

Sebastian Gumenius

Hartsivaletun korkkaustyökalun tuotekehitysprosessi

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

20.11.2017

Tekijä Otsikko	Sebastian Gumenius Hartsivaletun korkkaustyökalun tuotekehitysprosessi
Sivumäärä Aika	49 sivua + 1 liite 20.11.2017
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	Kone- ja tuotantotekniikka
Ammatillinen pääaine	Tuotesuunnittelu
Ohjaaja	Yliopettaja Jyrki Kullaa
<p>Tässä insinööriyössä tutkittiin hartsivalamista ja valmistettiin Intelin prosessoreiden lämmönlevittäjän irrotukseen työkalu, jota kutsutaan korkkaustyökaluksi. Korkatut prosessorit saadaan viileämmäksi, mikä mahdollistaa suorituskyvyn parantamisen.</p> <p>Korkkaustyökalun tuotekehitys aloitettiin suunnitteluvaiheesta ja lopetettiin tuotannon ylösajoon. Tuotekehityksen eri vaiheissa keskityttiin erityisesti siihen, mitä asioita on tärkeä ottaa huomioon juuri käytettäessä valuhartseja.</p> <p>Työn teoriaosuudessa käydään läpi valamismenetelmiä, valumateriaalien ominaisuuksia ja muottien suunnittelua, jotka ovat tärkeitä tekijöitä laadukkaiden valuosien valmistuksessa. Tutustuessa aiheeseen nähtiin, että opittuaan perustiedot pystyvät niin harrastajat kuin ammattilaiset valmistamaan 3-ulotteisia osia hartsivaluilla ilman suurempia laiteinvestointeja.</p> <p>Konseptien kehitysvaiheessa korkkaustyökalun toimintamekanismi jaettiin useaan osatoimintoon, joihin etsittiin ratkaisuja prototyypeillä ja 3D-malleilla. Prototyyppien valmistuksessa hyödynnettiin FDM-tekniikalla toimivaa 3D-tulostinta ja CNC-jyrsintä.</p> <p>Lopputuloksena saatiin Intelin prosessoreihin toimiva ja turvallinen korkkaustyökalu, joka valmistettiin silikonimuotteihin valetusta polyuretaanista. Kehittämismahdollisuuksia nähtiin muottien käyttöä parantamisessa tutkimalla tarkemmin erilaisia valu- ja irrotusaineita.</p>	
Avainsanat	korkkaustyökalu, polyuretaani, valuhartsi, tuotekehitys

Author Title	Sebastian Gumenius Product Development of a Resin Casted Delidding Tool
Number of Pages Date	49 pages + 1 appendix 20 November 2017
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Mechanical Engineering
Specialisation option	Product Design
Instructor	Jyrki Kullaa, Principal Lecturer
<p>In this Bachelor's thesis, a plastic casting process called resin casting was examined and a device called a delidding tool was developed for the removal of the integrated heat spreader (IHS) of Intel processors. The delidding process improves the contact between the IHS and the die of the processor for a significant boost in cooling.</p> <p>The project development was started with the design phase and was finished with the production ramp-up. During the different phases of the product development, a particular focus was placed on aspects regarding using casting resins.</p> <p>In the theoretical part of this study, factors influencing the outcome of the finished work, such as casting methods, several properties of casting resins and mould engineering were researched. It was discovered that after mastering the basics, a casual hobbyist as well as a professional can create three-dimensional items using resin casting without the need of a large investment in equipment.</p> <p>During the concept design stage, the working mechanism of the tool was divided into multiple subfunctions in which different solutions were evaluated by prototyping. An FDM-based 3D printer and a CNC router were utilized in manufacturing the prototypes.</p> <p>In conclusion, a functional tool for the safe delidding of Intel processors was created. The tool was cast using polyurethane resin in a mould constructed of silicone rubber. A longer mould life was considered as a possible future improvement by studying more profoundly the chemistry of different polyurethane resins and release agents.</p>	
Keywords	delidding tool, polyurethane, resin casting, product development

Sisällys

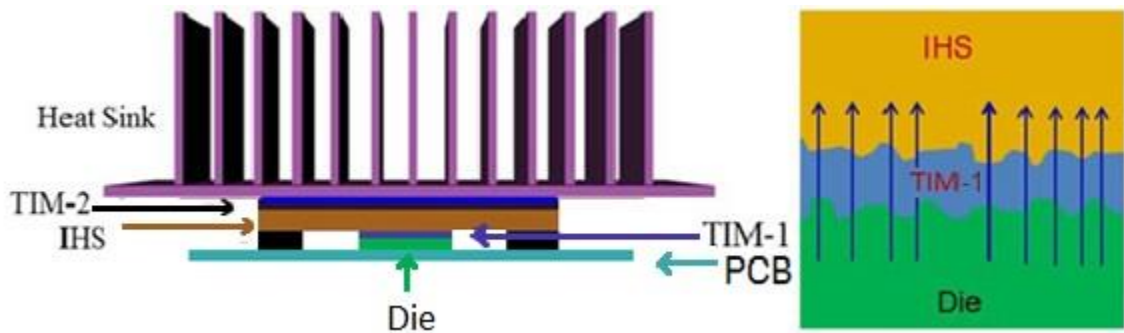
1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta	1
1.2	Työn tavoitteet ja sisältö	2
2	Hartsivalaminen	3
2.1	Valmistusmenetelmä	3
2.2	Valuhartsien ominaisuudet	5
2.3	Valuaineet	9
2.3.1	Muottisilikonit	9
2.3.2	Polyuretaanit ja polyuretaanielastomeerit	10
2.3.3	Epoksit ja polyesterit	12
2.3.4	Lisäaineet	12
2.4	Laitevaatimukset ja tarvikkeet	13
2.4.1	Apuvälineet ja lisälaitteet	13
2.4.2	Suojavälineet	14
2.4.3	Muotit	14
2.4.4	Irrotusaineet	17
2.5	Valutekniikat	18
2.5.1	Perinteinen valaminen	18
2.5.2	Vakuumivalaminen	18
2.5.3	Painevalaminen	19
2.5.4	Vakuumi- ja painevalaminen	19
2.5.5	Gelcoat-menetelmä	19
2.5.6	Rotaatiovalaminen	20
2.5.7	Prässäysvalaminen	20
3	Korkkaustyökalun tuotekehitys	21
3.1	Tuotekehityksen vaiheet	21
3.2	Suunnittelu	22
3.3	Konseptin kehitys	23
3.3.1	Liikerata	24
3.3.2	Energia	26
3.3.3	Lukittuminen	29
3.4	Konseptien jatkokehitys	30

3.5	Konseptin A jatkokehitys	31
3.5.1	Konsepti A - mallikappaleet ja muotit	31
3.5.2	Konsepti A - valumateriaalit ja lisäaineet	32
3.5.3	Konsepti A - valaminen	33
3.6	Konseptin B jatkokehitys	35
3.6.1	Konsepti B - mallikappaleet ja muotit	35
3.6.2	Konsepti B - valumateriaalit ja lisäaineet	36
3.6.3	Konsepti B - valaminen	37
3.7	Yksityiskohtainen suunnittelu	38
3.7.1	Toleranssit	39
3.7.2	Standardiosat	40
3.7.3	Irrotusaineet	41
3.8	Testaus ja viimeistely	43
3.9	Tuotannon ylösajo	44
4	Lopputulos ja yhteenveto	45
	Lähteet	47
	Liite Konsepti A:n valuhartsin - tuoteseloste	

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Prosessori on tietokoneen keskeisimpiä osia, joka suorittaa muistiin tallennettuja konekäskeyjä [1]. Toimiessaan prosessorin ydin tuottaa lämpöä, joka johdetaan pois jäähdytysjärjestelmän avulla (kuva 1). Prosessorin ylikuumentessa tietokone voi sulkea itsensä, tai vaihtoehtoisesti heikentää suorituskykyään (alikkellottaa), jolloin lämmöntuotto vähennee. Tehokas jäähdytysjärjestelmä pitää prosessorin viileänä, mikä mahdollistaa taas ylikellottamisen, jolloin suorituskyky paranee. [2.] Todellisuudessa systeemi on monimutkaisempi, mutta tämän tutkimuksen kannalta sitä ei tarkemmin käsitellä.



Kuva 1. Prosessorin jäähdytysjärjestelmä. Lämpötahna parantaa kahden komponentin välistä lämmönjohtavuutta. [3.]

Korkkaustyökalu on apuväline tietokoneen prosessorin jäähdytysjärjestelmän parantamisprosessissa. Lopputuloksena prosessori saadaan käymään viileämpänä, minkä seurauksena voidaan parantaa prosessorin suorituskykyä ja tietokoneen vakautta.

Korkkaustyökalulla pystytään irrottamaan prosessoreihin liimattu lämmönlevittäjä (IHS), jolloin ytimen ja lämmönlevittäjän välinen lämpötahna (TIM-1) voidaan vaihtaa alkupestä huomattavasti paremmin lämpöä johtavaan aineeseen. Lämmönlevittäjän voi myös irrottaa ilman erikoisempaa työkalua esim. partaterällä tai ruuvipenkillä, mutta näillä menetelmillä prosessori voi helposti vaurioitua. [2.]

Lämpötahnän lämmönjohtavuusominaisuudet heikentyvät myös pitkäaikaisessa käytössä, mikä voi vaikuttaa lämpötahnän uusimisen tarpeeseen. Laitteen käynnistyminen

ja sulkeminen (lämpösykli) aiheuttaa pumppaavaa liikettä ytimen ja lämmönlevittäjän välillä, jolloin lämpötahna siirtyy rajapinnalta ulos. Lämpötahnan ominaisuudet voivat myös heikentyä korkeissa lämpötiloissa, sillä lämpötahnassa oleva sidosaaine erottuu siinä olevista lämmönjohtavuutta lisäävistä täyteaineista heikentäen sen ominaisuuksia. [4.]

1.2 Työn tavoitteet ja sisältö

Työn tavoitteena on tutkia nestemäisten muovien valamista eli hartsivaluja, ja niiden soveltuvuutta korkkaustyökalun valmistuksessa. Hartsivalaminen soveltuu hyvin piensarjatuotantoon matalien kustannuksien takia, sillä muotit voidaan tehdä edullisesti ja nopeasti, sekä valamisen laitevaatimukset ovat vähäiset. Valuhartsien käyttökohteita ovat esim. teolliset osat, prototyypit ja erilaisten osien jäljentäminen. [5.]

Hartsimateriaaleja on tarjolla monilla erilaisilla ominaisuuksilla, esim. kulutuskestävyydellä ja jäykkyydellä, mikä lisää mahdollisuutta löytää sopiva hartsi käyttökohteeseen. Muotteja ja valutekniikoita on myös monenlaisia, ja niiden valinta on suuri osa tuotekehitysprosessia. Opinnäytetyössä suunniteltu korkkaustyökalu sopii hyvin valuhartseilla valmistettavaksi matalan tuotantomäärän, vaativan muodon, sekä hartsien materiaalisoveltuvuuden takia.

Aluksi työssä syvennytään hartsivalamisessa käytettyihin aineisiin, muotteihin ja valmistusmenetelmiin. Kun perustiedot on käsitelty, käynnistetään korkkaustyökalun tuotekehitys, jossa keskitytään erityisesti siihen, mitä asioita on tärkeä ottaa huomioon käyttäessä juuri valuhartseja. Valmistettavuuteen panostetaan erityisesti, sillä projekti viedään loppuun asti piensarjatuotantoon.

Tuotekehityksessä käytetään yleistä tuotekehitysmallia, jonka mukaan edetään systemaattisesti. Konseptin kehitysvaiheessa korkkaustyökalun toimintamekanismi jaetaan useampaan osatoimintoon, joihin etsitään ratkaisuja hartsivaletuilla, 3D-tulostetuilla ja CNC-koneistetuilla prototyypeillä.

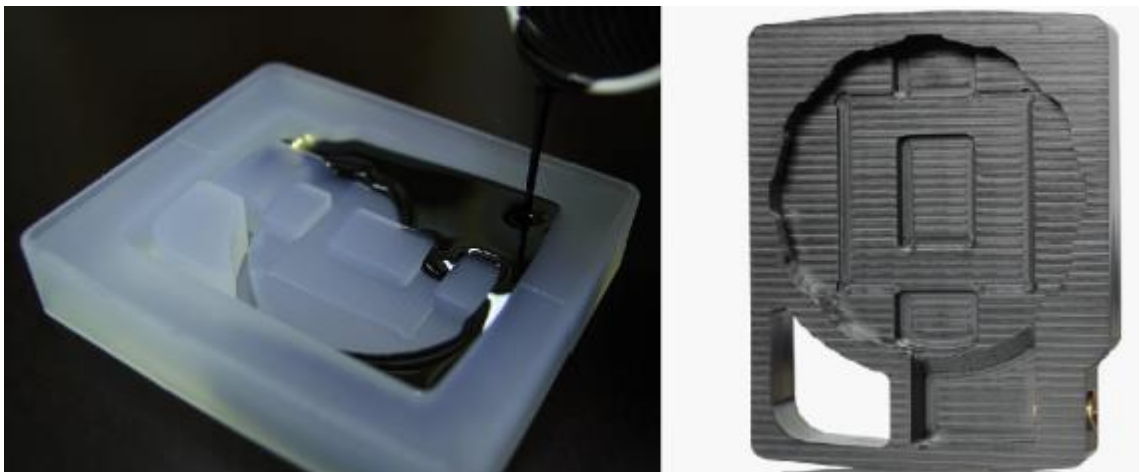
Hartsivaluilla kohdataan muutamia haasteita, kuten pinnanlaatu- ja toleranssiongelmiä, joita ratkotaan kokeellisesti teoriaosuuden tietoa hyödyntäen. Työn lopussa valmistetaan alpha-prototyypit ja lähetetään ne kokeiltavaksi testiryhmälle, joiden kommenttien perusteella tehdään viimeiset muutokset ennen tuotannon ylösajoa.

2 Hartsivalaminen

2.1 Valmistusmenetelmä

Hartsin valaminen on yksi muoviosien valmistusmenetelmistä, jossa käytetään synteettisiä hartseja. Valuhartsit ovat yleensä 2-komponenttisia hartsisysteemejä, jotka kovettuvat muoviksi, kun aineet on sekoitettu yhteen. Alussa hartsit ovat nestemäisessä muodossa, kunnes niihin lisätty kovetusaine käynnistää kemiallisen reaktion muodostaen kiinteää muovia. Ennen kuin hartsi on ehtinyt kovettua, se lisätään muottiin, jossa se saa valmistettavan kappaleen muodon (kuva 2). Hartsivaluissa käytetään mm. epoksi-, polysteri- ja polyuretaanihartseja, jotka kuuluvat kertamuoveihin. Toisin kuin kestopuveja, niitä ei voi enää kuumentamalla muokata uudelleen. [6.]

Valaminen voi olla hyvinkin yksinkertaista, siinä tarvitaan vain muotti, hartsia, sekoitustastia ja sekoitustikut. Kun hartsin komponentit on sekoitettu yhteen, se kaadetaan manuaalisesti joko suoraan muottiin tai syöttökanavaan. Hartsivalaminen voidaan suorittaa myös automatisoidussa hartsauskammiossa, mutta tässä työssä käsitellään enemmän valumenetelmiä, jotka soveltuvat lähes kaikille matalien laiteinvestointien takia. Hartsit ovat kuitenkin myrkyllisiä ja vaativat erillisen työskentelytilan. Yleisiin turvallisuusvinkkeihin kuuluvat: hyvä ilmastointi, hengityssuojain ja ihokontaktilta suojautuminen. Aineiden turvatiedotteet pitää lukea ja ymmärtää ennen niiden käyttöä. [7.]



