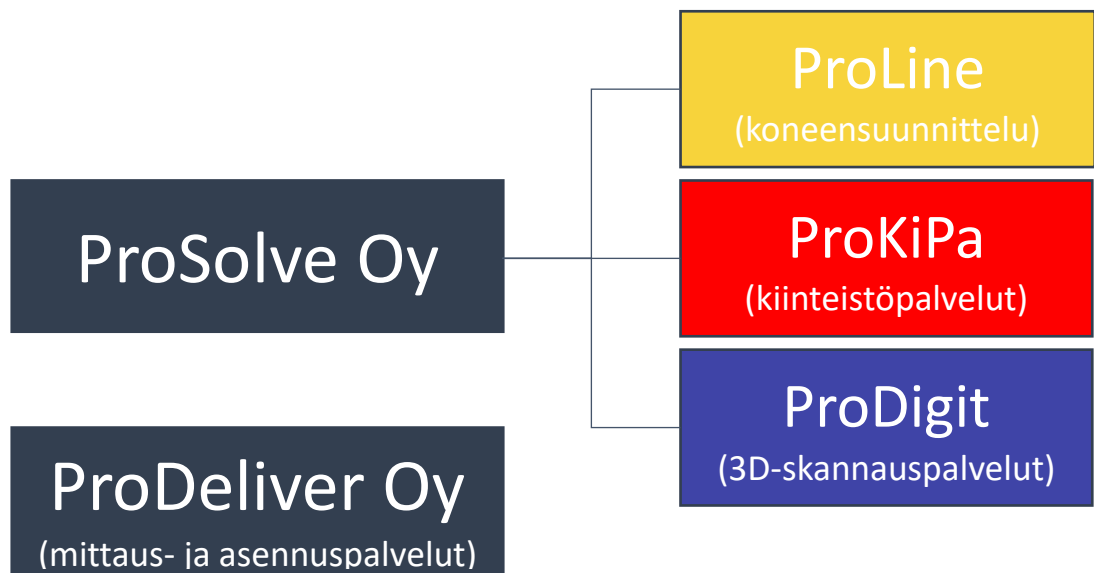
2 Johdanto

Opinnäytetyön toimeksiantaja on ProSolve Oy. Yhtiö on tarjonnut 3D-tulosteita jo pidemmän aikaa, mutta materiaalina käytetty muovi on rajoittanut mallien käyttöä. Muovista valmistetut mallit käyvät lähinnä havainnollistamistarkoitukseen. Erilaisia muovilaatuja on kehitetty paljon ja niiden ominaisuuksia parannetaan koko ajan, mutta ne eivät silti vielä yllä metallien lujuusominaisuuksiin. Yrityksellä on jo pitkään ollut halu tuottaa asiakkaille haastavan muotoisia ja pienikokoisia kappaleita alumiinista, teräksestä sekä valuraudasta loppukäyttöön valmiiksi tuotteiksi. Perinteisillä menetelmillä saa tehtyä yksittäiskappaleita nopeasti, mutta koneistus on usein kallista monimutkaisille kappaleille ja lisäksi koneistus rajoittaa kappaleen muotoja etenkin sisäpuolisten muotojen ja kanavien osalta. 3D-tulostus ei juurikaan aseta rajoituksia muodoille ja kappaleen hinta on suurin piirtein sama riippumatta sen muodosta. (ProSolve Oy n.d.)

Yrityksen mielestä perinteisillä menetelmillä on turha lähteä kilpailemaan asiakkaista, koska ala on erittäin kilpailtu, joten pitää tarjota jotain uutta ja parempaa, tarjota se nopeammin tai edullisemmin. Näistä lähtökohdista yritys sai idean: voisiko 3D -tulosteita käyttää hyväksi valumenetelmissä, jotta saataisiin tuotettua haastavia yksittäisiä kappaleita ja pieniä sarjoja nopeammin ja edullisemmin kuin perinteisillä menetelmillä. Pikamallinnus eli ”rapid prototyping” on viime vuosina yleistynyt globaalisti todella paljon. Uusia valmistusmenetelmiä on keksitty ja vanhoja menetelmiä parannettu huimaa vauhtia. Kappaleiden tarkkuus on saavuttanut jo sellaisen tason, että niitä voidaan hyödyntää sellaisenaan.

2.1 Yritys

ProSolve Oy on suunnittelutoimisto, jolla on toimipiste Valmetin tehdasalueella Jyväskylän Rautpohjassa. Työntekijöitä yrityksellä on yhteensä noin 30. Toiminta on jaettu kolmeen eri osa-alueeseen, jotka ovat koneensuunnittelu, kiinteistöpalvelut sekä suunnittelun tukipalvelut. Suunnittelun tukipalveluihin kuuluu laser-keilaus ja 3D-skannaus palvelut. ProSolve Oy:n suurin asiakas on Valmet Oy, jolle suunnitellaan paperikoneeseen liittyviä osia ja komponentteja. ProSolve Oy:n ja sen tytäryhtiö ProDeliver Oy toimivat kiinteässä yhteistyössä, jossa ProDeliver Oy on toteuttavana elementinä. ProDeliver Oy:n toimintaan kuuluvat kesällä 2016 perustettu hitsauspaja, erilaiset mittauspalvelut ja tulevaisuudessa pienimuotoiset valut. (ProSolve Oy n.d.)



Kuvio 1. ProSolve Oy organisaatiorakenne.

Yrityksellä on pyrkimyksenä pysyä kehityksessä mukana kehittämällä uutta ja parantamalla vanhaa jatkuvasti. Yrityksen johto on avoin uusille asioille ja halukas kehittäämään yrityksen toimintaa jatkuvasti siten, että yritys pysyy kehityksessä mukana. Opinnäytetyön aihe sopii yrityksen arvoihin ja organisaatiokulttuuriin hyvin.



Kuvio 2. ProSolve Oy logo

2.2 Opinnäytetyön aihe

Opinnäytetyön tarkoitus on kehittää tarkkuusvaluprosessi, jossa käytetään hyväksi 3D-tulosteita valumuottien pohjana. Mainitsin aikaisemmin, että kyseinen kehitys-idea on ollut yrityksellä mielessä jo pitkään. Vuoden 2015 keväällä idea liikahti eteenpäin, kun aloitin opiskeluihin liittyvän työharjoittelun ProSolvella. Harjoittelun aikana tehtiin myös testejä liittyen muovin käyttöön muottien tekemisessä ja kävi selväksi, että menetelmä on toimiva. Tämän tiedon perusteella sitä päätettiin jatkokehittää.

2.3 Aiheen rajaus

Kaksi ihmistä teki opinnäytetyötä tästä aiheesta. Toinen opinnäytetyö keskittyi tutkitavan menetelmän alkupään vaiheisiin eli se perehtyi 3D-tulostuksen ja -skannauksen eri vaiheisiin sekä siihen mitä pitää ottaa huomioon siihen pisteeseen asti, että on valumalli valmis. Tämä opinnäytetyö taas perehtyy vaiheisiin, jotka seuraavat sen jälkeen. Molemmat opinnäytetyön aiheet ovat selkeästi erillisiä, mutta tavoitteet ja se, mitä töillä haetaan, ovat pääpiirteittäin samat.

Tämä opinnäytetyö keskittyy siis menetelmän jälkimmäiseen osaan. Opinnäytetyöhön sisältyvät seuraavat asiat: tarkkuusvaluprosessin vaiheet, muottimateriaalit, valumetallit (tässä työssä valumetalleja käsitellään alumiinin, pronssin ja teräksen osalta), työturvallisuus ja oman prosessin suunnittelu. Valuteknisiä asioita, kuten valukanavien asettelu- ja syöttöasioita ei käsitellä tässä opinnäytetyössä. Ne ovat toki tärkeitä asioita valukappaleiden valmistuksessa ja niiden onnistumisessa, mutta tämä työ keskittyy menetelmän kehittämiseen. Valutekniset asiat taas tulevat mukaan siinä vaiheessa, kun sitä aletaan toteuttaa käytännössä.