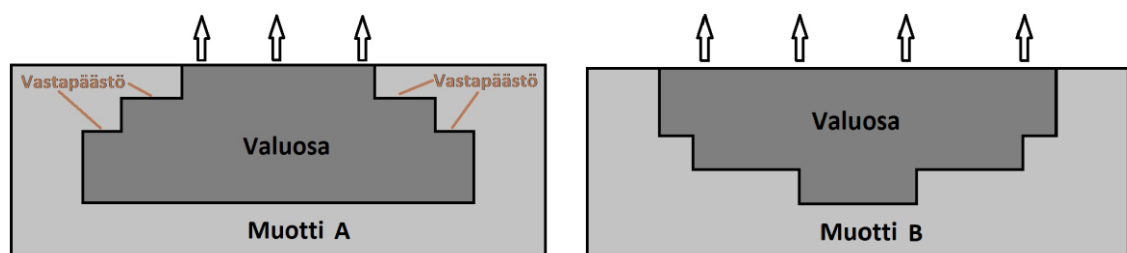
Kuva 2. Vasemmalla hartsi valetaan muottiin, oikealla kovettunut muoviosa.

Valamisessa voidaan käyttää monentyyppisiä muotteja, riippuen mm. valmistettavan osan muodosta, toleransseista ja tuotantomäärästä. Muottien valmistaminen tapahtuu yleensä mallikappaleen avulla. Mallikappaleen päälle valetaan esimerkiksi muottisilikonina, jolloin saadaan tarkka negatiivi valmistettavasta osasta. Muotti voidaan myös tehdä suoraan ilman mallikappaletta esimerkiksi koneistamalla tai 3D-tulostamalla (kuva 3). [8.]



Kuva 3. 3D-tulostettu muotti [9].

Joustavat muottimateriaalit, kuten RTV-silikoni ja polyuretaanikumi, ovat käytännöllisiä muottiaineina, sillä joustavuuden ansiosta valetut osat voidaan irrottaa venyttämällä ja taivuttamalla muottia. Joustavuus voi mahdollistaa lieviä vastapäistöjä, jotka ovat muotoja, mitkä estävät osan irtoamisen muotista (kuva 4). Liian vaativat muodot voivat joustavillakin muoteilla estää valetun osan irrottamisen, jolloin täytyy tehdä muutoksia muottiin, valuosaan tai materiaalivalintoihin [10, s. 9]. Joustavien muottimateriaalien heikkous on niiden lyhyessä käyttöiässä, johon vaikuttaa myös käytetty valu- ja irrotusaine.



Kuva 4. Vastapäästöt estävät osan irrottamisen muotista, ja ne on huomioitava muotteja suunniteltaessa.

Jäykät muotit voivat olla valmistettu esim. koneistamalla alumiinista tai 3D-tulostettu muovista. Metallimuotit kestävät valuhartseja erinomaisesti, ja niitä suositaan silloin, jos

tarvitaan mahdollisimman paljon irrotuskertoja. Haittapuolena ne ovat hyvin kalliita, varsinkin verrattuna muottisilikoneista valmistettuun muottiin [5]. Jäykät muotit voivat tarvita jonkinlaisen ulostyöntömekanismin, jotta valettu osa saadaan pois muotista. Tällöin muotit monimutkistuvat, sillä ne koostuvat monesta osasta, joiden pitää toimia tarkasti yhdessä.

2.2 Valuhartsien ominaisuudet

Valuhartseilla on lukuisia ominaisuuksia, kuten mekaaniset, kemialliset, lämpö- ja sähköominaisuudet, jotka pitää ottaa huomioon riippuen käyttökohteesta. Esimerkiksi osaa suunniteltaessa pitää ottaa huomioon siihen kohdistuvat rasitukset ja voimat, sekä valita valumateriaali, joka tarjoaa näihin riittävät mekaaniset ominaisuudet.

Valuhartsien teknisistä tiedotteista löytyy usein samoja arvoja kuin kestopuoveista tai metalleista, kuten veto- ja puristuslujuus, kimmomoduuli ja murtovenymä. Teknisistä tiedotteista löytyy myös muita valuhartseille tärkeitä ja erityisiä ominaisuuksia, jotka käydään läpi seuraavassa kappaleessa. Riippuen hartsivalmistajista, tuoteselosteiden laajuus ja tiedon määrä vaihtelevat.

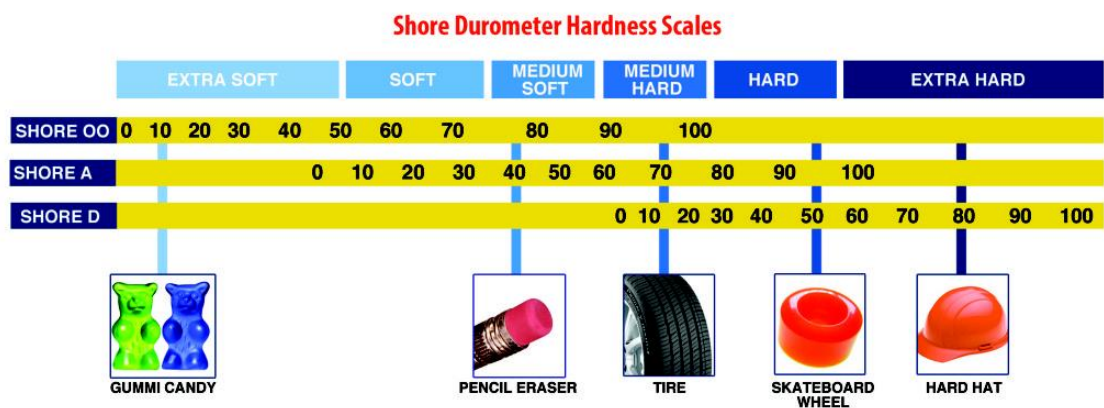
Taulukossa 1 nähdään esimerkki EasyFlo:n muutamista polyuretaanihartsien fysikaalisista ominaisuuksista. Muokkaamalla hartsien kemiallista koostumusta ja lisäaineita on luotu useita erilaisia hartsisysteemejä, jotta ne kattaisivat mahdollisimman paljon erilaisia käyttökohteita.

Taulukko 1. EasyFlo:n polyuretaanihartsien fysikaalisia ominaisuuksia [11].

PHYSICAL PROPERTIES							
EasyFlo Product	60	95	120	Clear	100FR	Spray FR	Spray Foam FR
Mix Ratio, By Volume	1A:1B	1A:1B	1A:1B	1A:1B	1A:1B	1A:1B	1A:1B
Mix Ratio, By Weight	100A:90B	100A:90B	100A:90B	100A:90B	1A:1B	100A:90B	100A:90B
Hardness, Shore D	65	65	65	72	65	75	NA
Pour Time (min; 1-lb mix)	2-2.5	5	2-2.5	2-2.5	2-2.5	NA (spray)	NA (spray)
Demold Time (min)	15-30	20-60	15-30	15-30	15-30	5-10	5-10
Specific Gravity	1.03	1.03	1.03	1.03	1.10	1.16	1.16
Cured Color	White	Off White	White	Amber	Off White/Tan	Off-White	Off-White
Initial Mixed Viscosity (cP)	60	95	120	110	120	250	250
Specific Volume (in ³ /lb)	26.9	26.9	26.9	26.9	25.2	23.9	216
Maximum Exotherm (°F) (For a 1-lb mass)	230	206	200	208	199	199	199

Sekoitussuhde ilmoittaa kuinka paljon valuaineiden eri komponentteja sekoitetaan yhteen, jotta saadaan onnistunut kovettuminen. Yleensä valuaineet ovat 2-komponentti-systeemejä. Sekoitussuhde vaihtelee eri tuotteilla, ja se voidaan ilmoittaa joko painon tai tilavuuden mukaan. Aineiden tarkka sekoittaminen ja oikeassa sekoitussuhteessa pysyminen on tärkeää, jotta saavutetaan hartsin onnistunut kovettuminen. [11.]

Kovuus ilmoitetaan yleisimmin Shore mitta-asteikoilla. Testimenetelmässä mitattavan materiaalin pintaa painetaan standardin mukaisella voimalla ja mittapäällä, minkä jälkeen mitataan painauman syvyys. Joustavat elastomeerit ilmoitetaan Shore A-asteikolla, kun taas kovat kumit ja muovit Shore D-asteikolla. Asteikot limittyvät päällekkäin, ja niissä korkeampi arvo tarkoittaa kovempaa materiaalia (kuva 5).



Kuva 5. Shore-kovuusasteikko [11].

Muottisilikonit ja polyuretaanielastomeerit luokitellaan yleensä kovuuden mukaan, sillä se antaa kuvaa materiaalin muista ominaisuuksista, kuten jäykkyydestä ja maksimiveivymästä. Muottien joustavuus on tärkeä ominaisuus siksi, että se helpottaa vaikeamuotoisten valuosien irrottamista muotista. Liian joustava muotti taas ei pysty kannattelemaan kunnolla omaa rakennettaan, jolloin se voi vaatia erillisen tukirakenteen. [12.]

Viskositeetti ilmaistaan dynaamisen viskositeetin suureella, joka on mitattu sentti-poiseina ($1 \text{ CPS} = 1 \text{ mPa}\cdot\text{s}$). Matala viskositeetti helpottaa aineiden sekoittamista, valamista, sekä niissä muodostuneen ilman poistumista nesteestä. Lämpötilalla on myös vaikutusta viskositeettiin, sillä lämmin hartsin on juoksevampaa kuin kylmempi, mitä voidaan hyödyntää valamisessa. [11.]

Työstöaika ilmoittaa, kuinka kauan kestää osien A ja B sekoittamisen jälkeen, ennen kuin seos on kovettunut siihen pisteeseen, että hartsi ei ole enää työstettävissä. Riippuen muotin tilavuudesta ja hartsin valunopeudesta, työstöajan pitää olla riittävä, jotta valaminen ehditään suorittamaan ennen hartsin jähmettymistä. Liian pitkä työstöaika taas hidastaa osien kovettumista ja valmistumisnopeutta. Nopeasti kovettuvissa hartseissa eksoterminen reaktio on yleensä voimakkaampi, eli ne tuottavat enemmän lämpöä. Niillä on myös taipumusta vääntyä, vääristyä ja kutistua enemmän. [10, s. 76 - 77.]

Muotista irrotusaika kertoo, kuinka kauan pitää odottaa, kunnes hartsi on tarpeeksi kovettunutta irrotettavaksi muotista. Täydellinen kovettuminen, jolloin hartsi on saavuttanut mekaaniset ominaisuutensa, voi tapahtua vasta monen päivän kuluttua. Toiset hartsit vaativat täysin kovettuakseen uunittamista, jossa valuosa viedään kohotettuun lämpötilaan vielä sen ollessa muotissa tai muotista irrotettuna. Huomioitavaa on, että työstö-, irrotus- ja kovettumisaika on yleensä mitattu huoneenlämmössä, jolla on vaikutusta kuivumisnopeuteen. Korkeampi lämpötila nopeuttaa kovettumista, kun taas kylmempi hidastaa sitä. [11.]

Kovettunut väri on väri, johon hartsi luonnollisesti kovettuu. Se vaihtelee eri hartseilla, jotka eroavat myös läpinäkyvyydessä. Hartseihin voidaan myös sekoittaa niihin soveltuvia väriaineita, joilla voidaan muokata kovettunutta väriä. [11.]

Eksoterminen reaktio on kemiallinen reaktio, jossa vapautuu lämpöä. Hartsin kovettuminen on eksotermistä. Eksotermia lisääntyy valuosan massan kasvaessa, ja on suurissa seinämäpaksuuksissa voimakkaampaa. Tuoteselosteissa voidaankin ilmoittaa valuosien maksimi seinämäpaksuus. Korkea eksotermia yleensä kiihdyttää kovettumisreaktiota entisestään, mikä lisää kutistumista ja sisäisiä jännityksiä. [13.]

Eksotermiaan vaikuttaa myös käytetty kovettaja ja lisäaineet. Yleensä hitaasti kovettuvilla hartseilla eksoterminen reaktio on pienempi. Lisäaineet, kuten alumiinihydroksidi (ATH), vaikuttaa hartsin lämmönjohtavuusominaisuuksiin ja hajauttaa eksotermistä reaktiota. [14.]

Kutistuminen on hartsienvälisten kovettumisessa tapahtuva ilmiö, joka johtuu siitä, että molekyylien verkottuessa (hartsin kovettumisilmiö) ne vievät vähemmän tilaa. Toinen syy kutistumiselle on lämpölaajeneminen, eli tässä tapauksessa osa kutistuu viilentyessään

eksotermisestä reaktiosta [15]. Eri hartseilla, kuten polyuretaanilla ja polyesterilla on suuri ero kutistumisessa.

Valaessa kutistuminen voi aiheuttaa sisäisiä jännityksiä, pintavirheitä ja heikkoja rakenteita. Muotin syöttöportissa pitäisi olla ylimääräistä hartsia, joka täydentää kutistuneen hartsin muotin sisällä. Vaihtelevat seinämäpaksuudet voivat olla ongelmallisia, sillä ne voivat kovettua eri aikoihin eksotermisen reaktion takia. Tällöin ylimääräinen hartsi syöttöportissa ei välttämättä pääse täydentämään kutistunutta hartsia, koska hartsi on kovettunut epätasaisesti läpi osan. [16.]

Lasittumislämpötila on lämpötila, jossa kertamuovin mekaaniset ominaisuudet huomattavasti heikentyvät, sekä se muuttuu kovasta materiaalista pehmeäksi ja kumi-aiseksi. Tämä johtuu siitä, että matalissa lämpötiloissa polymeerin molekyylit ovat lukittuina ja voivat vain värähdellä paikallaan, kun korkeassa lämpötilassa ne voivat liikkua vapaammin.

Verrattaessa kestumuoveihin, kertamuovit verkottuvat ja kovettuvat kemiallisen reaktion takia, joten niitä ei voida sulattaa ja muokata uudelleen korkeassa lämpötilassa. Altistuminen pitkäksi ajaksi yli lasittumislämpötilan voi vaurioittaa pysyvästi materiaalin ominaisuuksia. Lasittumislämpötilaan vaikuttavat hartsin kemiallinen koostumus ja kovettamislämpötila. [17.]

Jälkikövetus on ylimääräinen aika/lämpötila, jolla nopeutetaan hartsin kovettumista (verkottumista). Jälkikövetus voidaan ohjeistaa suoritettavaksi erityisellä aika-/lämpöprofiililla, jossa lämpötilaa nostetaan porrastetusti ylös tietyin aikaväleihin. Vaikka jälkikövetus kohotetussa lämpötilassa ei ole kaikille hartseille pakollista, sillä yleisesti saavutetaan hartsin parempi kovettumisaste, joka vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin ja lasittumislämpötilaan.

Valmistettujen osien jälkikövetus voidaan suorittaa joko suoraan muotissa tai niistä irrotettuna. Huomioitavaa on kuitenkin se, että muotin ja irrotusaineen on kestettävä käytetty lämpötila. Jos jälkikövetus suoritetaan muotista irrotetulle osalle, se voi vaatia tukirakenteen, joka pitää sen muodossa kovettumisen aikana. Yleisesti lämpöä paremmin kestävät hartsit vaativat korkeampaa jälkikövetuslämpötilaa, mikä voi vaikuttaa laitevaatimuksiin ja valmistuskustannuksiin. [18.]

2.3 Valuaineet

2.3.1 Muottisilikonit

Muottisilikonit ovat 2-komponenttisia (A + B) RTV-silikoneja (Room Temperature Vulcanizing), jotka koostuvat perusaineesta ja katalyytistä. Sekoitettuaan ne vulkanoituvat huoneenlämmössä muodostaen kiinteän ja joustavan aineen, joka soveltuu varsinkin muottimateriaaliksi. Muottisilikoneja on saatavilla eri kovuuksilla pehmeästä keskikovaan (n. Shore A 10 - 60). [10, s. 8.]

Silikoneista voidaan valmistaa muotti sivellin- ruisku- ja kaatotekniikalla. Muotin valmistukseen tarvitaan myös mallikappale, jonka päälle silikoni laitetaan. Kun silikoni on esimerkiksi kaadettu mallikappaleen päälle, saadaan muotti, joka on mallikappaleesta negatiivimuoto. Muottiin tallentuu erittäin tarkasti mallikappaleen muoto ja tekstuuri. [19.]

Silikonilla on luonnollisesti erittäin hyvä irtoavuus, joka on muottimateriaaleille tärkeä ominaisuus. Tämä mahdollistaa sen, että silikonimuottiin voi useimmiten valaa ilman irrotusaineen käyttöä, jolloin poistuu yksi ylimääräinen valmistusprosessin vaihe. Irrotusaineita käyttämällä saadaan kuitenkin pidennettyä muotin käyttöikää, koska hartsi reagoi kemiallisesti silikonin kanssa kuluttaen sen pintaa jokaisella valukerralla. Silikoni tarttuu kuitenkin silikoniin, jolloin irrotusaineen käyttö on välttämätöntä. [10, s. 77 - 78.]

Muottisilikonien yhtenä heikkoutena on niiden korkea viskositeetti, eli ne ovat hyvin jähmeitä. Sekoitettaessa osat A ja B keskenään tai valettaessa muottia, voi muodostua paljon ilmaa, joka on poistettava tiiviin ja reiättömän muotin aikaansaamiseksi. Toiset silikonit ovat juoksevampia ja ilma voi poistua luonnollisesti, mutta yleensä se vaatii vakuoinnin. Siinä sekoitettu silikoni viedään vakuumisäiliöön, jossa ilmakuplat suurenevat ja poistuvat helpommin nesteestä (kuva 6).



Kuva 6. Vakuumisäiliössä ilmakuplat suurenevat paineen laskiessa [20].

RTV-silikoneja on kahdenlaisia: additiokovettuvat ja kondensaatiokovettuvat. Additiokovettuvissa silikoneissa katalyyttinä toimii platina, kun kondensaatiokovettuvassa se on tina. Suurimmat erot tulevat niiden hinnassa, kutistumisessa ja käytettävyydessä muottia valmistettaessa. [10, s. 8.]

Additioverkottuvat silikonit ovat hieman kalliimpia sekä herkempiä ilmiölle, jossa silikoni ei kovetu kunnolla ollessa kontaktissa tiettyjen materiaalien kanssa. Kovettumisongelma on mahdollista korjata pinnoittamalla malli esim. lakalla tai irrotusaineella. Yhteensopiavuus kannattaa varmistaa kontaktissa olevien materiaalien kanssa, sekä varata työkalut ja laitteet erikseen additioverkottuvien silikonien työskentelyyn kontaminaation estämiseksi. [10, s. 8.]

Additiokovettuvat silikonit soveltuvat paremmin tarkkuutta vaativiin osiin, sillä niiden kutistuma on hyvin pieni tai lähes mitätön, kun kondensaatiokovettuvien kutistuma on noin 1 %. Additiokovettuvat silikonit säilyvät myös pidempään käyttämättömänä, sillä kondensaatiokovettuva silikoni on biohajoava ja kuluu ajan myötä. [21.]

2.3.2 Polyuretaanit ja polyuretaanelastomeerit

Polyuretaani (PU) valmistetaan sekoittamalla keskenään sen kahta pääraaka-ainetta polyolia ja isosyanaattia. Pääraaka-aineiden koostumus ja lisätyt apuaineet muokkaavat aineiden kemiallista reaktiota ja polyuretaanin ominaisuuksia. Lopputuloksena voi olla huokoisia (PU-foamit), joustavia (PU-elastomeerit) tai tiiviitä, sekä mekaanisilta ominaisuuksiltaan hyvin vaihtelevia polyuretaaneja. [22, s. 7 - 8.]

Polyuretaanelastomeerit ovat erittäin joustavia, ja ne palautuvat nopeasti alkuperäiseen muotoonsa, kun venymän aiheuttanut voima poistetaan. PU-elastomeerit voivat olla vaihtoehto muottisilikoneille seuraavin edellytyksin:

Edut:

- edullisempi
- matalampi viskositeetti, ei välttämättä tarvitse käyttää vakuuissa
- pienempi lämpölaajeneminen
- parempi kulutuksen kestävyys.

Haitat:

- huono irtoavuusominaisuus eli vaatii aina irrotusaineen
- valmistusvaiheessa herkkä ilmankosteudelle
- heikompi lämmönkestävyys.

[12.]

Jäykät polyuretaanit voivat parhaimmillaan mekaanisilta ominaisuuksilta muistuttaa rakenteellisia muoveja, kuten polykarbonaattia tai akryyliä. Taulukossa 2 näkyy yleisimpien kestumuovien taivutuslujuus, taivutusmoduuli ja iskutkeys. Harrastajille suunnatut polyuretaanit voivat olla helpompia työstää, esim. matalampi viskositeetti, tai ne eivät tarvitse jälkikivetusta, mutta niillä voi olla heikommat mekaaniset ominaisuudet. [23.]

Taulukko 2. Yleisten kestumuovien ja PU:n mekaanisia ominaisuuksia [23].

Material name	Flex strength (MPa)	Flex modulus (GPa)	Notched Izod (J/m)	Typical uses
HDPE	30	1.0	70	Cutting boards. Common stock for hobby CNC.
Polystyrene	40	3.2	40	Yogurt cups, party tableware, model aircraft.
Polypropylene	50	1.2	100	Food storage, chemically-resistant bottles.
HI-PS	60	1.9	105	Toys, various other commodity items.
ABS	80	2.2	340	LEGO bricks & other toys. Stock for FDM.
PLA	80	3.7	25	Compostable tableware. Stock for FDM.
PVC (pipe grade)	100	2.5	40	Water pipes, window frames.
Polycarbonate	100	2.5	700	CDs, DVDs, fighter jet canopies.
Acrylic glass	110	3.2	20	Fish tanks, aircraft canopies, signage.
Nylon	110	3.4	30	Plastic servo gears, assorted mechanisms.
PEEK	170	4.1	50	Niche engineering uses (high cost).

Material name	Chemistry	Flex strength (MPa)	Flex modulus (GPa)	Notched Izod (J/m)	Notes
Smooth-On Smooth-Cast 300	PU	31	0.9	N/A	Popular "durable" casting resins targeted at hobby & artistic users.
Smooth-On Smooth-Cast 385	PU	41	3.0	N/A	
Freeman 1080	PU	66	2.0	17	
ADTECH EC-426-2	epoxy	68	2.8	23	Representative example of an unfilled epoxy system.
Reichhold DION FR 7704	polyester	71	3.6	13	Representative example of an unfilled polyester casting resin.
Smooth-On TASK 9	PU	82	2.4	N/A	Higher end of polyurethanes marketed to hobbyists.
Innovative Polymers OC-7086	PU	110	2.4	64	High-performance polyurethanes targeted at professional users.
Huntsman RenCast 6491	PU	110	2.8	64	
Innovative Polymers IE-3075	PU	117	2.9	37	

2.3.3 Epoksit ja polyesterit

Epoksihartsit ja polyesterihartsit vaativat kovetteen/katalyytin, jotta ne muuttuvat nestemäisestä muodosta kiinteäksi muoviksi. Polyuretaaneihin verrattaessa niiden suurimmat heikkoudet hartsivalamisessa ovat suurempi kutistuminen, heikompi yhteensopivuus silikonimuotteihin ja huonompi UV-kestävyys. [12.]

Epokseja käytetään mm. lujitemuoveissa, liimoissa ja pinnoitteissa. Polyesterihartsit ovat edullisempi vaihtoehto epokseille, minkä takia ne ovatkin erittäin suosittuja lujitemuovi-teollisuudessa. Polyestereillä on kuitenkin epokseihin verrattuna yleensä huonommat mekaaniset- ja liimautumisominaisuudet, heikompi lämmön- ja säänkesto, sekä suurempi kutistuma. [24, s. 65.]

2.3.4 Lisäaineet

Valuhartseja tehdään moneen tarkoitukseen erilaisilla lisäaineilla, mutta joissain tapauksissa on edullisempaa ja kätevämpää hankkia vähemmän eri hartsilaatuja ja muokata ominaisuuksia itse käyttötarkoituksen mukaan.

Piituhka paksuntaa hartsia eli lisää sen viskositeettia, sekä vaikuttaa sen tiksotrooppisiin ominaisuuksiin. Näin hartsista voi tehdä helposti siveltävän aineen, joka pysyy hyvin pystypinnoilla. Hartsivaluissa tätä voidaan hyödyntää esimerkiksi, jos halutaan sivellä muottiin ensin pintakerros (gelcoat), ennen hartsin valamista. Näin saadaan varmistettua valuosan ulkokuoren hyvä pinnanlaatu, sekä mahdollisesti käyttää eri materiaalia valuosan pinnassa ja ytimessä.

Mikropallot ovat onttoja täyteaineita, jotka on tehty joko lasista tai fenolista. Lasipallot keventävät hartsia ja helpottavat sen työstettävyyttä, kuten hiomista ja koneistamista.

Lasi- ja hiilikuituhakkeella voidaan lisätä mekaanisia ominaisuuksia, kuten jäykkyyttä ja vetolujuutta. Pidempi kuitu tuo lujuutta enemmän, mutta vaikeuttaa hartsin valamista.

Alumiinihydroksidi vähentää kutistumista ja lisää lämmönjohtavuutta, jolloin hartsien eksotermien reaktio vähenee mahdollistaen paksumpien valujen tekemisen. Alumiinihydroksidi kuitenkin lisää hartsin painoa, sillä sen tiheys hartsiin verrattuna on yli kaksinkertainen.

Väriaineilla voidaan helposti värjätä hartseja ja vähentää valmistuskustannuksia, sillä osan maalaaminen ei välttämättä ole enää tarpeellista. Väriaineilla voidaan saavuttaa vahvoja läpinäkymättömiä värejä, tai jos hartsi on luonnostaan kirkas, niin läpikuultavia värivaihtoja.

2.4 Laitevaatimukset ja tarvikkeet

Hartsivalaminen on käyttäjäystävällinen valmistusmenetelmä, jossa laitevaatimukset ovat niin pienet, että lähes jokainen pystyy valmistamaan omia muoviosia harraste- ja teollisuuskäyttöön. Tarpeellisia asioita ovat:

- mallikappale, josta voidaan valmistaa muotti (mallikappaleita ei tarvita, jos muotti valmistetaan suoraan esim. jyrsimällä tai 3D-tulostamalla)
- muotti, johon valaminen suoritetaan
- valuaineet ja mahdolliset lisäaineet
- apuvälineet (sekoitusastiat, -välineet, vaaka, purseenpoistovälineet)
- irrotusaineet
- suojavälineet (silmä- käsi- ja hengityssuojain)
- vakuumisäiliö ja vakuumpumppu (vaihtoehtoinen)
- ylipainesäiliö ja kompressori (vaihtoehtoinen).

2.4.1 Apuvälineet ja lisälaitteet

Hartsin eri komponenttien sekoittamiseen käytetään yleensä edullisia ja kertakäyttöisiä välineitä, sillä hartsin kovettuessa sitä on hyvin vaikea poistaa. Kun hartsin osat A+B on kaadettu astiaan, sekoittaminen suoritetaan huolellisesti ja tasaisesti, ettei seokseen muodostu ilmakuplia. Huonosti sekoitettu hartsi jättää valettuun osaan pehmeitä ja tahmeita kohtia, joissa hartsi ei ole täysin kovettunut. Hartsin osien A+B tarkkaan mittaamiseen voidaan käyttää vaakaa.

Valuosien viimeistelyyn voidaan tarvita apuvälineitä, kuten viilaa ja hiomapaperia. Moniosaisten muottien liitoskohdasta tulee valuosaan purse, jota voidaan tarvittaessa siistiä. Muotin syöttö- ja ulostuloreiästä tulee myös valuosaan jäljet, jotka voivat vaatia niiden katkaisua ja viimeistelyä.

Vakuumisäiliötä ja -pumppua käytetään ilman poistamiseen valuaineesta. Ilmaa voi muodostua hartseja sekoittaessa tai valaessa se muottiin. Käytännössä vakuumisäiliöön asetetaan sekoitusastiassa oleva valmiiksi sekoitettu hartsi, minkä jälkeen säiliö suljetaan tiiviiksi. Sen jälkeen käynnistetään vakuumpumppu, joka laskee säiliön painetta. Kun paine laskee, hartsissa olevat ilmakuplat suurenevat, jolloin ne nousevat helpommin pintaan ja poistuvat aineesta. Näin saadaan ilmatonta hartsia, joka voidaan kaataa normaalissa ilmanpaineessa muottiin. Vakuumisäiliöön voi myös laittaa muotin, johon hartsi on kaadettu. Tällä koitetaan poistaa valamisen seurauksena muottiin jääneitä ilmataskuja.

Vastaavasti ylipainesäiliössä voidaan kompressorin avulla nostaa painetta, jolloin ilmakuplat pienenevät. Muottiin kaadettu hartsi on pidettävä ylipaineessa, kunnes se on tarpeeksi kovettunut, jotta ilmakuplat eivät uudelleen suurene paineen laskiessa. Ylipaineessa ilmakuplista ei pääse kokonaan eroon, mutta niistä voidaan saada tarpeeksi pieniä, jotta ne eivät vaikuta huomattavasti mekaanisiin ominaisuuksiin tai pinnanlaatuun.

2.4.2 Suojavälineet

Valutöissä on monia aineita, mm. hartsit ja irrotusaineet, jotka voivat olla vaarallisia mm. nieltynä, hengitettynä ja ihokosketuksessa. Ennen aineiden käyttöä on luettava ja ymmärrettävä niiden turvallisuustiedotteiden sisältö, joissa ilmoitetaan tarpeelliset suojavälineet ja hätätoimet tapaturman sattuessa. Yleisiin turvallisuuskäytännöihin kuuluvat: hyvä ilmastointi, hengityssuojain ja ihokontaktilta suojautuminen. Valuaineita ei saa käyttää kotona, vaan hyvin ilmastoidussa tallissa tai erillisessä työtilassa. Turvallisuusohjeiden laiminlyöminen voi johtaa valuaineiden herkistymiselle ja allergisoitumiselle, joiden oireita ovat mm. hengitysvaikeudet, kurkkukipu ja ihottuma. [7.]

2.4.3 Muotit

Muottien valmistukseen on useita eri menetelmiä, joihin löytyy tarkkoja ohjeita ja videoita valutuotteiden valmistajilta. Tässä tutkimuksessa käydään läpi vain korkkaustyökalussa käytettyjen muottityyppien valmistaminen, sekä yleisesti muottien yleispiirteitä. Muotti voidaan valmistaa joko mallikappaleen avulla, tai työstämällä se suoraan halutusta materiaalista, kuten alumiinista. Muottiaineen valintaan vaikuttaa mm. tavoiteltu

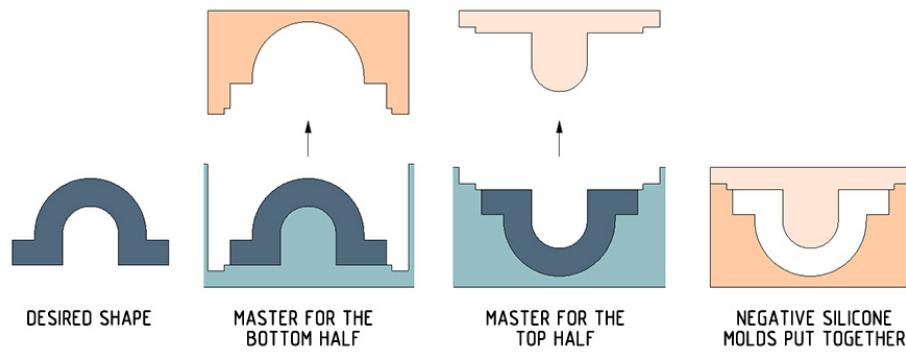
irrotuskertojen määrä sekä käytetty valuaine. Muottien valmistusmenetelmiin vaikuttaa enimmäkseen valuosan koko ja geometria.