Yksi keskeinen asia, joka liittyy näiden kahden opinnäytetyön kokonaisuuteen, on se, kuinka käytetty muovi käyttäytyy valumuottia polttaessa. Muovimateriaaleja, niiden ominaisuudet ja sitä, kuinka ne palavat polttaessa, käsiteltiin toisessa opinnäytetyössä teorian ja lankojen polttokokeiden avulla. Toisen opinnäytetyön tietojen avulla löydettiin teoreettisesti sopivin muovi menetelmän käyttöön. Tässä työssä taas käsitellään sitä, miten muovi käytännössä reagoi muotissa ja miten se vaikuttaa muun muassa kappaleen pinnanlaatuun.

Opinnäytetyön aikana rakensimme toisen opinnäytetyön tekijän kanssa muottien polttoon tarkoitetun polttouunin sekä alumiinin sulatukseen tarkoitetun sulatusuunin, mutta siihen ei paneuduta tässä opinnäytetyössä sen tarkemmin.

2.4 Tavoitteet

Tavoitteena oli luoda yrityksen käyttöön sopiva tuotantomenetelmä, joka hyödyntää edullisia jo olemassa olevia laitteita ja tekniikoita, jotta voidaan tarjota asiakkaille edullisia osia nopealla aikataululla. Työn tavoitteena oli saada selkeä kuva tarkkuusvaluprosessista, jotta sitä voidaan yrityksen puolesta käyttää. Tämän opinnäytetyön avulla saatiin siis tietoa muun muassa siitä, mitä materiaaleja muoteissa tarvitaan, miten muotteja valmistetaan ja mitä valumetallega voidaan käyttää. Menetelmän avulla pyritään myös luomaan kilpailuetua muihin toimijoihin nähden ennen kaikkea edullisuuden ja nopeuden avulla.

Tärkeimmät kysymykset, joihin opinnäytetyössä haetaan vastausta ovat seuraavat:

- Mitä muottimateriaaleja tarvitaan ja mitä vaihtoehtoja on?
- Minkälainen on valmistusprosessi?
- Mihin menetelmää voidaan hyödyntää eli minkälaisia kappaleita voidaan tarjota ja kelle? Esimerkiksi voidaanko tuottaa protokappaleita, taide-esineitä vai jotain muuta.
- Mikä on kappaleen hinta ja läpimenoaika?

3 Tarkkuusvalu

Tarkkuusvalu on muiden valumenetelmien ohella vanha menetelmä, jota on käytetty jo tuhansia vuosia. Se on nimensä mukaan tarkin tällä hetkellä käytetyistä valumenetelmistä. Tarkkuusvalu on niin sanottu häviävän mallin menetelmä, jossa haluttu muoto saadaan muottiin käyttämällä kertakäyttöistä mallia, joka on yleensä valmistettu vahasta. Tarkkuusvalu on kertakäyttöinen. (Autere 1986)

Tarkkuusvalulla on useita etuja verrattuna muihin valumenetelmiin. Tarkkuusvalu on erittäin tarkka valumenetelmä, jolla päästään parhaimmissa sovelluksissa lähelle koneistuksen tarkkuutta ja pinnanlaatua. Pinnanlaadussa voidaan päästä jopa Ra 1,6 arvoon, mutta tavallisesti Ra-arvo on alle 6,3. Muotti on yhtenäinen niin sanottu kuorimuotti. Malliin ei tule minkäänlaisia jakotasoja, joten siinä säästytään monesti resursseja vaativalta jatkotyöstöiltä. Ainoastaan syöttö- ja ilmakanaavat pitää poistaa valun

jälkeen. Tarkkuusvalussa käytettävä muotti ei rajoita muotoja millään tavalla ja jopa sisäpuoliset jouhevat muodot ovat mahdollisia, kunhan ne eivät ole täysin umpinaisia. Yleensä ainoa rajoittava tekijä on se, millä muotin pohjana toimiva valumalli saadaan aikaiseksi. (Höök 2015b)

Tarkkuusvalu sopii erityisesti pienille kappaleille. Siinä seinämän paksuus voi olla kapea. Tavallisesti 1,5 mm seinämän paksuus ei tuota ongelmia ja joissain sovelluksissa voidaan päästä jopa 1 mm seinämän paksuuksiin. Yksi merkittävä etu käytettäessä keraamista muottia on se, että siihen voidaan valaa mitä tahansa metallia. Kuten kaikissa valmistavan teollisuuden menetelmissä, myös tarkkuusvalussa on muutamia rajoituksia ja huonoja puolia. Pienet alle 100 kappaleen sarjat eivät yleensä ole kannattavia, koska muottien pohjana käytettävä vahamalli täytyy valmistaa kalliissa koneistetuissa ruiskupuristusmuoteissa. (Höök 2015b)

Tavallisesti alalla tuotantovolyymit ovat isoja ja tuotanto on automatisoitu etenkin muottien teon osalta. Ihmistyötä tarvitaan kuitenkin valupuiden kokoamisessa ja muottien ensimmäisen kerroksen tekemisessä, joka on suurinta tarkkuutta ja ihmisen silmää vaativa vaihe muotin teossa. Tuotannon automatisoinnilla saadaan kustannuksia huomattavasti pienemmäksi, kun tarkoituksena on tuottaa suuria määriä kappaleita. Prosessin joustavuus kuitenkin kärsii automatisoinnin seurauksena. Kappaleiden toimitusajat ovat pitkiä, mikäli vahamallien muotin ovat valmiit. Erään alan yrityksen toimitusaika on noin 4-6 viikkoa tilauksesta. Yksittäisiä kappaleita ja protokappaleita saa odottaa vielä pidempään.

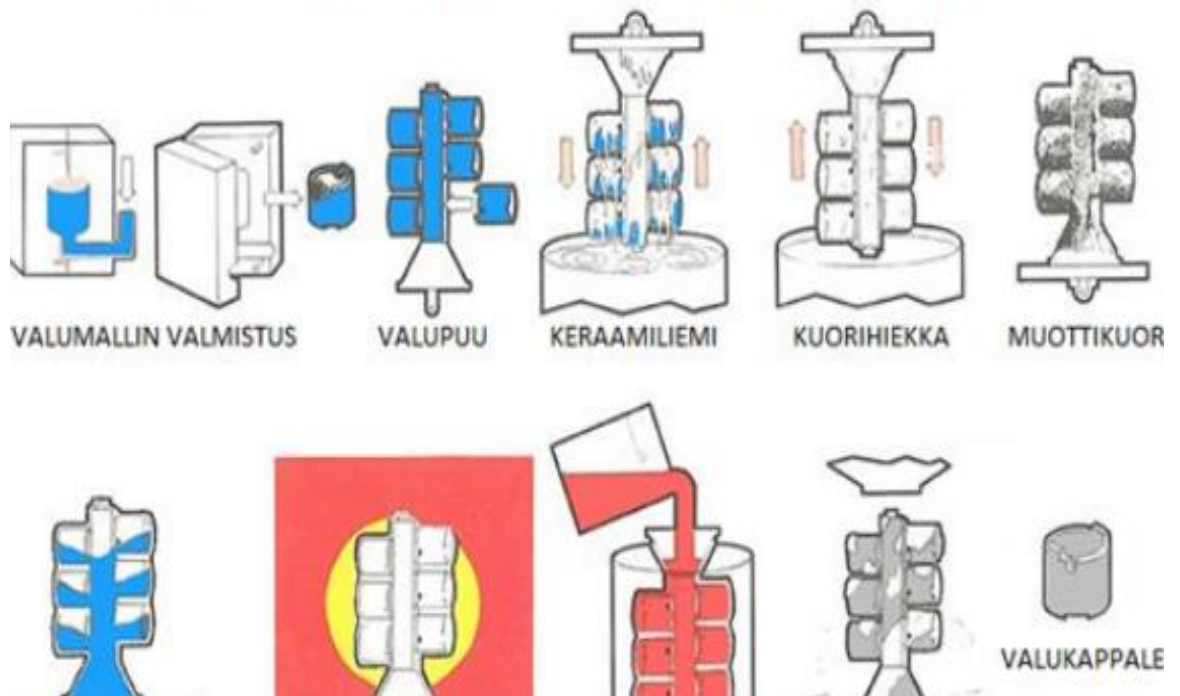
3.1 Tarkkuusvaluprosessi

Tarkkuusvalussa käytetään muotin pohjana vahasta valmistettua mallia halutusta kappaleesta. Vahamallit valmistetaan yleensä tarkkoihin mittoihin koneistetuilla ruiskupuristusmuoteilla. Muottien koneistus on kallista minkä seurauksena pienet sarjat eivät ole yleensä kannattavia. Valumallit liitetään liimalla valupuuhun, joka on sekin yleensä valmistettu vahasta. Liimaus tapahtuu kuumalla metallisella lastalla, jota pidetään hetki liimattavien osien välissä, jolloin liimauskohta sulaa ja jähmettyessään liimaantuu kiinni. Kun valupuuhun on liitetty tarvittava määrä malleja, voidaan sen päälle alkaa tehdä muottia. (Investment cast wax n.d.)