Pienestä mallikappaleesta (esim. korkkaustyökalu) muotti voidaan tehdä siten, että se asetetaan kaukaloon, johon kaadetaan muottisilikonია. Näin muottisilikoniiin kopioituu mallikappaleen negatiivimuoto (kuva 7). Isoissa osissa mallikappale voidaan ensin pinnoittaa ohuella kerroksella silikonია tai hartsia, minkä jälkeen siihen tehdään jäykkä tukirakenne esimerkiksi lasikuidusta tai kipsistä. Näin voidaan säästää muottiainetta, mutta koska muotti joudutaan tekemään monessa vaiheessa, sen tekemiseen kuluu enemmän aikaa ja vaivaa.



Kuva 7. Avoin muotti on valmistettu valamalla muottisilikonია kaukaloon.

Muotin suunnittelussa on huomioitava valettavan osan geometria ja siitä muottiin aiheutuvat vastapäästöt. Vaikka muottimateriaalin joustavuus auttaa vastapäästöihin, niin ne on silti hyvä minimoida mahdollisuuksien mukaan. Vastapäästöt aiheuttavat rasituksia irrotusvaiheessa, mikä voi monen irrotuskerran jälkeen johtaa muotin vaurioitumiseen. Vastapäästöjä voidaan välttää tekemällä moniosaisia muotteja, jolloin muotit puretaan moneen eri suuntaan valetun osan ympäriltä ja vastapäästöt vähentyvät tai poistuvat (kuva 8). [10, s. 9 - 11.]



Kuva 8. Kuvan kappale vaatii moniosaisen muotin, jotta se on valmistettavissa valamalla [12].

Hartsin valaminen avoimiin muotteihin tapahtuu yleensä kaatamalla hartsi rauhallisesti muotin matalimpaan kohtaan, josta se itsestään lähtee leviämään ja täyttämään muottia. Tarkoituksena on, että muotti täyttyy tasaisesti alhaalta ylös, jolloin siihen ei jäisi loukkuun ilmakuplia.

Suljetuissa muoteissa täytyy ottaa huomioon syöttö- ja mahdollisien ulostuloporttien sijainti, jotta muotti täytyisi mahdollisimman tasaisesti ja ilma pääsisi poistumaan muotin täytyessä hartsiin. Kuvassa 9 on POMista jyrsitty 2-osainen suljettu muotti, jossa on yksi hartsin syöttö- ja ulostuloreikä. Tässä tapauksessa muotti pidetään kallellaan valamisen aikana, jotta syöttöreikä sijaitsee matalampana kuin ulostuloreikä, jolloin ilma pääsee poistumaan paremmin muotin täytyessä. Joissain tapauksissa muottiin on porattava ylimääräisiä reikiä, jotta ilma pääsee poistumaan vapaasti. Syöttöreikiä suunniteltaessa on myös otettava huomioon hartsin kutistuminen kovettuessa. Syöttöreikiissä pitää olla ylimääräistä valuinetta, joka täyttää muotista hävinneen (kutistuneen) hartsin.



Kuva 9. 2-osainen muotti, jossa pulteilla kiristetty muottipuoliskot yhteen.

2.4.4 Irrotusaineet

Irrotusaine on tyypillisesti vaha tai neste, joka muodostaa kemiallisesti inertin (reagoimattoman) kalvon. Muottipinnalle levitettynä sillä saavutetaan suojakerros, joka estää valukappaleen kiinnittymistä muottiin. Ilman irrotusainetta hartsi voi liimautua muottiin kiinni, jolloin muotti vaurioituu käyttökelvottomaksi. Levitys suoritetaan aineesta riippuen maaliruiskulla, aerosolisumutteella tai käsin liinalla. Toiset irrotusaineet vielä kiillotetaan kiiltäväksi pinnaksi. Silikonimuotti ei välttämättä vaadi irrotusaineen käyttöä sen itseirtoamisominaisuuksien johdosta, mutta sillä voidaan kuitenkin pidentää muotin käyttöikä. [25.]

Tärkein huomioon otettava tekijä irrotusainetta valittaessa on yhteensopivuus muottimateriaalin ja valmistuksessa käytettävän hartsityypin kanssa. Esimerkiksi taulukossa 3 on HP-textilesin muutamia irrotusaineita, jossa on annettu soveltuvuuden mukaan tähtiä eri hartseille (epoksi, polyesteri, vinyylesteri ja polyuretaani). Listassa ei näy, onko kyseinen aine yhteensopiva muottimateriaalin kanssa, mikä on myös oleellista. Esimerkiksi silikonimuotit eivät kestä eräitä irrotusaineissa esiintyviä ohenteita. Irrotusaineen lämmönkestävyyden täytyy myös olla riittävä, jos hartsin eksoterminen reaktio on voimakas tai kovettaminen suoritetaan korkeassa lämpötilassa.

Taulukko 3. Irrotusaineiden ominaisuuksia kuvaava taulukko, jossa ilmoitetaan mm. soveltuvat hartsit ja levitysmenetelmät [26].

Products	SUITABLE FOR				APPLICATION WITH			CONSUMPTION g/m ²	DRY TIME ... minutes at 20°C	POLISH- ABILITY	FEATURES / SUBSTRATE
	... Epoxy- resins	... Polyester- resins	... Vinyloster- resins	... Poly- urethanes	... cloth (soft)	... sponge (fine-pored)	... spray gun				
HP-BM17 wax dispersion, liquid	+	+	+	-	++	+	++	30	15	+	Applicable on smooth, non-porous surfaces. Usable as primer for PVA. Residues can be cleaned with white spirit or thinner XB.
HP-G priming wax, viscous	C	C	C	C	+	-	-	30	5 - 15	o	NO single release agent! Primer for PVA. Residues can be cleaned with white spirit or thinner XB.
HP-PVA release film, liquid	++	++	++	++	+	++	++	60	5 - 10	-	Generates very safe release film. Priming with HP-G (or HP-BM17 or HP-CX7) is necessary. Residues can be cleaned with water.
HP-CX7 carnauba-wax, pasty	++	++	++	+	++	-	-	15 - 20	10 - 15	++	Polish in several layers. High-gloss release agent. Usable as primer for PVA. Residues can be cleaned with white spirit or thinner XB.
HP-HGR5 water based, liquid	++	++	++	++	+	++	++	20 - 25	5 - 15	++	Water based – 100% free of solvents! Very good release effect with PUR (IMC). Residues can be cleaned with water.

++ = very good applicable + = applicable o = conditionally applicable - = not provided C = in combination

Irrotusaineita on saatavissa puolipysyviä ja ei-pysyviä. Puolipysyvät tarttuvat muottipintaan, ja aineen siirtyminen valukappaleeseen on minimaalinen. Ei-pysyvät irrotusaineet siirtyvät valukappaleeseen, ja ne levitetään uudelleen jokaisen irrotuksen jälkeen. Irrotusaineen siirtyminen valukappaleeseen voi olla epätoivottua siinä tapauksessa, jos sitä ollaan liimaamassa tai maalaamassa, jolloin se on huomioitava pintakäsittelyn esivalmistelussa kunnollisen tartunnan takaamiseksi.

Irrotusaineilla voi olla huomattava vaikutus valmiin kappaleen pinnan tekstuuriin, koska valuhartsit kopioivat muotin pintatekstuuriin erittäin tarkasti. Esimerkiksi kiillotettava irrotusvaha parantaa muottipinnan mikrotason sileyttä täyttämällä pinnan pieniä epätasaisuuksia. Vastaavasti toiset irrotusaineet voivat tehdä matan ja epätasaisen pinnan. Irrotusaineen levitysmenetelmällä on myös vaikutusta valetun osan pinnanlaatuun.

2.5 Valutekniikat

2.5.1 Perinteinen valaminen

Perinteinen valaminen soveltuu parhaiten yksinkertaisten osien valamiseen, jossa valaminen suoritetaan normaalissa ilmanpaineessa. Hyötynä on, että siinä ei tarvita mitään erikoislaitteita, mutta hartsiin voi helpommin jäädä ilmakuplia, jotka vaikuttavat mekaaniisiin ominaisuuksiin ja pinnanlaatuun.

Perinteisessä valamisessa hartsi kaadetaan muotin matalimpaan kohtaan ja annetaan sen levitä itsekseen muotin joka paikkaan. Jos muotti ei täyty tasaisesti, siihen voi jäädä ilmakuplia ja ilmataskuja. Avoimella muotilla ilmakuplat voivat päästä nousemaan pintaan, jossa ne poksahtavat joko luonnollisesti tai sitten esim. kuumailmapuhaltimen avulla. Jos hartsilla on hyvät ilmanpoistumisominaisuudet ja muotti on tarpeeksi avoin ilmakuplien poistumiseen, niin perinteisellä valamisella voidaan päästä hyvään laatuun. [10, s. 73.]

2.5.2 Vakuumivalaminen

Vakuumivalaminen on hyvin samantyylinen kuin perinteinen valaminen. Siinä hartsilla täytetty muotti viedään vielä muutamaksi minuutiksi vakuumisäiliöön, jossa ilmakuplat suurenevat paineen laskiessa, ja näin auttavat niitä nousemaan helpommin pois muotin

kaviteetista. Lopuksi vakuumisäiliöön lasketaan normaali ilmanpaine, jolloin jäljellä olevat ilmakuplat taas pienenevät. [20.]

On tärkeää huomioida, että vakuumisäiliössä hartsi ei pääse nousemaan yli syöttöportin/hartsisäiliön, mihin vaikuttavat alipaineen suuruus ja muotissa olevan ilman määrä. Tämä johtuu siitä, että ilmakuplien/-taskujen suurentuessa ne syrjäyttävät hartsia, mikä haluaa siirtyä pois muotista takaisin syöttöreikään. Vakuumivalaminen voidaan myös suorittaa automatisoidussa alipainehartsauskammiossa, jossa hartsi sekoitetaan ja kaadetaan muottiin vakuumissa, mutta ne ovat kalliita laitteita.

2.5.3 Painevalaminen

Painevalamisen ero perinteiseen valamiseen on siinä, että hartsilla täytetty muotti viedään vielä ylipainesäiliöön, jossa korkea paine puristaa ilmakuplat niin pieniksi, etteivät ne ole visuaalisesti havaittavissa. Muottia pidetään 30 - 100 psi:n ylipaineessa, kunnes hartsi on kovettunut. [10, s. 75.]

2.5.4 Vakuumi- ja painevalaminen

Vakuumin ja ylipaineen yhdistelmällä saadaan kaikkein tasaisimmin laadukkaita hartsivalettuja osia. Prosessissa hartsilla täytetty muotti viedään ensin säiliöön, johon ensiksi imetään muutamaksi minuutiksi alipainepumpulla alipaine, ja sen jälkeen paineistetaan 30 - 100 psi:n ylipaineella. Haittapuolena on se, että laitevaatimukset kasvavat ja hartsin työstöajan pitää olla riittävä prosessin suorittamiseen, jotta se ei kovetu enneaikaisesti. [10, s. 75.]

2.5.5 Gelcoat-menetelmä

Gelcoat on ohut hartsikerros, joka levitetään muotin pintaan ruiskuttamalla tai sivelemällä ennen varsinaista valamista. Näin saadaan esimerkiksi valmistettua osa, jossa on kiinteä pinta (gelcoat), mutta PU-foamista valmistettu kevyt ydin. Jos perinteisesti valetussa osassa jää ilmakuplia tai ilmataskuja, niin gelcoatilla voidaan myös saada täydellinen pinta, jolloin valamisen epäkohdat jäävät osan sisälle piiloon. Gelcoat-menetelmässä sivellään gelcoat muotin pintaan ja annetaan sen hetken kovettua, minkä jälkeen valetaan hartsi perinteisesti.

Haittana gelcoat-pinnan levittämisessä on valmistusnopeuden hidastuminen, sillä sen levittämiseen ja kovettumiseen menee aikaa. Gelcoat ei saa kuitenkaan olla täysin kovettunut ennen hartsin valamista, vaan sen on vielä oltava kemiallisesti aktiivinen, jotta valuhartsi tarttuu siihen kunnolla.

2.5.6 Rotaatiovalaminen

Tässä työssä rotaatiovalamisella tarkoitetaan hartseilla tehtyä rotaatiovalamista, eikä samannimistä kestopuoviosien valmistusmenetelmää. Rotaatiovalamisella saadaan valmistettua kevyitä ja onttoja kappaleita. Hartsi kaadetaan muottiin, minkä jälkeen sitä aletaan pyörittämään joko manuaalisesti tai koneellisesti, kunnes hartsi on kovettunut siihen pisteeseen, ettei se enää valu. Prosessi voidaan toistaa, jotta saadaan lisättyä seinämäpaksuutta. Paras lopputulos saavutetaan pyörittämällä muottia 360° tasaisella nopeudella. [19.]

2.5.7 Prässäysvalaminen

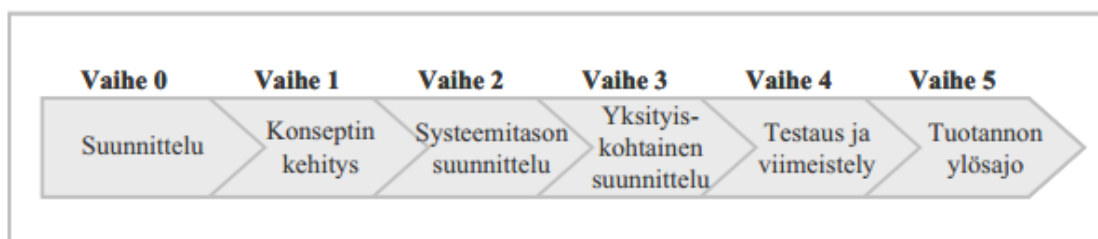
Prässäysvalamisessa käytetään 2-osaista muottia, joissa on vain mallikappaleen kaviteetti, sillä esim. kaatoreiälle ei ole tarvetta. Menetelmässä paksulla hartzilla täytetään molempien muottien kaviteetti siten, että hartsitaso tulee hieman muottitason yli. Muottipuoliskot prässäetään nopeasti yhteen ja lisätään muottien päälle painot, kunnes hartsi on kovettunut.

Prässäysvalamisella voidaan valmistaa edullisesti ja yksinkertaisesti kohtalalaisen monimutkaisia osia. Haittana on sen sotkuisuus, isot purseet ja heikko luotettavuus. Paksunnettu hartsi voi olla vaikeaa saada hyvin pieniin koloihin, sekä lopputuloksen näkee vasta kun osa on irrotettu muotista. Myös prässäysvaiheessa voi jäädä ilmakuplia osan sisälle. Yleensä rotaatio-, vakuumi- ja painevalamisella saadaan parempia tuloksia monimutkaisten osien valmistuksessa. [10, s. 75.]