Keraamimuotti tehdään kerros kerrokselta noin 4-10 mm paksuiseksi, riippuen siitä mitä metallia valetaan. Alumiinia valettaessa riittää ohuempi muotti kuin terästä valettaessa, koska alumiinin aiheuttama kuormitus muottiin on pienempi. Muotti muodostuu tulenkestävästä jauheesta, joka sidotaan keraamiliemellä kasaan. Jauhe on yleensä zirkon- tai alumiinisilikaattipohjaista. Valupuu kastetaan ensin keraamiliemeen siten, että koko puu kastuu, jonka jälkeen sen päälle ripotellaan tulenkestävää jauhetta, joka taas tarttuu märkään pintaan. Kerroksen annetaan kuivua, kunnes pinta on niin kuiva, että edellisen päälle voi taas tehdä uuden kerroksen. Tämä toistetaan niin monta kertaa kuin on tarpeen, kunnes muotista on kasvanut riittävän paksu. (Höök 2014)

Kun muotti on rakentamisen osalta valmis, siitä poistetaan vaha autoklaavissa noin 200 asteessa ja kahden baarin paineessa. Vahan poiston jälkeen muotti sintrataan kovassa lämpötilassa, noin 1000 asteessa, jolloin muotin partikkelit kiinnittyvät toisiinsa ja viimeiset vahan rippeet palavat pois. Jäljelle jää täsmälleen kappaleen kokoinen ja muotoinen ontelo. Kaato suoritetaan yleensä heti muotin sintrauksen jälkeen, jolloin muotti on valmiiksi kuuma. Tämä parantaa sulan juoksevuuutta ja vähentää valuvirheitä verrattuna kylmään muottiin. Valun jälkeen muottikuori irrotetaan valupuun ympäriltä yleensä tärinävasaralla. Muotti voi myös liueta joihinkin liuottimiin, mutta kyseisiin liuottimiin ei ole paneuduttu sen tarkemmin opinnäytetyön osalta. Viimeinen vaihe on sahata kappaleet irti valupuusta ja viimeistellä ne. Prosessi on kuvattu Kuvio 3:ssa. (Tarkkuusvalu n.d.)

KUORIMUOTTIMENETELMA



Kuvio 3. Kuorimuottimenetelmän vaiheet (Ruger n.d., muokattu)

4 Muottimateriaalit

Tarkkuusvalussa käytetään kipsistä tai keraamista valmistettua muottia. Keraamista muottia käytetään normaalisti teollisessa toiminnassa ja kipsimuotteja taas käytetään paljon muun muassa koruteollisuudessa sormusten tekemiseen sekä niin sanotussa harrastetoiminnassa. Kipsi on huomattavasti halvempaa kuin keraami, mutta toisaalta sitä myös kuluu paljon enemmän muottimateriaalina. Tästä syystä kipsimuotilla tehtävät kappaleet ovat usein kooltaan pieniä. (Höök 2015b)

4.1 Kipsimuotti

Kipsimuotin pääraaka-aine on poltettu kaliumsulfaatti. Luonnossa esiintyvässä kaliumsulfaatissa on siderakenteeseen sitoutunut paljon vettä. Kuumentamalla sitä saadaan vesi pois kiderakenteesta. Lopputuloksena on kuiva valkoinen jauhe, jota kutsutaan kipsiksi. Kipsiin sekoitetaan uudelleen vettä muottimassan aikaansaamiseksi. Kovettumisen aikana kipsin siderakenteeseen sitoutuu jälleen paljon vettä, joka on kuivatettava pois ennen muottiin valua. Veden on haihduttava muotista hitaasti,

jotta muotti ei halkea. Kuivatusaika on pitkä ja lämmitys tapahtuu yleensä asteittain noin 200 asteeseen, jossa sitä pidetään monta tuntia. Kipsimuottien käyttöä hankaloittaa kuivan kipsin kyky imeä kosteutta ilmasta. (Autere 1986)

Muottimassaan voidaan sekoittaa muita aineita, esimerkiksi tulenkestäviä jauheita, muotin koostumuksen parantamiseksi. Kipsimuotin lämmönkesto on paljon alhaisempi kuin muissa keraamisissa materiaaleissa. Tästä syystä se ei sovellu metalleille joilla valulämpötila on yli 1000 astetta. Kipsimuotti kopioi valumallin pinnan laadun erittäin hyvin, joten kappaleiden pinnan laatu on yhtä hyvä kuin valumallien pinta. (Heiskanen n.d.)

4.2 Keraaminen muotti

Keraamimuotti tehdään kerros kerrokselta mallin pintaan keraamiliemen ja tulenkestävän jauheen avulla. Keraamiliemä tarvitaan siihen, että tulenkestävä jauhe saadaan pysymään mallin pinnassa. Liemen tarkoitus on pitää jauhepartikkelit kiinni toisissaan sekä kiinni mallin pinnassa muotin polttoon asti. Muottia sintratessa kaikki orgaaninen materiaali palaa pois, ja tulenkestävän jauheen partikkelit kiinnittyvät toisiinsa. (Höök 2014)



Kuvio 4. Sintrattu keraamimuotti.

4.2.1 Keraamiliemi

Keraamiliemi on sekoitus sideaineita, lisäaineita sekä tulenkestävää jauhetta. Jokaisella tarkkuusvaluun erikoistuneella yrityksellä on omaan prosessiin ja tarkoitukseen räätälöity liemi, jota on kehitetty sopivaksi vuosia yhdessä toimittajien kanssa. Liemen tarkoituksena on antaa tulenkestäville partikkeleille mahdollisuus tarttua sekä muottiin että toisiinsa siihen asti, kunnes muotti sintrataan. (Autere 1986)

Sideaineita tarkkuusvaluteollisuudessa on kahta eri vaihtoehtoa. Keskeisinä eroina on hinta ja kuivumisaika. Alkoholipohjaista sideainetta käytetään, jos vain jos muotin kuivumisen nopeus on tärkein prioriteetti. Vesipohjaista sideainetta on yleisimmin käytettyä ja se on myös huomattavasti edullisempaa verrattuna alkoholipohjaiseen vaihtoehtoon. Keraamiliemessä käytettäviä lisäaineita ovat esimerkiksi vaahdonestoaineet sekä kostutusaineet. Lisäaineiden osuus liemessä on pieni, yhteensä alle prosentti kokonaistilavuudesta. Liemeä sekoittaessa ja valupuuta kastaessa siihen muodostuu ilmakuplia, joista halutaan päästä mahdollisimman hyvin eroon, jotta muottikuoreen ei jää ilmakuplia. Vaahdonestoaineilla pyritään ehkäisemään ilmakuplien muodostusta. Kostutus aineilla pyritään parantamaan muottikerroksen tarttumista malliin sekä edelliseen kerrokseen, nimensä mukaan kostuttamalla edellistä pintaa. Lisäaineiden keskinäinen suhde on pitää olla oikea, koska väärä suhde voi heikentää toistensa ominaisuuksia. (Höök 2014)

4.2.2 Tulenkestävät jauheet

Tulenkestäviä jauheita käytetään sekä keraamiliemen raaka-aineena, että sirotteiluun. Tulenkestävänä jauheena käytetään tavallisesti zirkon- tai alumiinisilikaattipohjaisia jauheita. Jauheilla on hiukan erilaiset kemialliset ja fysikaaliset ominaisuudet. Yksi alumiinisilikaattipohjaisista jauheista on molokiitti, joka on helposti saatavissa ja noin 1,8 kertaa halvempaa kuin zirkon. (Artisan Foundry n.d.)