3 Korkkaustyökalun tuotekehitys

3.1 Tuotekehityksen vaiheet

Tässä työssä hyödynnetään Ulrich & Eppingerin kuvaamaa yleistä tuotekehitysmallia [27], joka koostuu kuudesta vaiheesta (kuva 10). Systemitason suunnittelu on korvattu *Konseptin jatkokehityksellä*, joka paremmin kuvastaa tämän tapauksen etenemistä. Prosessi ei myöskään ole täysin suoraviivainen, sillä yksinkertaisissa tuotteissa *design-build-test*-sykli voi olla nopea, jolloin iterointi projektin vaiheiden välillä on mahdollista ja suotuisaa. Tuotekehityksen vaiheissa on yritetty keskittyä erityisesti siihen, mitä asioita otetaan huomioon juuri käytettäessä valuhartseja. Projektin eri vaiheet ovat seuraavat:



Kuva 10. Korkkaustyökalun tuotekehitys jaettiin kuuteen vaiheeseen [28, s. 7].

Vaihe 0. Suunnitteluvaihe, jota kutsutaan myös nollavaiheeksi, on tuotekehitysprojektin hyväksyntää ja käynnistystä edeltävä vaihe. Suunnitteluvaiheessa on tehty *Mission Statement*, jossa on määritetty työn tavoitteet, avainolettamukset ja rajoitukset.

Vaihe 1. Konseptin kehitysvaiheessa korkkaustyökalu on jaettu useisiin osatoimintoihin, joiden ratkottua se pystyy suorittamaan sille annetun päätehtävän eli prosessorin korkkauksen. Tärkeitä toimintoja oli mekaanisen energian tuominen laitteeseen, mekaniikan liikerata ja prosessorin tukeminen korkkauksen aikana. Näihin on katsottu eri ratkaisuja, joista parhaat on valittu konseptin jatkokehitykseen.

Vaihe 2. Konseptin jatkokehityksessä on mallinnettu ja valmistettu tuote, joka suorittaa aiemmin määritetyt osatoiminnot. Jatkokehitykseen päätyi kaksi eri tuoteratkaisua, jotka eroavat niiden valmistustavassa. Toisessa käytetään joustavia silikonimuotteja, kun taas toisessa jäykkiä alumiini/polyasetaalimuotteja.

Vaihe 3. Yksityiskohtaiseen suunnitteluun on valittu yksi tuoteratkaisu, joka viimeistellään lopulliseen muotoon. Tässä vaiheessa päätetään komponenttien lopulliset geometriat, toleranssit ja käytettävät irrotusaineet, sekä valitaan käytetyt standardiosat. Muotteihin tehdään vielä myös tarvittavat muutokset, jotta valuosissa päästään haluttuihin toleransseihin. Lisäksi tarkistetaan muottien käyttöelinikä piensarjatuotantoa ajatellen.

Vaihe 4. Testaus ja viimeistelyvaiheessa alpha-prototyypit lähetetään testiryhmälle kokeiltavaksi. Prototyypeillä kerätään tietoa korkkaustyökalun suorituskyvystä ja luotettavuudesta, sekä kerätään käyttäjäkokemuksia. Näiden perusteella vielä pohditaan, tehdäänkö muutoksia lopulliseen tuotteeseen tai valmistusmenetelmään.

Vaihe 5. Tuotannon ylösaajossa etsitään vielä piileviä vikoja tuotteesta tai valmistusmenetelmästä, sekä kerätään kokemusta todellisesta tuotantojärjestelmästä. Tuotannon tuottavuutta pyritään parantamaan standardisoimalla toimintatapoja, sekä optimoimalla valuhartsien kovettumislämpötilaa.

3.2 Suunnittelu

Suunnittelun lopputuloksena saatiin kuvan 11 mukainen Mission Statement, johon on sisällytetty mm. projektin tavoitteet, avainolettamukset ja rajoitukset.

Mission Statement: Korkkaustyökalu Intelin Prosessoreihin

Tuotekuvaus	<ul style="list-style-type: none"> • Käsin operoitava hartsivalettu korkkaustyökalu
Käyttäjäkunta	<ul style="list-style-type: none"> • Tietokoneharrastajat, ensisijaisesti Euroopassa
Tavoitteet	<ul style="list-style-type: none"> • Turvallinen ja luotettava toiminta • Kestää useita käyttökertoja • Hyvä valmistettavuus (edullinen ja nopea valmistaa) • Muotit kestävät useita irrotuskertoja • Näyttää työkalulta
Spesifikaatiot	<ul style="list-style-type: none"> • Paino alle 100g • Kooltaan kämmeneen sopiva
Avainolettamukset ja Rajoitukset	<ul style="list-style-type: none"> • Työkalu valmistetaan hartsivalamalla • Prototyypit ja mallikappaleet valmistetaan 3D-tulostimella tai CNC-jyrsimellä • Soveltuu Intelin Haswell, Skylake ja Kaby Lake -malleihin

Kuva 11. Projektin Mission Statement.

Korkkaustyökalun käyttäjät ovat enimmäkseen tietokoneharrastajia, jotka haluavat parantaa prosessorin suorituskykyä. Työkalun täytyy soveltua Intelin v. 2013 - 2017 julkaisujen prosessoreiden (Haswell, Skylake, Kaby Lake) IHS:n poistoon. Haasteena on hajottaa IHS:n ja PCB:n (Printed Circuit Board) välinen liimapinta prosessorin säilyessä täysin ehjänä.

Liimapinta voidaan hajottaa joko leikkaamalla veitsellä tai kohdistamalla siihen tarpeeksi rasi- tai rasi-työntämällä, vetämällä tai vääntämällä. IHS:n irrotusmekanismi on jo projektin alussa rajattu lineaariliikkeellä tai rotaatiolla toimivaksi, joka nähtiin turvallisempaan menetelmään verrattuna liimapinnan leikkaamiseen (kuva 12).

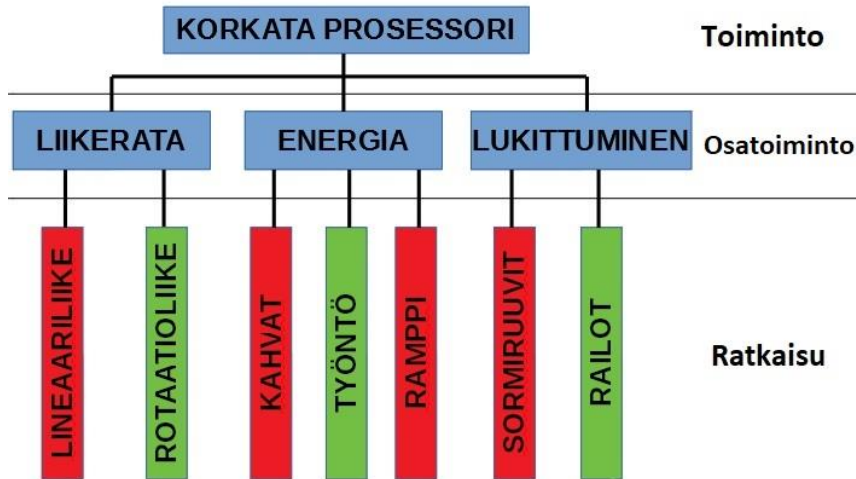


Kuva 12. IHS irrotetaan joko lineaari- tai rotaatioliikkeellä.

Laiteresursseina on käytössä 3-akselinen CNC-jyrsin, jolla valmistetaan tarvittavat muotit ja mallikappaleet, sekä prototyyppihin on mahdollista käyttää FDM-tekniikalla toimivaa 3D-tulostinta. Hartsivalamiseen löytyy vakuumi- ja ylipainesäiliö, joita voidaan käyttää eri valmistamismenetelmissä. Laiteresursseista puuttuu rotaatiovalulaite ja automatisoitu alipainehartauskammio.

3.3 Konseptin kehitys

Konseptin kehitysvaiheessa korkkaustyökalun toimintamekanismi jaettiin kolmeen osatoimintoon, joihin etsittiin ratkaisuja. Kuvassa 13 nähdään osatoiminnot liikerata, energia ja lukittuminen, joihin on esitetty ratkaisuvaihtoehtoja. Punaisella merkityt ratkaisut hyldettiin ja vihreällä olevat valittiin konseptin jatkokehitykseen.



Kuva 13. Korkkaustyökalun osatoiminnot ja ratkaisuvaihtoehdot.

3.3.1 Liikerata

Oleellisin tuotteen toimintaperiaatteessa on liikerata, eli irrotetaanko IHS rotaatio- vai lineaariliikkeellä. Mekanismi haluttiin valita projektin alussa, ja se suoritettiin valmistamalla prototyypit, joiden eroja vertailtiin käytännössä.

Lineaariliikkeellä toimivassa tuotteessa IHS joko vedetään tai työnnetään irti. Kuvan 14 mukainen prototyyppi A on valmistettu 3D-tulostamalla, jossa energia tuodaan pultti/kierreyhdistelmällä ja ohjurit ohjaavat liikkeen suunnan. Kuvassa olevat mustat sormiruuvit antavat ylä- ja alaosan liikkua vapaasti yhteen suuntaan, mutta estävät ylä- ja alaosan irtaantumisen toisistaan.



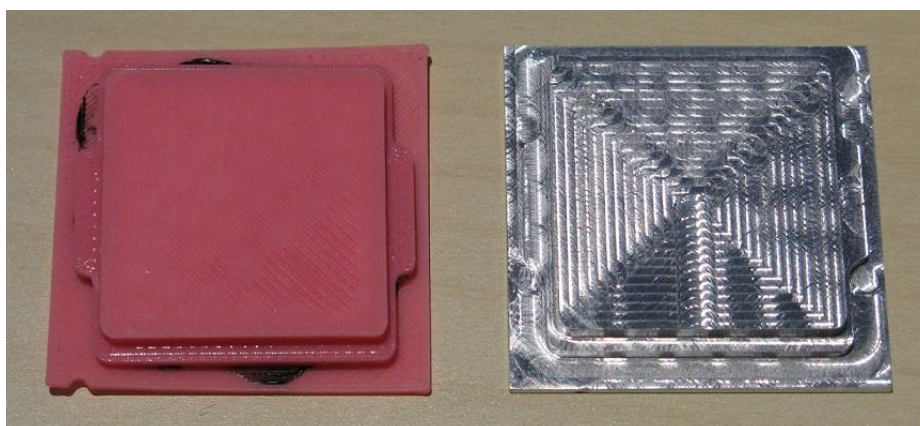
Kuva 14. 3D-tulostettu prototyyppi A, vasemmalla koottuna ja oikealla komponentit irrallaan.

Rotaatiolla toimivassa ratkaisussa IHS irrotetaan vääntämällä. Kuvan 15 prototyyppi B valmistettiin CNC-jyrsimällä POMia (polyasetaali). Prototyyppi B toimii prototyyppi A:n mukaan, mutta ohjurit aiheuttavat rotaatioliikkeen. Prototyyppi B:ssä ruuvi työntää toista ruuvia, jolloin metalli/metalli-kosketuspinta kestää hyvin siihen kohdistuneen pintapaineen.



Kuva 15. POMista CNC-koneistettu prototyyppi B, vasemmalla koottuna ja oikealla komponentit irrallaan.

Molemmat mekanismit olivat toimivia ratkaisuja, joita kokeiltiin Intelin prosessoreiden lisäksi kustannusten säästämiseksi 3D-tulostettuihin testiprosessoreihin, joissa on käytetty samantapaista silikoniliimaa "IHS:n" ja "PCB:n" välissä. Testiprosessorit vaativat lähes saman voiman IHS:n irrottamiseen, joten ne nähtiin hyvänä suuntaa antavana indikaattorina läpi kehitysprosessin. Kuvassa 16 on 3D-tulostetun prosessorin lisäksi alumiinista jyrsitty versio, jonka avulla voitiin selvittää korkkaustyökalun varmuuskerroin ja heikoin kohta.



Kuva 16. 3D-tulostettu ja alumiinista jyrsitty testiprosessori.

Rotaatioliikkeellä IHS:n irrotus onnistui kontrolloidummin, kun taas lineaariliikkeessä IHS napsahtaa irti rajummin. Rotaatioliikkeessä on myös mahdollista lisätä varren pituutta, jolloin saadaan tarvittaessa lisättyä momenttia. Molemmilla prototyypeillä onnistuttiin korkkaamaan prosessorit, mutta 3D-tulostetussa ilmeni lievää plastista muodonmuutosta. Tämän perusteella oli käytettävä valuhartseja, jotka tarjoavat paremmat mekaaniset ominaisuudet kuin 3D-tulostettu materiaali.

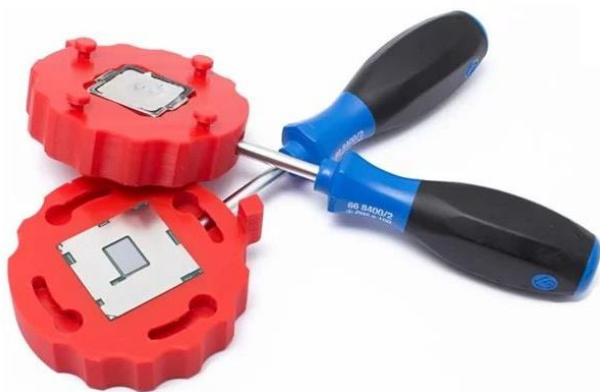
Liikeradan tutkimisvaiheessa opittiin myös, että pultti/kierre-mekanismilla tuotu energia oli varteenotettava ratkaisu. Sen lisäksi sormiruuvit, jotka lukitsevat työkalun puoliskot toisiinsa, vaikutti mahdolliselta ratkaisulta. Konseptisuunnittelussa katsotaan kuitenkin ratkaisuja näihin osatoimintoihin tarkemmin.

3.3.2 Energia

Toinen ratkaistava osatoiminto oli tapa, jolla saadaan tuotua energia IHS:n ja PCB:n liimapinnan hajottamiseen. Tärkeitä huomioitavia asioita olivat käytettävyys, hinta ja valmistettavuus. Näiden pohjalta saatiin kolme ratkaisua (kahvat, työntö ja ramppi), joita verrattiin toisiinsa.

Kahvat, joita puristetaan käsin, on yksi vaihtoehto tarvittavan energian luomiseen. Korkkaustyökalu koostuisi ylä- ja alaosasta, joissa molemmissa on kahvat. Puristamalla kahvoja yhteen, saadaan vastakkaissuuntaiset momentit IHS:ään ja PCB:hen, jolla hajotetaan liimapinta. Tarvittaessa momenttia saadaan lisätyksi pidentämällä kahvojen pituutta.

Suurimpana heikkoutena kahvojen tekemisessä on materiaalikustannukset, sillä korkkaustyökalun tilavuus kasvaa runsaasti isoilla kahvoilla. Tämä voitaisiin korjata sillä, että kahvoina käytettäisiin jotain yleisiä välineitä, kuten ruuvitaltoja, jotka asennettaisiin väliaikaisesti korkkaustyökaluun toimimaan kahvoina (kuva 17). Toinen heikkous nähtiin käytettävyydessä verrattuna pultti/ruuvi-ratkaisuun, jolla energia saavutettaisiin hallitummin ja vaivattomammin.



Kuva 17. Korkkaustyökalu, jossa energia tuodaan ruuvimeisseleillä [29].

Työntöä kokeiltiin jo toimivaksi vaihtoehdoksi ensimmäisissä prototyypeissä A ja B. Työntö on edullinen ratkaisu, jossa hyödynnetään pulttia ja kierrettä, sekä jonkinlaista iskuria, joka välittää voiman IHS:ään. Valmistamisen kannalta sivulta työnnettävä ruuvi voi olla hankala toteuttaa, koska mekanismi pitää olla sellainen, joka on valmistettavissa valamalla. Joustavat ja moniosaiset muotit kuitenkin mahdollistavat vaikeidenkin muotojen tekemisen.