Yksi Zirkon jauheen hyödyistä on, ettei se reagoi muiden aineiden kanssa. Reagoimattomuuden takia sitä käytetään usein ensiliemen raaka-aineena sekä primäärikerroksen stucco-jauheena. Zirkonilla on myös hyvä tulenkestävyys. Sitä käytetään, jos valetaan kuumia metalleja, jotta muotti ei pala kiinni valun pintaan. (Ransom Randolph n.d.)

Yleisimmin käytetty, tai helpoimmin saatavilla oleva, alumiinisilikaattipitoinen jauhe, on molokiitti. Molokiitti sisältää alumiinisilikaattia noin 42-72%, ja loput ovat kvartssia. Molokiitti on halvempaa kuin zirkon mutta sen lämmönkesto on huonompi. Aluminiä, terästä ja valurautaa valettaessa lämpötilan kesto ei aiheuta ongelmia koska materiaalien sulamispiste on alempi kuin molokiitilla. (Autere 1986)

5 Valumetallit

Yksi tarkkuusvalun hyödyistä on se, että muotti ei rajoita käytettävää metallia vaan materiaali voi olla mitä vain alumiinista teräkseen tai jopa titaania. Eri metalleilla on erilaiset ominaisuudet, joten ne käyttäytyvät valettaessa toisistaan poiketen. Tutkin tässä opinnäytetyössä sellaisia valumetalleja, joita tullaan tai on aikeissa käyttää omassa prosessissa. (Höök 2014)

5.1 Ei-rautametallit

Yleisimmin käytettyjä ei-rautametalleja ovat alumiiniseokset, sinkkiseokset, kupariseokset, magnesiumseokset sekä titaaniseokset. Ei-rautametalleista tärkeimpiä on niin sanotut kevytmetallit, joita ovat alumiini, magnesium seokset sekä titaani. Kevytmetallien hyötyjä ovat muun muassa lujuus/paino suhde sekä hyvä korroosionkesto. (Höök 2015a)

5.1.1 Alumiinit ja alumiiniseokset

Valamiseen puhdas alumiini ei sovellu kovinkaan hyvin, koska sen juoksevuus on huono, lujuus matala ja sen on pehmeää. Se on kaikin puolin vaikea valaa. Aluminiä seostetaan, jotta sen valuominaisuudet paranevat. Yleisimpiä seosaineita ovat pii, kupari, magnesium, rauta, mangaani, sinkki sekä nikkeli. Aluminiin seostuksella saadaan myös sen lujuus ja korroosionkesto-ominaisuuksia parannettua. (Höök 2015a)

Aluminiä seostetaan suhteessa paljon vähemmän kuin esimerkiksi terästä. Jo pienet lisäykset seosmäärissä muuttavat ominaisuuksia huomattavasti. Tästä syystä alumiinien eri seostuksilla ei ole suurta vaihtelua hintaan. Esimerkiksi jos vertaa haponkestävää terästä johonkin vähän seostettuun teräslaatuun, kilohinnassa on merkittävä ero. (Ei-rautametallit 2005)

Pii on magnesiumin kanssa alumiinin eniten käytetty seosaine. Pii lisää alumiinin juoksevuutta sekä alentaa sen sulamispistettä. Hyvä juoksevuus on tarkkuusvaluprosessissa erittäin tärkeä ominaisuus, koska kappaleet voivat ovat monimuotoisia, ja niissä voi olla ohuita seinämiä sekä koloja. Muotit myös kaadetaan ilman paineen apua, toisin kuin painevaluprosessissa. Kupari seosaineena parantaa kovuutta sekä lastuttavuutta, mutta varjopuolena sillä on seoksen korroosionkesto-ominaisuuksien heikkeneminen. Kupari onkin lähinnä epäpuhtausaine, jota tulee kierrätysalumiinin joukossa, lukuun ottamatta painevaluseoksia, joihin sitä lisätään tarkoituksella. Magnesium on toinen tärkeä seosaine piin rinnalla. Magnesium lisää seoksen korroosiokestävyyttä, parantaa kovuutta sekä lujuutta. Kaikella on kumminkin varjopuolensa, niin myös magnesiumin käytöllä, sillä se heikentää seoksen juoksevuutta, mikä vaikeuttaa valamista huomattavasti. Rauta on kuparin tavoin alumiiniseoksissa yleinen epäpuhtausaine, jonka seurauksena korroosiokestävyys heikkenee. Rautaa kumminkin lisätään joihinkin valuseoksiin parantamaan juoksevuutta ja ehkäisemään kiinnipalamista painevaluissa. (Höök 2015a)

Alumiini sulaa suhteellisen matalassa lämpötilassa, noin 600-700 asteessa, vähän seoksesta riippuen. Alumiinilla on suuri taipumus muodostaa hapen kanssa alumiinioksidia, joka on ei toivottua seoksessa. Vedyn liukeneminen sulaan on toinen alumiinin sulatuksen kompastuskivistä. Oksidien muodostuminen ja vetykaasujen imeytymisen välttäminen ovat oleellisia valuprosessin onnistumisen kannalta. (Autere 1982)

5.1.2 Kupari ja kupariseokset

Puhtaan alumiinin tapaan puhdasta kuparia käytetään melko vähän valamisessa. Erilaisia kuparin seoksia ovat muun muassa valukuparit, valumessingit, tinapronssit, lyijy-tinapronssit, punametallit sekä alumiinipronssit. Tinapronsseja on käytetty antiikin ajoista asti erilaisisten taide-esineiden, työkalujen ja aseiden valmistamiseen. (Autere 1982)

5.2 Rautametallit

Rautametallit ovat joko valurautoja tai teräksiä. Valuraudaksi kutsutaan rautaseosta jonka hiilipitoisuus ylittää 2,1 %. Rautaseos jossa hiiltä on vähemmän kuin 2,1 %, kutsutaan teräkseksi. Rautametalleja tuotetaan vuodessa yli 1,2 miljardia tonnia ja sen

on edelleen tärkein metallien ryhmä. Rautametallien sulatukseen tarvittava energia on huomattavasti korkeampi verrattuna ei rautametalleihin. Tästä syystä muottiin kohdistuva rasitus on suurempi eli muotti pitää olla vahvempi. (Rautametallit 2005)

5.2.1 Valuraudat

Valurautoja on montaa eri laatua. Pääryhmät ovat valkea rauta, harmaa eli suomugrafiittirauta, pallografiittirauta, temper-rauta ja tylppägrafiittirauta. Valuraudan kaikki ryhmät ovat todella huonoja hitsattavia suuren hiilipitoisuuden takia. Valuraudat ovat nimensä mukaan valettaviksi tarkoitettuja rautametalleja. Valamislämpötilat vaihtelevat vähän riippuen valuraudan laadusta, mutta valamislämpötilat pyörivät noin 1400 asteessa. (Autere 1982)

5.2.2 Valuteräokset

Valuteräokset ryhmitellään yleisimmin seoksessa olevan hiilipitoisuuden mukaan niukkahiilisiin, keskihiilisiin sekä runsashiilisiin teräksiin. Suurin osa käytettävistä valuteräöksistä on niukkahiilisiä. Hiili vaikuttaa teräksen kovuuteen ja hitsattavuuteen. Valuteräksiä seostetaan sen mukaan, minkälaisia ominaisuuksia siltä halutaan. Yleisimpiä seosaineita on hiili, pii, mangaani, kromi, nikkeli ja molybdeeni. Seosaineilla pyritään vaikuttamaan terästen fysikaalisiin sekä kemiallisiin ominaisuuksiin. (Autere 1982)

6 Työturvallisuus

Työturvallisuus on erittäin tärkeää missä tahansa työssä. Kun kyseessä on valutyöt, työturvallisuuden merkitys korostuu, koska joudutaan käsittelemään sulaa metallia ja haitallisia kemikaaleja. Työturvallisuus on loppupeleissä jokaisen työntekijän omalla vastuulla, mutta yrityksen täytyy tehdä kaikki voitava, jotta työntekijän turvallisuus voidaan taata. (Työturvallisuus n.d.)

6.1 Valutyöt

Vaikka valutyöt ovat miten pienimuotoisia tahansa, kun metallia sulatetaan, siihen liittyy myös vaaroja, jotka pitää ottaa huomioon. Valimoissa esiintyvät vaaratekijät

voidaan jakaa karkeasti seuraaviin kategorioihin: kemialliset vaarat, fysikaaliset vaarat, ruumiillinen ja henkinen kuormitus ja tapaturmavaara. Tulityöturvallisuus on tärkeä asia, joka tulee ottaa huomioon aina tulitöitä tehdessä. Turvallisuus ei liity ainoastaan henkilöön niin kuin yleensä turvallisuus mielletään vaan tulityöstä voi aiheutua myös mittavia materiaalivahinkoja. Ehdottomasti suurin vaaratekijä on sula metalli, josta voi aiheutua palovammoja. Monesti valimoissa kappaleet ovat monen tonnin painoisia, joten se aiheuttaa omia vaaratekijöitä. Tarkkuusvaluprosessilla tehtävät kappaleet ovat yleensä pieniä, joitain kymmeniä kiloja, joten niistä ei aiheudu yleensä muuta vaaraa kuin lämpö. Aina kun on kyse korkeista lämpötiloista, siihen liittyy palamista ja palamistuotteita. Kun metallia sulatetaan, siitä syntyy kaasuja ja höyryjä, joten hyvä ilmanvaihto on myös tärkeää. (Meskanen n.d.)

6.2 Muottien teko

Muottien sideaineena käytetään joko vesipohjaista kolloidista piitä tai alkoholipohjaista etyyilisilikaattia. Etyylisilikaattia käytettäessä tulee huolehtia riittävästä suojarusteista ja ilmanvaihdosta, mutta normaalisti muottien tekemisestä ei aiheudu haitallisia höyryjä. Tulenkestävät jauheet, varsinkin hienojakoisimmat, pölyävät aika paljon, minkä seurauksena pölyn kulkeutuminen keuhkoihin pitää estää suojarusteilla. Muotit ovat melko painavia, varsinkin viimeisiä kerroksia tehdessä, joten työskentelyasennot tulee olla oikeat, jotta vältytään loukkaantumisilta. (Meskanen n.d.)

6.3 3D-tulostaminen

3D-tulostaminen on sen verran uusi asia, että tutkimuksia laitteiden ja varsinkin muovien sulatuksesta tulleiden kaasujen haitallisuudesta on melko vähän. Joitain varsinkin epävirallisia tutkimuksia on tehty ja tulokset ovat aika hälyttäviä. Tämä on huolestuttavaa, koska laitteita myydään kouluihin ja toimistoihin, ja ihmiset viettävät paljon aikaa samoissa tiloissa niiden kanssa. Hyvä ilmanvaihto on siis äärimmäisen tärkeää huolehtia, jos laitteet laitetaan tilaan missä on jatkuvasti ihmisiä. Tästä syystä ProSolvella tulostimet siirrettiin pois toimistosta, missä ihmiset työskentelevät koko ajan, tilaan jossa ei ole vakituisia työpisteitä. Tulostimet siirrettiin tilaan, jossa on tarkoitus hoitaa kaikki tulostukseen ja muottien tekoon liittyvät asiat. (Hänninen 2015)

7 Oman tarkkuusvaluprosessin suunnittelu

Valamisesta ja sen monista eri menetelmistä löytyy yllättävän paljon yksityiskohtais-
takin tietoa, mutta tarkkuusvalu on aihe, mistä yritykset eivät jaa tietoa ulos. Yleistä
tietoa prosessista on saatavilla, mutta se miten asiat käytännössä tehdään, on jokai-
sen kokeiltava itse. Haastavaa on myös oman toiminnan laajuus. Vaikka materiaalin
toimittajia tarkkuusvaluteollisuudelle on muutamia ne eivät toimita pieniä määriä.
Haasteeksi muodostui etenkin keraamisen liemen saatavuus.

Yksi tarkkuusvalun haitoista oli, ettei se sovellu hyvin yksittäisiin kappaleisiin ja pie-
niin sarjoihin, koska valumallimuottien kustannukset ovat isot. Oman prosessimme
lähtökohtana olivat pienet volyymit sekä nopea läpimenoaika ja -joustavuus. Oma
tarkkuusvaluprosessi on suunniteltu niin, että yksittäisetkin kappaleet ovat kannatta-
via. Aloituskustannuksia ei käytännössä tule, koska valumallit tehdään 3D-tulosta-
malla eikä kalliita muotteja tarvita.

7.1 Muottimateriaalit

Tarkkuusvalussa käytetään keraami- ja kipsimuotteja. Tarkastelin näitä kahta vaihto-
ehto oman prosessin suunnittelussa. Kahden eri muottimateriaalin välillä on muu-
tama keskeinen ero, jotka vaikuttavat valintaan. Kipsin kiderakenteessa on paljon
vettä, joka pitää poistaa todella hitaasti, jotta muotti ei halkea. (Autere 1986) Asteit-
tainen lämmitys vaatii tarkan lämpötilan mittauksen ja pitkän ajan. Toiseksi kipsillä
tulee vastaan lämpötilojen kesto, mikä rajaa valumateriaalin alumiiniin ja sitä mata-
lamman sulatuslämpötilan omaavaan metalliin. Keraaminen muottimateriaali on
huomattavasti kalliimpaa kuin kipsi, mutta keraamimuotista voi käyttää osan stucco-
kerroksien tekoon, jolloin kustannuserot hieman tasoittuvat.

Tein kokeita työharjoittelun aikana kipsimuotilla ja jokainen koe epäonnistui. Vasta-
kohtana tein opinnäytetyöhön kokeita keraamimuoteilla ja kaikki oli muotin teon
kannalta enemmän tai vähemmän onnistuneita ja kaikki säilyivät ehjänä kaatoon asti.
Keraamimuotti kestää lämpöä ihan eri tavalla kuin kipsimuotti. Muotin lämmönkesto
riippuu siitä, mitä tulenkestävää jauhetta käytetään, tavallisesti joko molokiittia (alu-

miinisilikaatti) tai zirkonia. Zirkonin sulamispiste on 2450 astetta, jolloin muotin lämmönkeston saa riittäväksi mille tahansa valettavalle metallille. Päädyimme kokeiden ja materiaalien ominaisuuksien takia käyttämään omassa prosessissamme keraamimuotteja.



Kuvio 5. Valetut kipsimuotit

7.1.1 Keraaminen liemi

Keraamimuotteihin tarvittavien raaka-aineiden toimittajaa oli todella vaikea löytää, koska tarve muottimateriaaleille oli suhteellisen vähäistä. Pitkän etsinnän tuloksena Englannista löytyi yritys, joka toimitti Suomeen tarkkuusvaluun käytettävään lientä, ja vielä sopivan kokoisina erinä. Toimitusaika Suomeen on järkevä siten, että keraamiliemen saatavuus ei ole ongelma prosessin toimivuuden kannalta.

Ostettava liemi ei vielä ole valmista muottien rakentamiseen, vaan siihen pitää lisätä erittäin hienoa tulenkestävää jauhetta. Liemen seostussuhde osoittautui mahdotto-

maksi selvittää, joten se oli tehtävä kokeilemalla. Kävi ilmi, että seostussuhde vaikuttaa siihen, kuinka hyvin jauhe tarttuu muotin pintaan, miten hyvin se siinä pysyy kuivuksessaan, ja kuinka paljon muotti niin sanotusti valuu. Valumisella tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että miten paljon lientä tippuu muotista lattialle, kun se on asetettu kuivumaan. Kokeilujen jälkeen liemen seostus saatiin sellaiseksi, että kerroksen pysyvät kiinni valumatta, ja että se on samanaikaisesti tarpeeksi notkeaa, jotta se pääsee kaikkiin koloihin.