Ramppimekanismin (kuva 18) paras hyöty on valmistettavuudessa valamisen kannalta. Muotit yksinkertaistuvat ja mahdollisesti vastapäästöt vähenevät, koska mekanismin muodot ovat samassa suunnassa kuin muottien irrotussuunta. Rampin heikkoutena nähtiin kitkan aiheuttama suuri tehohäviö.



Kuva 18. Ramppimekanismi, jossa pystysuuntaisella ruuvilla saadaan toteutettua tarvittava rotaatioliike.

Työntö- ja ramppi-ratkaisut tarvitsivat ruuvikierteen, jonka toteuttamiseen valamalla nähtiin kolme vaihtoehtoa: Sisällyttää kierremuoto muottiin, työstämällä jälkikäteen kovettunutta valuosaa tai käyttämällä kierresisäkettä. Kierremuodon sisällyttäminen muottiin vaatii joko moniosaisen muotin tai tarpeeksi joustavan muottimateriaalin, että kierteestä aiheutuvat vastapäästöt eivät ole ongelma. Metallinen kierresisäke tuntui näistä parhaalta ratkaisulta kestävyuden takia, jos se vain oli mahdollista toteuttaa tehokkaasti.

Kierteen luomista inserttien (kierresisäkkeen) avulla kokeiltiin testimuotin avulla (kuva 19). Siinä insertit asetetaan puristussovitteella muottiin tehtyihin sisennyksiin ennen valamista. Kierresisäkkeiden pitää istua sisennyksissä tiiviisti, ettei valaessa hartsia päädy kierteiden sisälle. Sisennykset aiheuttavat muottiin pienet vastapäästöt, mutta ne eivät olleet silikonimuotissa ongelma niiden joustavuuden takia. Jäykkiä muotteja käytettäessä sisennyksen vastapäästö olisi pitänyt ottaa huomioon, jolloin muoteista olisi tullut moniosaisia.



Kuva 19. Inserttien testimuotti. Kierresisäke on asetettu silikonimuottiin ennen hartsin valamista. Muotin päällä on valmis kierre-testikappale.

Kierresisäkkeet todettiin luotettavaksi ja valmistettavuuden kannalta lupaavaksi ratkaisuksi. Kuvassa 19 nähdään myös valmis valettu kierre-testikappale, jonka avulla kokeiltiin, että kierresisäke ja valumateriaalin seinämät tulevat kestäväksi niihin kohdistuneita rasituksia.

Kierresisäke-testin tulos oli erittäin positiivinen työntö-ratkaisun valmistettavuuden kannalta. Se todisti, että on mahdollista toteuttaa ruuvikierte, joka on vastakkaisuuntainen valuosan irrotussuuntaan, jolloin kyseinen mekanismi voidaan toteuttaa hyvin yksinkertaisilla muoteilla. Tämän jälkeen ramppi-ratkaisussa ei nähty mitään etuja verrattuna työntö-mekanismiin, jos käytettiin joustavia muotteja.

3.3.3 Lukittuminen

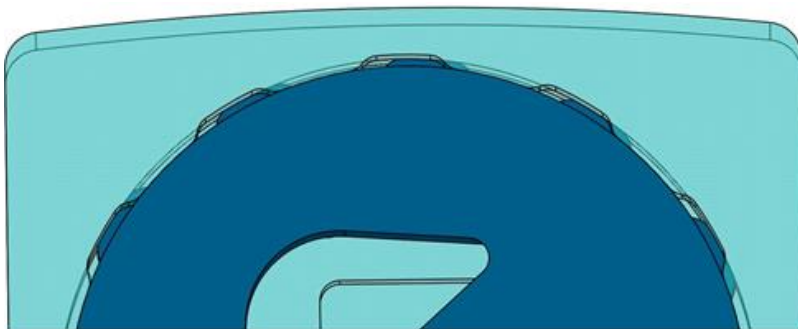
Kolmas osatoiminto oli lukittuminen, jossa suunniteltiin tapoja pitää korkkaustyökalu ja prosessori lukittuna, mutta kuitenkin sallien tarvittavan rotaation IHS:n irrottamiseen. Lopputuloksena saatiin kaksi vaihtoehtoa: sormiruuveilla ja railoilla lukittuvat mekanismit, joista jälkimmäinen valittiin jatkokehitykseen.

Sormiruuveilla toimivaa mekanismia kokeiltiin projektin alussa prototyypeissä A ja B, jossa ohjurit ohjaavat liikerataa, sekä sormiruuvit pitävät korkkaustyökalun ylä- ja alaosan kiinni toisissaan. Ratkaisun valettavuus on hyvä, sillä tarvittavat muodot mekanismin saavuttamiseksi ovat hyvin yksinkertaiset, eivätkä aiheuta vastapäästöjä muottiin. Haittana sormiruuviratkaisussa on korkkaustyökalun käytettävyys, sekä tarvittavien kierteiden tekeminen.

Testatessa korkkausta prototyypeillä A ja B huomattiin, että korkkauksessa muodostuva voima ylä- ja alaosan irtoamiseen on pieni, jolloin kierteiden ei tarvitse olla kovinkaan kestävä. Pienet muovikierteet kestäisivät tarpeeksi hyvin, mutta niiden tekeminen on lisää työvaiheita, mikä heikentää tuotannon tehokkuutta.

Käytettävyydeltään sormiruuvit ovat railoja heikompia, sillä korkkaustyökalun operointi vaatii ylimääräisiä työvaiheita korkkausoperaation suorittamiseen. Ajallisesti merkitys on kuitenkin pieni, kun otetaan huomioon koko korkkausprosessi alusta loppuun.

Railot ja hammastus korkkaustyökalun ylä- ja alaosassa oli toinen ratkaisu, joka pitäisi osat yhdessä korkkauksen aikana (kuva 20). Hampaiden ollessa linjassa, osat saadaan asettumaan toisiinsa kiinni. Kun yläosaa lähdetään pyörittämään, hampaat mekaanisesti lukkiutuvat estäen yläosan nousemasta pois railosta. Mekanismi nähtiin käyttäjäystävällisenä ratkaisuna sen yksinkertaisuuden ja nopeuden ansiosta.



Kuva 20. Railot ohjaavat korkkaustyökalun liikerataa.

Parhaana puolena railoissa nähdään valmistettavuus. Mekanismissa päästään juuri hyödyntämään valamisen etuja, sillä mekanismi voidaan suoraan integroida muotteihin. Varsinkin joustavia muotteja käytettäessä hammasmekanismissa aiheutuvat vastapäästöt ovat sen verran pienet, että ne eivät hankaloita valetun osan irrottamista.

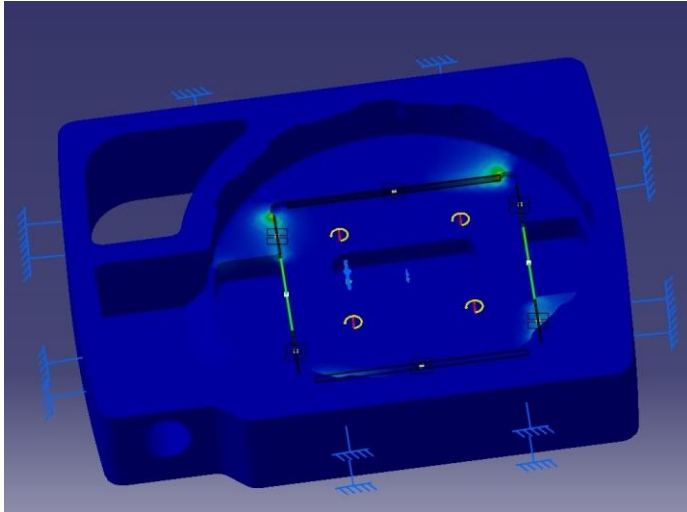
3.4 Konseptien jatkokehitys

Konseptikehityksen lopputuloksena päätettiin, että osatoiminnot liikerata, energia ja lukittuminen ratkaistaisiin seuraavasti:

- Korkkaustyökalu toimisi rotaatiomenetelmällä.
- Tarvittava energia tuodaan käsin pultti/kierremekanismissa.
- Korkkaustyökalussa käytetään hammasriloja ylä- ja alaosan lukitsemiseen.

Korkkaustyökalu haluttiin valmistaa niin joustavilla (konsepti A) kuin jäykillä (konsepti B) muoteilla, jotta saataisiin kokemusta molemmista tapauksista. Joustavien muottien käyttöikä oli niiden suurin huolenaihe, sillä teoriaosuutta tutkiessa usein mainitaan niiden kuluminen, mutta tarkkoja arvoja ei kuitenkaan anneta. Jäykät muotit, esim. alumiinista koneistetut, ovat taas erittäin kestäviä ja pitkäikäisiä, mutta niillä vastapäästöt pakottavat aina käyttämään moniosaisia muotteja.

Konseptin kehitysvaiheessa korkkausprototyyppejä käyttäessä huomattiin, että työkaluun kohdistuneet mekaaniset rasitukset olivat sen verran suuret, että ne oli huomioitava hartsivalinnassa. Prototyypeillä määritettiin tarvittava momentti prosessorin korkkaukseen, sekä selvitettiin korkkaustyökalun heikoin kohta, mikä oli PCB:n sisennyskolo. Näillä tiedoilla tehtiin FEM-analyysi (kuva 21), jonka avulla arvioitiin maksimirasitukset ja valuhartsin tarvittavat mekaaniset ominaisuudet. Kriteeriksi asetettiin, että puristuslujuuden pitäisi olla yli 70 MPa, joka pätee konsepti A:ssa ja B:ssä. Korkkaustyökalun lujuuslaskennat jätettiin tämän työn ulkopuolelle, jotta päähuomio olisi enemmän hartsivalinnassa.



Kuva 21. PCB sisennyksen FEM-analyysi.

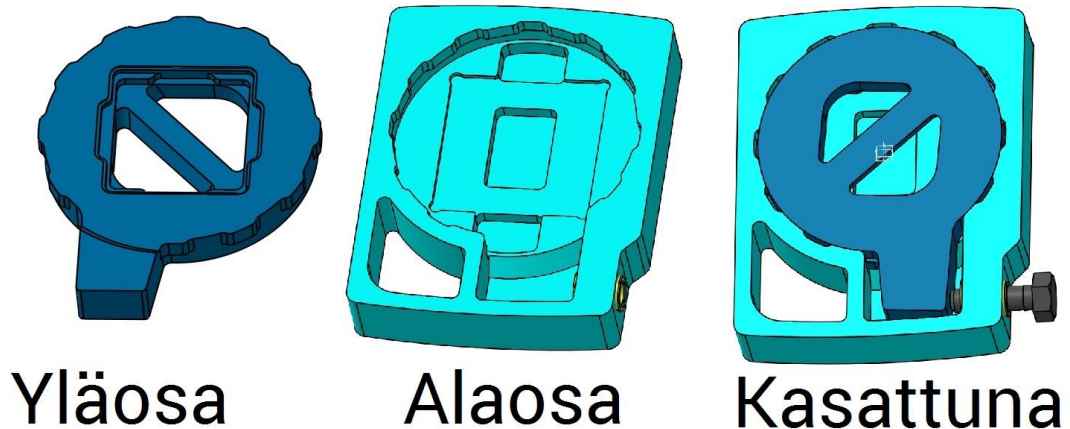
Valuhartsien valintaan vaikuttivat mekaanisten ominaisuuksien lisäksi mm. kovettumisominaisuudet, viskositeetti ja maksimiseinäpaksuus. Matala viskositeetti helpottaa valamista ja ilman poistumista valuosasta. Valuhartsin maksimiseinäpaksuuden pitää olla korkkaustyökalun spekseissä, jotta eksotermien reaktio ei ole liian suuri. Siihen voidaan kuitenkin tarvittaessa vaikuttaa lisäaineilla.

3.5 Konseptin A jatkokehitys

3.5.1 Konsepti A - mallikappaleet ja muotit

Konsepti A valmistettiin joustavilla muoteilla. Materiaaliksi valittiin muottisilikoni, jossa etuna on hyvät irrotusominaisuudet ja soveltuvuus polyuretaanien kanssa. Jos hartsina käytettäisiin epoksia, niin toisena vaihtoehtona olisi ollut polyuretaanielastomeerit, jotka vaativat aina irrotusaineiden käyttämisen, mikä olisi ollut yksi ylimääräinen vaihe valmistusprosessissa.

Kuvassa 22 nähdään 3D-mallinnetut mallikappaleet (positiivit), jotka valmistetaan CNC-jyrsimällä POMista. Mallikappaleista saadaan muotit (negatiivit), kun niiden päälle valetaan muottisilikonia. Kuvasta nähdään myös kootun version toimintaperiaate, jossa ruuvilla työnnetään yläosaa ja hammasrailot ja seinämät ohjaavat liikerataa.



Kuva 22. 3D-mallit mallikappaleista, joiden avulla valmistetaan silikonimuotit.

Mallikappaleen muoto voidaan kopioida yksinkertaisilla 1-osaisilla avoimilla muoteilla, joka helpottaa muottien valmistusta. Mallikappaleissa hammasrailosta aiheutuu lieviä vastapäästöjä muottiin, mutta ne eivät ole ongelma sen ollessa joustava. Alaosan kierresäike pystytään asettamaan muottiin ennen valamista aikaisemmin testatun insertti-testiosan (kuva 19) mukaisesti. Korkkaustyökalun muotti on sen verran pieni, että se voidaan valmistaa muottisilikonista ilman tukirakennetta. Jos muotit olisivat olleet suurempia, olisi voitu käyttää tukirakenteellista silikonimuottia materiaalikustannusten säästämiseksi.

Tuotesuunnittelussa on keskitytty siihen, että korkkaustyökalua on helppo käyttää, se on laadukkaan tuntuinen, sekä se näyttää työkalulta. Valuhartsin materiaalikustannuksissa ollaan koetettu säästää optimoimalla seinämäpaksuuksia ja tekemällä kevennyksiä. Lukittumismekanismista aiheutuvat vastapäästöt ollaan pidetty pienenä, jotta muottia tarvitsee venyttää mahdollisimman vähän, kun valuosa irrotetaan muotista.

3.5.2 Konsepti A - valumateriaalit ja lisäaineet

Valumateriaalin valitsemiseen vaikuttavia merkittäviä lähtötietoja listattiin ylös, ja niiden perusteella lähdettiin etsimään sopivia valuaineita. Merkittäviksi lähtötiedoiksi katsottiin:

- Muotti valmistettu silikonista.
- Käytetään pientä ja avointa muottia.
- Kovettamiseen ei ole käytössä uunia.
- Tarvitaan hyvät mekaaniset ominaisuudet.

Kolmesta valuaineesta (epoksi, polyesteri ja polyuretaani) polyuretaanit kuluttivat vähiten silikonimuotteja, minkä takia valuaineet rajattiin polyuretaanin käyttämiseen. Jos käytössä olisi ollut esimerkiksi alumiinimuotit, niin silloin epoksit olisivat voineet olla vaihtoehto. Polyestereiden korkean kutistuvuuden ja epoksia heikompien mekaanisten ominaisuuksien takia niitä ei pidetty vaihtoehtona tässä projektissa.

Tässä vaiheessa silikonimuotissa käytettyjä irrotusaineita ei vielä lähdetty testaamaan. Tiedostettiin kuitenkin, että silikonimuotit eivät välttämättä vaadi irrotusainetta, mutta niillä voidaan kuitenkin pidentää muotin käyttöikä. Tarvittaessa voidaan käyttää monenlaisia aineita, kuten PTFE- ja silikonipohjaisia irrotusaineita. Silikonin matalan kemiallisen kestävyuden takia siihen eivät kuitenkaan sovellu kaikki irrotusaineet, joita voisi käyttää esimerkiksi alumiinimuoteissa.