Liemessä on niin sanottu kuivumisindikaattori, joka näyttää visuaalisesti onko muotti tarpeeksi kuiva, jotta muottiin voi tehdä uuden kerroksen. Muottiin ei voi tehdä uutta kerrosta, jos edellinen kerros on vielä märkä koska muotti saattaa irrota kokonaan mallin pinnasta. Kuivumisindikaattori osoittautui erittäin hyödylliseksi, koska sen avulla näkee nopeasti voiko muottiin tehdä uuden kerroksen.



Kuvio 6. Seostettu keraaminen liemi.

7.1.2 Tulenkestävät jauheet

Tulenkestävien jauheiden vaihtoehtoiksi rajautui kaksi vaihtoehtoa saatavuuden rajoitteiden takia: molokiitti- sekä zirconi-hiekka. Molokiitille ja zirkonille oli paljon helpompaa löytää toimittaja, koska niitä käytetään muutenkin kuin vain tarkkuusvalu muottien raaka-aineina. Molokiitti valittiin omaan prosessiimme, koska se toimii kaikille metalleille, joita ProSolve aikoo käyttää prosessissa, ja sen lisäksi se on huomattavasti edullisempaa kuin zirkon.

Jauheita tarvitaan kolmea eri karkeus astetta. Hienoin on raekooltaan 0.075-0.0029 mm ja sitä käytetään seostamaan lientä. Ensimmäisten kerrosten tekemiseen käytetään, raekooltaan 0.368-0.225 mm hiekkaa. Stucco-kerrosten tekemiseen puolestaan käytetään 1,4-0.47 mm raekooltaan olevaa hiekkaa.



Kuvio 7. Molokiitin eri karkeus asteet.

7.2 Valumetallit

Kuten aiemmin on mainittu, valettava materiaali voi olla miltei mitä vain. Suunnittelussa on otettava huomioon materiaalien ominaisuudet, ja fasilitteettien on oltava tarvittavat kullekin materiaalille. Työn aikana tarkasteltiin mitä eri metallit vaativat investointimielessä, jotta niitä voidaan valaa. Päädyttiin siihen, että sulatetaan itse sellaiset materiaalit, jotka vaativat suhteellisen matalan sulamispisteen, eli esimerkiksi alumiini ja pronssi. Muiden materiaalien sulatukseen (mm. valurauta ja teräs) päätettiin etsiä sellaiset yhteistyökumppanit, joilta löytyy tarvittavat fasilitteetit ja halu tehdä yhteistyötä ProSolven kanssa.

Alumiinin ja pronssin sulatukseen rakennettiin nestekaasukäyttöinen sulatusuuni, joka heti ensimmäisten testien perusteella osoittautui toimivaksi ratkaisuksi varsinkin alumiinien sulatukseen. Pronssin testivaluja ei ole vielä tehty.

7.3 Valmistusprosessi

Yrityksen oma prosessi muottien valmistuksesta niiden sintraukseen ja valuun on menetelmällisesti samankaltainen kuin tarkkuusvalu yleisesti. Koko valmistusprosessi on

manuaalinen. Mekanisoinnilla tai automatisoinnilla ei tässä tapauksessa saa min-käänlaista hyötyä, koska volyymit ovat pieniä ja vaihtelu suurta.

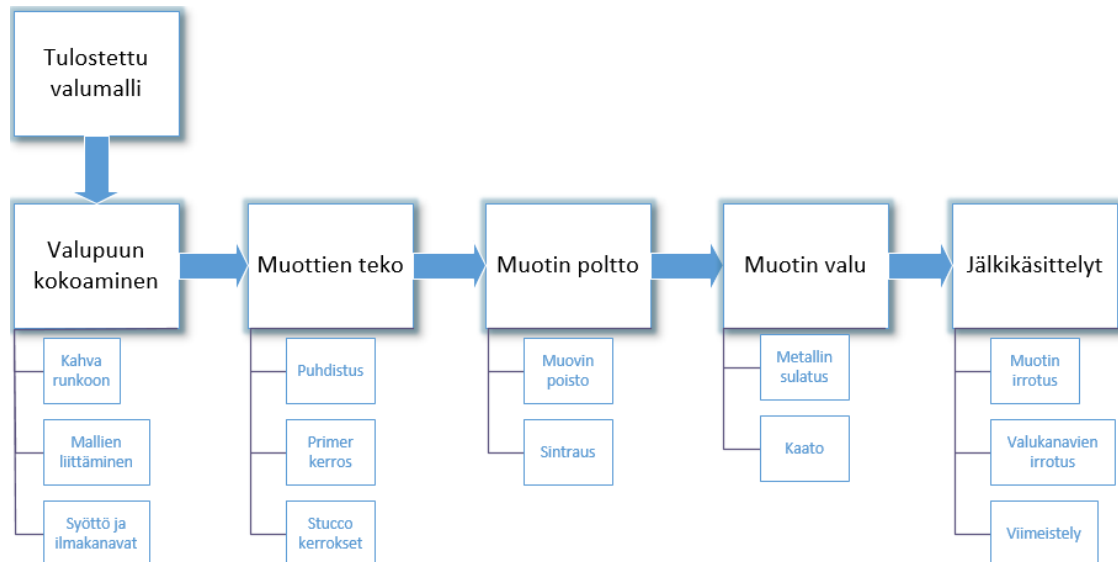
Tarkkuusvalun valmistusprosessi alkaa siitä, että siistitty valumalli on valmis. Prosessin ensimmäinen vaihe on valupuun kokoaminen. Vaihe sisältää mallien, tarvittavien valukanavien sekä kahvan liittämisen valupuuhun.

Muottien tärkein vaihe on ensimmäinen kerros. Muottimateriaali kopioi kaikki muodot ja mahdolliset virheet todella tehokkaasti, joten mallien puhtas ja virheetön pinta on tärkeää. Pöly, rasva ja mahdolliset vahajäämät on poistettava. Rasva mallin pinnassa vaikuttaa siihen, miten muotti tarttuu mallin pintaan, joten sen poistaminen on erittäin tärkeää. Ensimmäisen kerroksen jälkeen muottia aletaan paksuntaa tukikerroksilla.

Muotin poltto sisältää kaksi toimintoa. Ensin kuivunut muotti laitetaan alempaan lämpöön, jolloin suurin osa mallien materiaalina olevasta muovista pehmenee ja valuu pois muotista. Sen jälkeen lämpötila nostetaan muotin sintrauslämpötilaan, jolloin muotti kovettuu ja viimeiset muovin rippeet palaa pois muotista. Muotti kestää sintrauksen jälkeen paremmin käsittelyä, mutta turhaa käsittelyä tulee välttää.

Muotin valu olisi hyvä suorittaa heti sintrauksen jälkeen. Kuumaan muottiin valaessa metallin lämpöenergian aiheuttama rasitus muottiin on pienempi kuin kylmään muottiin valaessa, eli muotti pysyy paremmin ehjänä halkeamatta. Kuuma muotti myös täyttyy paremmin, varsinkin alumiinia valaessa, sillä sen lämpöenergia on pieni eikä muotin seinämä silloin jäähdytä virtaavaa metallia.

Viimeinen vaihe valuprosessissa on jälkikäsittely. Muotti poistetaan valupuun pinnasta, jonka jälkeen kappaleet irrotetaan valupuusta. Nämä kaksi voidaan monesti tehdä samalla kertaa. Lopuksi kappaleet viimeistellään. Tämä käsittää valukanavien hionnat sekä mahdolliset pintakäsittelyt ja koneistukset.



Kuvio 8 Tarkkuusvalukappaleen valmistusprosessi

7.4 Tilat

Kesällä 2016 yritykselle perustettiin hitsauspaja ja samalla saatiin valamiseen soveltuvat tuotantotilat. ProSolve vuokrasi tilan, josta voitiin jakaa hitsaukseen ja valamiseen omat osionsa. Valamisesta sekä hitsauksesta syntyy muun muassa höyryjä ja palamistuotteita, joten ne olivat järkevä sijoittaa samaan tilaan. Muottien valmistus päätettiin sijoittaa tulostuksen kanssa samaan tilaan, koska puhtaus on tärkeää muottien valmistuksessa.

8 Tulokset

Teräksen testivalut tehtiin alkuvaiheessa, jolloin muottien teko oli vielä vierasta. Keraamiliemen seostus oli vielä vääränlainen, mutta muotti saatiin silti syntymään. Teräsvalussa muotit halkesivat, mutta silti muutama onnistunut kappale syntyi. Testiä voidaan pitää onnistuneena.

Teräsvalujen jälkeen keraamiliemen seostusta muutettiin oikeampaan suuntaan ja sen jälkeen kaikki muotit ovat pysyneet ehjänä. Kevään ja kesän 2016 aikana tehtiin muutamia testivaluja ja yksi asiakastyö. Valut onnistuivat pääsääntöisesti hyvin ja selvää kehitystä oli havaittavissa. Alumiinisiin testikappaleisiin käytettiin materiaalina AlSi10-tyyppistä painevaluissa käytettävää alumiinia.

Valurauta-testivalut tehtiin loppukesästä 2016 harmaaseen rautaan ja ne onnistuivat odotuksia paremmin. Muotit kestivät hyvin ilman minkäänlaisia ongelmia, vaikka rautasula oli normaalia kovemmassa lämpötilassa. Testien perusteella varmistui se, että halutut materiaalit on mahdollista valaa.

Testivaluissa ei ollut havaittavissa jäämiä muovista tai siitä jäljelle jääneestä tuhkasta, joten käytetty muovilaatu soveltuu prosessiin hyvin. Myös prosessin toimivuus yleisesti ja halutuille metalleille todistettiin toimivaksi. Muovilaatuja tullaan tutkimaan tulevaisuudessa vielä tarkemmin.

8.1 Pinnanlaatu

Muotin ja valun onnistuessa pinnanlaatuun vaikuttaa suurelta osin valumallin pinta eli tässä tapauksessa kappaleen tulostuksen pinta. Keraamimuotti kopioi jokaisen uran ja mahdollisen virheen tulostuksen pinnasta. Keraamimuotin huokoisuus näkyy karheutena valukappaleen pinnassa, mikäli muotin ensimmäinen kerros ei ole tarpeeksi tiivis (katso Kuvio 9). Muotin pinnan saa tiiviimmäksi käyttämällä hienompaa jauhetta sirotteluun.



Kuvio 9. Valetun ja tulostetun kappaleen pintavertailu.

Valukappaleisiin tulee aina syöttö- ja/tai ilmakeinavia joihinkin kohtiin, koska metallin täytyy päästä jostain muotin sisään. Valukanavat on hyvä asetella, jos mahdollista, sellaiseen kohtaan mistä niiden poisto on helppoa ja irrotuksesta tulevat jäljet eivät haittaa. Monesti koneistettavat kohdat ovat hyviä paikkoja sijoittaa syöttökanavat. Valumallien sijoittelu valupuuhun vaikuttaa myös kappaleiden pinnanlaatuun. Tarkkuusvalussa ei käytetä painetta kaadon aikana, joten kappaleen eri pintojen pintapaineeseen vaikuttaa se missä kulmassa se on horisonttiin nähden. Kappaleen pohjapinnassa on suurempi paine kuin kattopinnassa, eli metalli painuu pohjapintaa vasten suuremmalla paineella kuin kattopintaa vasten. Tästä johtuu se, että monesti kattopinta ei ole niin sileä kuin pohja tai sivupinta (katso Kuvio 10).

Kappaleen oikeanlaisella sijoittelulla valupuuhun sekä syöttö- ja ilmakeinavien sijoittelulla pyritään siihen, ettei yhtään kattopintaa tule tai että ne ovat sellaisissa kohdissa jotka koneistetaan pois.



Kuvio 10. Asennon vaikutus pinnan laatuun.

8.2 Prosessin toimivuus ja kustannukset

Prosessi saatiin opinnäytetyön aikana toimimaan suhteellisen hyvin. Työn aikana tehtiin muutamia valuja, jotka onnistuivat jokainen edellistään paremmin. Toimintatavat vakiintuivat ensimmäisten testien jälkeen, mikä on prosessin laadun kannalta tärkeää. Jokaisesta valusta oppi jotain, jonka korjaamalla seuraava valu oli parempi.

Yksi keskeinen tavoite liittyi palvelun edullisuuteen yksittäiskappaleissa ja pienissä sarjoissa. Opinnäytetyön aikana tutkittiin valuprosessin kustannuksia, jotta tiedetään millä hinnalla palvelua voidaan myydä asiakkaille. Tulostuksen osuus ei tähän opinnäytetyöhön sisälly, joten keskityn vain muotin tekoon ja valuun. Koko prosessi on pitkälle käsityötä, joten suurin osa kustannuksista muodostui palkoista. Materiaalien osuus on marginaalinen.

Muottikustannuksiin vaikuttaa olennaisesti muottikerrosten lukumäärä, joten alumiinia ja terästä valaessa muottikustannus on eri. Yhden muottikerroksen tekoon menee aikaa noin puoli tuntia, jos muotteja on tekeillä samaan aikaan yhdestä neljään. Ja jos muotteja on tekeillä neljästä kahdeksaan, yhden kerroksen tekoon kuluu aikaa noin 30 – 45 minuuttia johon sisältyy alkuvalmistelut ja jälkisiivoukset. Yhden valun muottien kustannus alumiinilla on noin kaksi kolmasosaa siitä mitä terästä valaessa. Muottimateriaalikustannus yhtä muottia kohden on joitain kympejä, riippuen kappaleiden koosta. Valutilanteen kustannukseen vaikuttaa oleellisesti se, kuinka monta muottia on valettavana. Alkuvalmisteluun ja uunien lämmittämiseen menee noin tunti ja siitä eteenpäin noin puoli tuntia per uunillinen muotteja. Pieniä muotteja voi mahtua jopa neljä polttouuniin, mutta isokokoisia menee vain yksi. Valujen puhdistamiseen ja viimeistelyyn menee vähän kappaleesta riippuen varttitunnista tuntiin.

Yksittäisen kappaleen kustannus riippuu paljolti siitä, kuinka monta kappaletta yhteen valuun tehdään. Jos samalla kertaa tehdään kymmeniä osia, yhden osan hinta painuu huomattavasti alemmas kuin jos tehdään yksittäistä kappaletta. Toisaalta yhteen valuun voidaan tehdä usean eri asiakkaan tilauksia, joten yksittäiskappaleiden valut eivät todennäköisesti ole kovin tavallisia. Testien perusteella valukappaleiden kustannukset olivat kilpailukykyisiä ja yksittäisen testikappaleen hinnaksi muodostui vähän kappaleen koosta riippuen noin 150 - 300 euroa.

Toinen oleellinen asia on kappaleiden läpimenoaika. Ensimmäisiä testejä tehdessä ei pyritty optimoimaan aikatauluja, koska prosessi piti ensin saada hallintaan niin hyvin, että kappaleita ylipäätä syntyi. Kun läpimenoaikaan kiinnitettiin huomiota, kappaleiden läpimenoajaksi saatiin lopulta seuraavat ajat. Normaalisissa tapauksissa tilaukset pystytään toimittamaan asiakkaalle alle kahdessa viikossa, jos tiedostot ovat tulosvalmiita. Kiireellisissä tapauksissa toimitusaikaa pystytään kiristämään nopeamaksi. Nopein aika, jolla tilaus saadaan läpi, on viikko, mutta sitäkin todennäköisesti pystyttäisiin nopeuttamaan optimoimalla muottien kuivumista nykyisestä vuorokaudesta.

9 Pohdinta

3D-tulosteita hyödyntävä tarkkuusvaluprosessi nimettiin yrityksessä ProValuksi.