Pieni ja avoin muotti mahdollistaa nopean valamisen, jolloin hartsin työstöaika voi olla alhainen, mikä vaikuttaa myös muotista irrotusaikaan. Nopea irrotusaika vaikuttaa vastaavasti valmistusnopeuteen. Hartsin pitäisi myös kovettua täysin huoneenlämmössä, koska hartsin jälkikovetukseen kohotetussa lämpötilassa ei löydy laitteita.

Hyvän saatavuuden ja ominaisuuksien vuoksi valuhartsiksi valittiin Smooth-on Task 9 (liite). Hartsit kovettuu huoneenlämmössä, siinä on hyvät mekaaniset ominaisuudet ja sopiva työstöaika. Maksimipaksuus on myös riittävä, jolloin hartsia ei tarvitse lisäaineistaa.

3.5.3 Konsepti A - valaminen

Kuvassa 23 nähdään kaikki yläosan valamiseen tarvittavat mallikappaleet ja muotit, sekä muotista irrotettu viimeistelyä vaille valmis osa. Korkkaustyökalun alaosa on valmistettu aivan samalla tavalla kuin yläosa, mutta ennen valamista muottiin on asennettu kierresisäke. Alaosan valamista on näytetty työn teoriaosuudessa kuvassa 2.

Nro 1 kuvassa on POMista CNC-jyrsitty mallikappale, joka on asetettu kaukaloon. Kun kaukaloon on kaadettu muottisilikonია ja annettu sen kovettua, ollaan saatu nro 2 eli korkkaustyökalun yläosan muotti.



Kuva 23. Konsepti A - yläosan mallikappale, muotti ja valettu osa

Nro 3:ssa on kaadettu valkoista hartsia mustaan silikonimuottiin (sama kuin nro 2 paitsi muotti on värjätty), joka on tässä vaiheessa vielä nestemäisessä muodossa. Kuvassa on myös kansi, jolla voidaan halutessaan painaa pinta tasaiseksi, vaikuttaa pinnan tekstuuriin tai tehdä esimerkiksi logo. Kansi täytyy asettaa muotin päälle, kun hartsi on vielä juoksevaa. Jos kantta ei käytä, pinnasta tulee kiiltäväpintainen ja kuperan muotoinen.

Valaminen suoritetaan tässä tapauksessa avoimeen muottiin, jossa hartsin kaatamisen seurauksena muodostuneet ilmakuplat pääsevät helposti nousemaan pintaan poistumaan. Kantta käyttämällä osa ilmakuplista ei kuitenkaan ehdi nousta pois, jolloin osan pinnalle voi muodostua ohuita reikiä. Tämän takia muotit siirrettiin valamisen jälkeen vielä 4 barin ylipaineeseen kuivumaan, jossa ilmakuplat puristuivat niin pieniksi, etteivät ne olleet enää silmin havaittavissa.

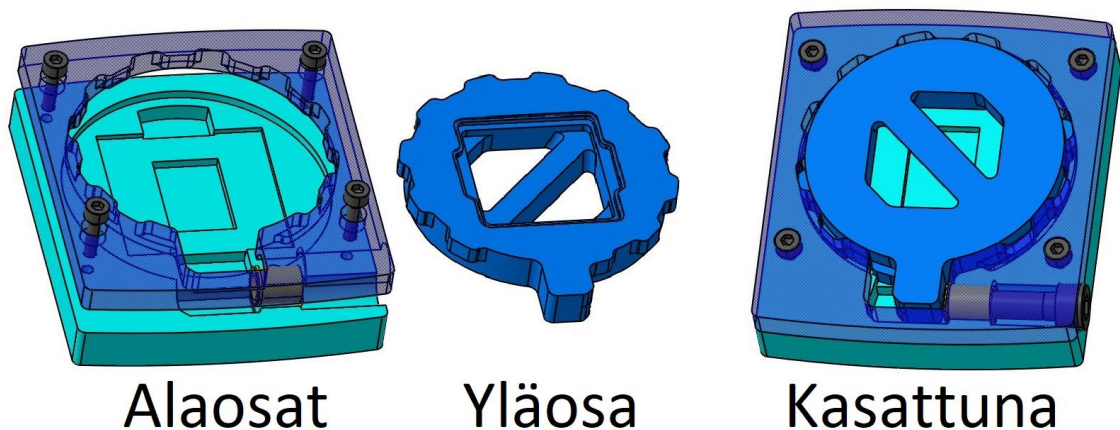
Nro 4:ssa on osa irrotettu muotista, jossa oli käytetty kantta. Kannessa on samanlainen tekstuuri ja kiiltoaste kuin muussakin muotissa, joten osa näyttää yhtenäiseltä ja laadukkaalta. Kantta käyttäessä osan reunoille tulee ohuet purseet, jotka on käsin viimeisteltävä. Ohuet purseet katkeavat huomaamattomiksi hyvin pienellä vaivalla, kun taas paksumat purseet on siistittävä esimerkiksi mekaanisesti hiomalla.

3.6 Konseptin B jatkokehitys

3.6.1 Konsepti B - mallikappaleet ja muotit

Konsepti B valmistettiin jäykillä muoteilla, joissa materiaalina käytettiin POMia edullisuuden ja koneistettavuuden takia. Jos konsepti B valittiin yksityiskohtaiseen suunnitteluun, niin tarkoituksena oli vaihtaa alumiinimuotteihin, joissa on erinomainen kestävyys ja sopevuus puolipysyviin orgaanisia liuotteita sisältäviin irrotusaineisiin. Valuhartsina voitaisiin käyttää polyuretaania tai epoksia, sillä molemmat soveltuvat hyvin muottimateriaalin kanssa ja tarjoavat hyvät mekaaniset ominaisuudet. Epokseissa on kuitenkin suurempi kutistuma, joka nähtiin mahdollisena ongelmana.

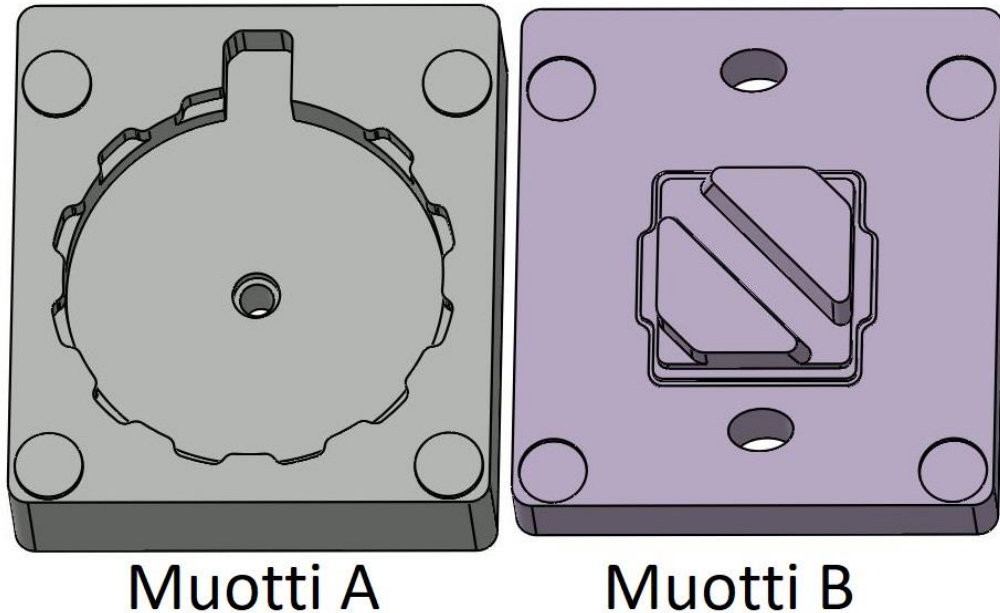
Kuvassa 24 on konsepti B:n 3D-mallit, jonka toimintamekanismi on samanlainen kuin konsepti A:ssa. Jäykillä muoteilla alaosan hammasrailot joudutaan tekemään kahdesta erillisestä osasta, jotta muotteihin ei tule vastapäästöjä. Alaosat kiinnitetään yhteen neljällä kuusiokoloruuvilla, joissa kierteet tehdään jälkikäteen kierretapilla. Samalla kun alaosan puoliskot kiinnitetään yhteen, niin väliin asennetaan ja liimataan kierresisäke (mallissa keltainen komponentti).



Kuva 24. Konsepti B:n 3D-mallit.

Konsepti B:ssä muotit koneistettiin suoraan muottiaineesta, joten 3D-(positiivi)malleista ei tarvinnut tehdä konkreettisia mallikappaleita. Eroten konsepti A:sta, niin muotit oli mallinnettava, jotta CAM-ohjelmalla saadaan koneistusradat muotin tekemiseen. Kuvassa 25 on esimerkkinä yläosan muotit, joka koostuu kahdesta osasta. Muotti B toimii tässä tapauksessa kantena, joka asetetaan muotti A:n päälle. Muotti B:ssä on kaksi reikää, joista toinen on syöttö- ja toinen ulostuloreikä. Valamisen aikana muotti pidetään

kallellaan, jotta hartsi täyttää muotin alhaalta ylös pienentäen ilmataskujen mahdollisuutta. Muotti A:ssa on keskellä reikä työntötapille, jonka avulla kovettunut valuosa saadaan työnnettyä muotista ulos.



Kuva 25. Yläosan 2-osainen muotti.

3.6.2 Konsepti B - valumateriaalit ja lisäaineet

Valuaineina harkittiin epoksia ja polyuretaania, jotka molemmat olisivat toimineen ominaisuuksien puolesta. Koska konsepti A:ssa käytettiin valuhartsina polyuretaania, niin konsepti B:ssä haluttiin kokemuksen saamiseksi kokeilla alustavasti epoksia. Valamiiseen tarkoitetuissa epokseissa on yleensä polyuretaaneja pidempi työstöaika, joka konsepti B:ssä on hyvä ominaisuus, sillä muotin täyttäminen hartsi oli huomattavasti hitaampaa. Suurin heikkous nähtiin epoksin kutistuvuudessa, johon oli mahdollista vaikuttaa lisäaineella esim. ATH:lla.

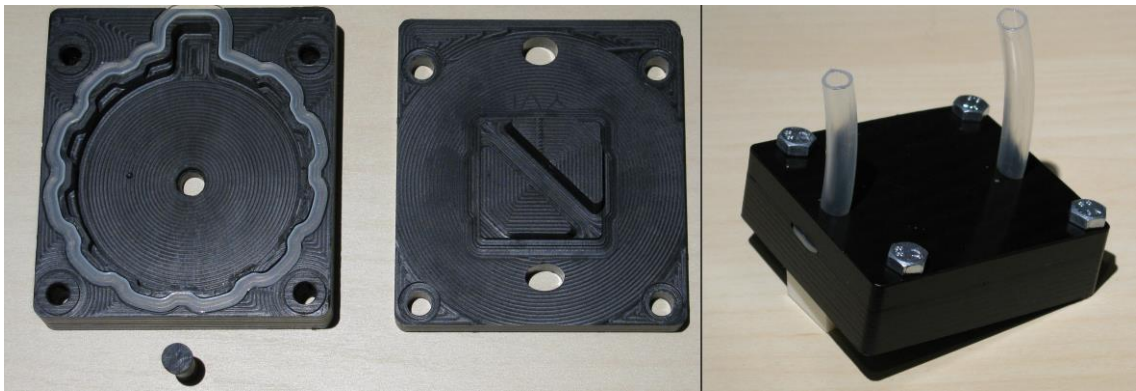
Lisäaineita voisi myös käyttää hartsin paksuntamiseen, jos valaminen suoritetaan gelcoat-menetelmällä. Varsinkin koska muotit ovat muodoltaan vaativia ilmakuplattoman valuosan tekemiseen, niin gelcoatilla saataisiin ainakin visuaalisesti täydellinen pinta. Gelcoat-menetelmä on kuitenkin hyvin hidasta valmistettavuuden kannalta, jossa konsepti B oli jo ennestään huono komponenttien määrän ja moniosaisten muottien takia.

Konsepti B:n POM-muoteissa käytettiin ohennepohjaisia puolipysyviä irrotusaineita, jotka olivat levitettävissä ja kiillotettavissa liinalla. Samoja aineita voisi käyttää myös alumiinimuoteissa, jos konsepti B:n kehitystä jatkettaisiin yksityiskohtaisessa suunnittelussa.

3.6.3 Konsepti B - valaminen

Kuvassa 26 nähdään POMista koneistettu muotti, jota käytettiin konsepti B:n yläosan valamiseen. Alaosien muotit olivat periaatteeltaan hyvin samanlaisia, joissa yksi syöttö- ja ulostuloreikä, jonkinlainen ulostyöntömekanismi, ja ne käyttivät 2-osaisia muotteja.

Yläosan muotteihin tehtiin muutamia parannuksia 3D-mallista. Muottien väliin on asennettu silikonitiiviste, joka estää valuhartsin vuotamisen kapillaari-ilmiön takia. Ilman tiivistettä vuotaminen olisi niin pientä, ettei sillä ei ole valuosan lopputulokseen vaikutusta, mutta muotin puhdistus helpottuu, kun hartsi ei esimerkiksi leviä muottien kohdistussennyksiin. Toinen muutos oli neljä pulttia, joilla muottipuoliskot saadaan puristettua tiiviisti yhteen.



Kuva 26. Konsepti B:n yläosan muotti irrallaan ja koottuna.

Valaminen suoritetaan kaatamalla hartsi sekoituskupista suoraan muotin syöttöreikään kiinnitettyyn putkeen. Konsepti B:n suljettuihin muotteihin hartsi täytyy kaataa erittäin hitaasti, sillä ne sisältävät kapeita ja paksuja muotoja, jotka täyttyvät eri nopeutta, jos hartsi kaadettaisiin nopeasti syöttöreikään. Jos muotti ei täyty tasaisesti alhaalta ylös, niin sille voi jäädä helpommin ilmakuplia ja -taskuja.

Tässä tapauksessa muodot olivat kuitenkin liian vaativia, jotta rauhallisella valamisella saataisiin visuaalisesti kuplattomia valuosia. Valuosien ylipaineistaminen kovettumisen ajaksi auttoi huomattavasti pienentämään kuplia, mutta se ei aina riittänyt. Ilmakuilien määrässä oli vaihtelua, johon saattoi vaikuttaa valunopeuden, muotin kaltevuuden ja työskentelylämpötilan vaihtelu, mikä vaikutti hartsin viskositeettiin.

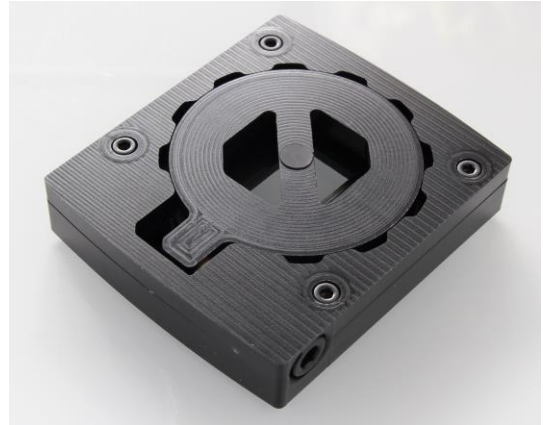
Epoksilla kutistuminen oli myös ongelma, sillä valuosaan saattoi muodostua kuoppia (kuva 27). Ratkaisuksi ajateltiin hartsin lisäaineistamista (esimerkiksi ATH:lla) tai epoksisysteemin vaihtamista. Käytetyssä epoksissa oli myös mahdollista käyttää eri kovetteita, jotka vaikuttivat kovettumisnopeuteen. Tässä tapauksessa pelkästään kovetteen vaihtaminen auttoi ongelmaan. Tämä saattoi johtua siitä, että yleisesti hitaammin kovettuvat hartsit kutistuvat vähemmän, sekä hartsit kovettuu tasaisemmin läpi osan, jolloin syöttöreikien ylimääräisellä hartsilla on parempi mahdollisuus täyttää muotin sisällä kutistuneen hartsin. Kuvassa 27 nähdään myös hitaammalla kovetteella tehty valuosia, josta huomaa kovetteen vaikutus lopulliseen väriin.