Opinnäytetyön aikana ProValu:sta saatiin toimiva prosessi, jolla voidaan tarjota asiakkaille nopeasti ja edullisesti monimutkaisia kappaleita. Kappaleiden toimitusaika tilauksesta on viimeisten testivalujen perusteella parhaimmillaan 7 päivää, jos oletetaan, että tulostukset saadaan valmiiksi vuorokauden aikana. Tavoite on, että toimitusaika saataisiin lyhennettyä muutamaan päivään. Prosessiin läpimenoaikaan vaikuttavia asioita ovat muottikerrosten kuivumisnopeus, muottikerrosten lukumäärä ja tulostamiseen kuluva aika.

Nykyään kappaleet suunnitellaan edelleen niin, että ne on mahdollista valmistaa perinteisillä menetelmillä. ProValu prosessi antaa suunnittelulle todella paljon lisää vapauksia, kun suunnittelijoiden ei tarvitse juuri miettiä sitä, miten kappale valmistetaan. Materiaalia pystytään minimoimaan erilaisilla verkkorakenteilla, virtauskanavat voidaan suunnitella siten, että virtaus on optimaalinen, ja kappaleen ulkonäkö voidaan toteuttaa haastavilla muotoiluilla ilman, että valmistuskustannukset nousevat. ProValu-prosessi onkin erittäin kilpailukykyinen ja kilpailuetua tuova, kun kappaleet suunnitellaan sitä silmällä pitäen.

Tällä hetkellä muotit tehdään samassa tilassa tulostuksen kanssa ja polttouunit ovat toisessa rakennuksessa sadan metrin päässä. Testivaluja tehdessä kävi ilmi, että muotit olisi hyvä tehdä samassa paikassa missä ne tullaan valamaan, jotta välttyään turhilta muotin siirtelyiltä. Uskon, että sintraamattomat muotit on hyvä pitää samassa lämpötilassa ja kosteudessa koko prosessin ajan. Kun muotit siirretään paikasta toiseen ulkoilman kautta, niihin kohdistuu, varsinkin talvella suuri lämpötilavaihtelu, mikä voi aiheuttaa halkeiluja.

Testivaluissa kävi ilmi myös se, että olisi hyvä olla kaksi uunia, joissa toisessa valutetaan muovi pois muoteista sintrauslämpötilaa matalammassa lämpötilassa, ja toisessa uunissa muotit sintrattaisiin korkeassa lämpötilassa. Testeissä havaittiin, että jos muotit laitettiin suoraan sintrauslämpötilaan, muotteihin tuli pieniä halkeamia muovin turvotessa. Halkeamat tosin usein umpeutuivat tai ikään kuin paloivat kiinni, kun muotti oli kunnolla sintrautunut.

Jokaisella valettavalla metallilla on erilaisten sulamispisteiden ja tiheyksien takia erilainen rasitus muottiin. Muotin kerrosten lukumäärä vaikuttaa siihen, kuinka paljon rasitusta se kestää. Toisin sanoen eri metalli tarvitsevat eri määrän muottikerroksia. Muotin seinämän paksuutta ja sen kestävyyttä olisi hyvä tarkastella tulevaisuudessa tarkemmin. Tutkimalla saadaan selville, kuinka paksu muotti tulee olla kullekin valettavalle materiaalille, jotta se kestää valutapahtumasta aiheutuvat voimat. Muottien kerroksien lukumäärä vaikuttaa suoraan siihen, missä ajassa muotti valmistuu ja näin ollen vaikuttaa merkittävästi läpimenoaikaan. Jokainen kerros tuo päivän lisää ja jokainen ylimääräinen muottikerros lisää kustannusta, joten on tärkeää optimoida kerrosten määrä.

Muottikerrosten kuivuminen on myös olennaisessa roolissa kappaleiden läpimenoajan kannalta. Jos työvuoron aikana voitaisiin tehdä kaksi kerrosta yhden sijasta, saataisiin läpimenoaika alle viikkoon. Muottien kuivumisen nopeuttaminen on tutkimisen arvoinen asia ja siihen tullaan varmasti tulevaisuudessa perehtymään yrityksen toimesta.

Valettavien kappaleiden tarkkuutta ei tarkasteltu tässä opinnäytetyössä. Kappaleiden laadunseuranta on seuraava askel prosessin kehittämisessä. Muotovertailemalla kappaleita alkuperäiseen malliin saadaan tietoa siitä, miten kappale muuttuu prosessin aikana. Kun saadaan käsitys siitä, miten prosessi muuttaa kappaletta, voidaan miettiä, miten kyseisiä muutoksia voidaan estää.

Opinnäytetyön aikana havaittiin myös joitain käytännön asioita, jotka eivät suoranaisesti vaikuta valun lopputulokseen, mutta on prosessin kokonaisuuden kannalta tärkeitä. Tämän kaltainen tärkeä asia on esimerkiksi valupuun kahvan kiinnitys siten, että se kestää paikallaan ja lähtee kuitenkin myös helposti irti.

10 Lähteet

Autere E., Ingman Y. & Tennilä P, P. 1982. Valimotekniikka 1. Helsinki: Insinööritieto

Autere E., Ingman Y. & Tennilä P, P. 1986. Valimotekniikka 2. Helsinki: Insinööritieto

Ei-rautametallit, 2005, Tampereen teknillinen yliopisto materiaaliopin laitos, Viitattu 20.10.2016 http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_2_3.php

Heiskanen. S., Kipsimuotit, n.d., Viitattu 14.4.2016 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_menet_kipsimuotit.pdf

Historia. Prosolve Oy. N.d. Artikkelit Prosolve Oy:n kotisivuilla. Viitattu 12.2.2016. <http://www.prosolve.fi/prosolve/historia/>

Hänninen. K., 2015, Tutkijat huolestuivat myrkkymuoveista: kohta niitä on lähes kaikissa kodeissa, Kauppalehti, Viitattu 20.9.2016 <https://m.kauppalehti.fi/uutiset/tutkijat-huolestuivat-myrkkymuoveista-kohta-niita-on-lahes-kaikissa-kodeissa/mjLfzKbK>

Höök. T., Alumiiniseokset, 28.1.2015, Viitattu 21.10.2016, http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/metals_aluminum FI.pdf

Höök. T., Meskanen. S., Keraamimuotit, 7.3.2014, Viitattu 20.5.2016 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_menet_keraamimuotit.pdf

Höök. T., Valumenetelmät, 3.9.2015, Viitattu 14.4.2016 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/perusopas_03.pdf

Höök. T., Valuviat ja kappaleen pinnanlaatu, 8.4.2014, Viitattu 3.6.2016

http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/HPDCdesign_surfacequality_FI.pdf

Investment casting wax, n.d., Viitattu 6.11.2016 <http://www.investmentcastingwax.com/>

Meskanen. S., Sulaton työsuojelu, n.d., Viitattu 20.9.2016 http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/vtp_sulatus_tyoturva.pdf

Mitä on tarkkuusvalu? Tekniikka ja talous, 5.11.2003. Viitattu 16.4.2016

<http://www.tekniikkatalous.fi/arkisto/2003-11-05/Mit%C3%A4-on-tarkkuusvalu-3282081.html>

Primecoat binder for investment casting, Artisan foundry shop, n.d., Viitattu 11.3.2016 http://artisanfoundry.co.uk/product_info.php?cPath=29&products_id=142

Rautametallit, 2005, Tampereen teknillinen yliopisto materiaaliopin laitos, Viitattu 20.10.2016 http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1.php

Ransom Randolph, Zircon: product, data sheet, n.d., Viitattu 16.6.2016

<http://www.ransom-randolph.com/PDFs/Product%20Data%20Sheets/01%20Ceramic%20Shell/Zircon%20Product%20Data%20Sheet.pdf>

Tarkkuusvalu, Valumenetelmät, n.d., Viitattu 15.4.2016 <https://valumenetelmat.wordpress.com/tarkkuusvalu-2/>

Työturvallisuus: Turvallinen työympäristö, Työterveyslaitos, n.d., Viitattu 20.9.2016

<https://www.ttl.fi/tyoymparisto/tyoturvallisuus/>

Uudet ohjeet: Näin työskentelet turvallisesti 3D-tulostinten kanssa, Työterveyslaitos, 1.12.2016, Viitattu 19.1.2017 <http://www.aalto.fi/fi/current/news/2016-11-30-008/>