Kuva 27. Epoksin kutistumisesta johtuvat kuopat, sekä eri kovetteesta johtuva väriero.

3.7 Yksityiskohtainen suunnittelu

Kuvassa 28 nähdään konseptit A ja B, joista A valittiin yksityiskohtaiseen suunnitteluun. Valmistettavuuden kannalta se oli huomattavasti parempi, joka oli tärkein vertailukriteeri. Konsepti A:n heikkoutena oli muottien käyttöikä, jota käsitellään myöhemmin tässä tuotekehityksen vaiheessa. Konsepti B:n olisi voinut toteuttaa huomattavasti paremmin, jos osatoimintojen ratkaisuihin olisi käyttänyt jäykille muotteille sopivia ratkaisuja. Se nähtiin kuitenkin tutkimuksen kannalta tärkeältä, että molemmat konseptit ovat samantyyllisiä toimintaperiaatteeltaan, jotta voi tuoda paremmin esille eri muottityyppien vahvuudet.



Kuva 28. Konseptit A(vas.) ja B(oik.) kokoonpantuna.

Yksityiskohtaisessa suunnittelussa päätettiin Konsepti A:n komponenttien lopulliset geometriat, toleranssit ja käytettävät irrotusaineet, sekä valittiin käytetyt standardiosat. Korkeakautyökaluun kuuluu yhteensä neljä komponenttia: yläosa, alaosa, kierresisäke ja ruuvi. Näistä kierresisäke ja ruuvi ovat standardiosia, joiden valinta lukittiin myös yksityiskohtaisessa suunnittelussa.

3.7.1 Toleranssit

Konsepti A oli jo täysin toimiva tuote, jonka ulkomuotoon oltiin myös tyytyväisiä, joten siihen ei enää tehty suuria muutoksia yksityiskohtaisessa suunnittelussa. Toleransseissa oli kuitenkin parantamisen varaa, sillä valettujen komponenttien istuvuudet olivat joko liian tiukkoja tai löysiä. Heikko istuvuus oli alkuun hieman mysteeri, sillä CNC-jyrsittyjen mallikappaleiden geometriat olivat toleransseissa, mutta valetut osat olivat kooltaan liian isoja. Syynä tähän oli siinä, että hartsin kovettuessa se tuottaa lämpöä eksotermisen reaktion takia, jolloin muotit myös laajenevat huomattavasti silikonin korkean lämpölaajenemisen seurauksena. Samanlaista ongelmaa ei nähty konsepti B:llä, jossa käytettiin POMista valmistettuja muotteja.

Valuosien liian suureen kokoon, joka johtui silikonimuottien lämpölaajenemisesta, katsottiin useita ratkaisuja:

- työskentelytilan lämpötilan alentaminen
- hartsin lisäaineistus
- uusien (pienempien) mallikappaleiden tekeminen
- silikonimuottien tekeminen korkeassa lämpötilassa.

Työskentelytilan lämpötilan alentaminen pienentäisi eksotermistä reaktiota, koska hartsi kovettuisi silloin hitaammin. Tässä ongelmana nähtiin se, että tuotantonopeus heikkenisi kuivumisajan kasvaessa.

Hartsin lisäaineistus oli toinen ajatus, jolla on vaikutusta eksotermiseen reaktioon ja hartsin lämmönjohtavuuteen. Osa voisi mahdollisesti kovettua yhtä nopeasti tai jopa nopeammin lämmönjohtavuutta parantavalla lisäaineella, koska valuosa kovettuisi hyvin tasaisesti niin paksuissa kuin ohuissakin kohdissa.

Uusien mallikappaleiden tekeminen olisi täysin mahdollista ja toimiva ratkaisu. Siinä mallikappaleista tehtäisiin alustavasti liian pienet, jossa otetaan huomioon, että valuosasta tulee suurempi ja näin lopulta oikean kokoinen. Tämä vaatisi tarkkaa mittaamista ja lämpölaajenemiseen liittyviä laskuja, jotta päästäisiin haluttuihin toleransseihin.

Uusien silikonimuottien tekeminen korkeassa lämpötilassa nähtiin parhaaksi vaihtoehdoksi, jolla lopulta ratkaistiin ongelma. Kun mallikappaleesta tehdään silikonimuotti, niin se viedään kovettumaan lämmitettyyn uuniin. Näin muotti kovettuu lämpöisen mallikappaleen mittoihin, ja koska mallikappaleessa on pienempi lämmönlaajenemiskerroin, niin muotti pienenee enemmän kuin mallikappale niiden tuodessa takaisin huoneenlämpöön. Prosessi jouduttiin tekemään kahdesti, jotta päästiin toleranssien sisälle. Alkuun uuni asetettiin liian pieneen lämpötilaan, mutta toisella kerralla löydettiin sopivat lämpöasetukset.

3.7.2 Standardiosat

Projektin alusta alkaen käytetty kierresisäke oli täysin toimiva, edullinen ja siisti ratkaisu, johon ei haluttu tehdä muutoksia. Sen sijaan ruuvi haluttiin vaihtaa metallisesta nyloniin, sillä metallipultin työntäessä korkkaustyökalun yläosaa, siinä tulee kulumisen jälkeä. Nylonruuvilla työntäessä saadaan muovi/muovi kosketuspinta, jossa pintapaine jakautuu tasaisemmin molempien pintojen ollessa pehmeämpiä ja joustavampia. Nylonissa on myös pienempi kitkakerroin, jolloin pienemmällä momentilla saadaan suurempi työntövoima.

Nylonin mekaaniset ominaisuudet olivat juuri siinä rajalla, että kannattaako sitä käyttää. Nylonpultti kesti siihen kohdistuneet rasitukset, mutta sen alhaisen liukumoduulin takia liukuma on huomattavissa, mikä tekee siitä laaduttoman tuntuisen, kun pulttia väännetään.

3.7.3 Irrotusaineet

Konsepti A:ssa käytettiin silikonimuotteja, jolloin irrotusainetta ei ole välttämätöntä käyttää, mutta niillä voidaan kuitenkin lisätä muottien käyttöikä. Kirjallisuudesta ja valmistajilta oli hyvin vaikea löytää luotettavia lähteitä silikonimuoteilla saatavista irrotuskerroista, koska ne vaihtelivat 10 - 100 välillä. Tähän luultavasti liittyy se, että irrotuskertoihin vaikuttaa niin moni tekijä, että sitä ei haluta ilmoittaa.

Yksityiskohtaisessa suunnittelussa alettiin jo valmistamaan enemmän korkkaustyökaluja, jotta saatiin kokemusta todellisesta tuotannosta ja muottien käyttäjästä. Paras tapaus olisi se, että muoteilla saataisiin riittävästi irrotuksia ilman irrotusainetta, jotta välttyttäisiin yhdeltä tuotantovaiheelta. Jos tämä ei onnistuisi, niin sitten vasta siirryttäisiin käyttämään irrotusaineita.

Korkkaustyökaluja valmistaessa huomattiin, että Konsepti A:ssa käytetyllä muotti/hartsiyhdistelmällä muotit kuluivat liian nopeasti ilman irrotusainetta, jolloin sarjatuotantoa ajatellen uusia muotteja olisi pitänyt tehdä liian usein. Ongelman ratkaisemiseksi katsottiin seuraavia ratkaisuja:

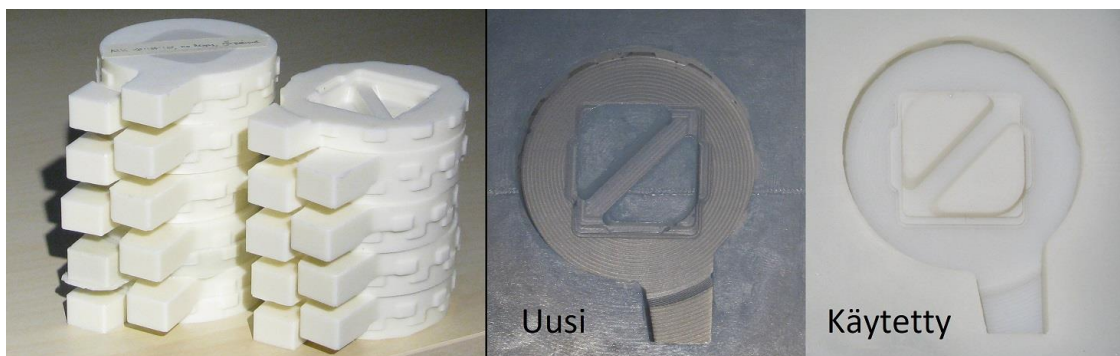
- muottisilikonin vaihtaminen
- hartsin vaihtaminen
- irrotusaineen käyttäminen.

Muottisilikonin vaihtaminen toiseen valmistajaan tai valmistajan eri tuotteeseen haluttiin kokeilla ensimmäiseksi, sillä se oli helposti toteutettavissa. Kokeiltavaksi otettiin kaksi uutta silikoniaminetta, jotka olivat ominaisuuksiltaan hieman erilaisia ja niitä mainostettiin kestäviksi juuri hyvin kemiallisesti aggressiivisiin polyuretaaneihin. Lopputuloksena huomattiin, että käytetyllä muottisilikonilla on selkeästi merkitystä, sillä irrotusmäärät vaihtelivat 10 - 20 välillä, riippuen mitä muottisilikoniaminetta käytettiin.

Valuaineen (Smooth-on Task 9), vaihtaminen toiseen voisi tuoda muoteille lisää irrotuskertoja, sillä toiset polyuretaanit mainostavat olevansa vähemmän muottia kuluttavia. Valuainetta ei kuitenkaan haluttu vaihtaa, sillä sen saatavuus, mekaaniset- ja fysikaaliset ominaisuudet oltiin todettu toimiviksi, eikä tuotteen kehitykseen ollut loputtomasti aikaa.

Helposti saatavilla oli kuitenkin toista polyuretaanihartsia, jota haluttiin kokeilla tutkimuksen kannalta, vaikka sen mekaaniset ominaisuudet eivät riittäneet korkkaustyökalan materiaaliksi. Testissä huomattiin, että eri polyuretaanit kuluttavat muotteja aivan eri tavoin, sillä muotit kestivät yli 20 irrotusta, jonka jälkeen testi lopetettiin (kuva 29).

Kuvassa 29 nähdään myös, miten muotti haalistuu visuaalisesti käytön myötä. Valettujen osien pinnanlaatu on hyvin epätasainen, mikä näyttää hyvin laaduttomalta. Irtoavuusominaisuudet myös heikkenevät, jolloin irrotusvaiheessa muotista voi revetä paloja.



Kuva 29. Sarjatuotantotesti, jossa seurattiin silikonimuottien käyttökäytössä.

Viimeisenä ratkaisuna kokeiltiin erilaisia irrotusaineita. Yksi vaihtoehto oli aerosolisumutteella levitettävät PTFE- tai silikonipohjaiset ei-pysyvät irrotusaineet. Näistä silikonipohjainen irrotusaine lisäsi huomattavasti enemmän irtoavuutta, sekä visuaalisesti antoi selkeämmän suojakerroksen. Ongelmaksi näissä oli kuitenkin se, että irrotusainetta ei saada sumuttamalla muotin syviin ja kapeisiin onkaloihin. Jos irrotusaine ei peitä täysin muottia, niin irrotusaineista ei ole hyötyä, koska irrotusaineettomat kohdat kuitenkin kuluvat ensin.

Silikonipohjaista irrotusainetta kokeiltiin levitettäväksi myös sivelemällä, jolloin se saatiin kaikkialle muottiin. Muotin pintaan jäi kuitenkin levitysjäljet, jotka näkyvät selkeästi valuosassa, jolloin se ei ollut pinnanlaadultaan hyväksyttävissä. Kiillotettavia vahoja ja vesipohjaista puolipysyvää irrotusainetta kokeiltiin myös. Nämä voitiin levittää helposti kaikkialle muottiin, mutta vastaavasti aineen kiillottaminen syvistä ja kapeista onkaloista oli haastavaa.

Lopputuloksena muottien käyttökäytössä saatiin parannettua vain vaihtamalla toiseen muottisilikoniin. Työssä siirryttiin eteenpäin, vaikka aihetta olisi voinut tutkia lisää, sillä toisia irrotusaineita jäi kokeilematta. Jatkossa on kuitenkin pidettävä mielessä, että muottia suunniteltaessa pitää ottaa myös huomioon, ovatko irrotusaineet helposti levitettävissä/kiillotettavissa.

3.8 Testaus ja viimeistely

Testaus- ja viimeistelyvaiheessa alpha-prototyypit lähetettiin kokeiltavaksi muutamille tietokoneharrastajille, joilta kysyttiin käyttäjäkokemuksia. Samalla varmistettiin korkkaus-työkalun suorituskyky ja luotettavuus monilla eri Intelin prosessorimalleilla. Prosessorien korkkaus onnistui jokaisella käyttäjällä, ja palautetta saatiin seuraavasti:

- + toimiva
- + helppo ja nopea käyttää
- + sopivan hintainen

- - nylonruuvi
- - hieman kevyt, ei niin järeän tuntuinen
- - ei asennustyökalua.

Positiivisena palautteena toimintamekanismi nähtiin erittäin toimivana, sillä ruuvi/pultti-mekanismilla saatiin tuotua runsaasti ja kontrolloidusti voimaa korkkauksen suorittamiseen. Lisäksi hammasrailot tekivät prosessista käyttäjäystävällisen, sillä korkkaustyökalun ylä- ja alaosien asettaminen tapahtuu nopeasti ja helposti ilman mitään ylimääräisiä lukitsemisvaiheita. Työkalu myös pystyttiin hinnoittelemaan kohtuullisesti, jos tuote kaupallistettaisiin.

Negatiivista palautetta annettiin nylonruuvista, painosta ja asennustyökalun puuttumisesta. Nylonruuvi tuntui laaduttomalta, sillä se jousti vääntäessä. Se ei välttämättä tarkoita, että nylonruuvi olisi lähellä rikkoutumista, sillä nylonissa on iso murtovenymä, joten se voi joustaa reilusti ennen rikkoutumista. Tähän haluttiin kuitenkin tehdä muutos, ja siksi siirryttiin takaisin metalliruuviin, jonka heikkoutena oli se, että se jätti kosketuspintaan kulumisjäljen.

Korkkaustyökalu tuntui hieman kevyeltä, kun sitä verrattiin POMista valmistettuun työkaluun (kuva 15 - prototyyppi B). Korkkaustyökalusta olisi voitu tehdä hieman isompi ja paksumpi, mutta silloin sen materiaalikustannukset ja paino olisivat kasvaneet. Painon kasvaessa myös postikulut lisääntyisivät, sillä tällä hetkellä työkalu saadaan juuri lähetyttyä alhaisessa alle 100 g:n painoluokassa.

Asennustyökalun tarkoitusta ei tässä tarkemmin käsitellä, mutta se on vaihtoehtoinen lisätyökalu korkkausprosessissa. Asennustyökalu ei ole pakollinen, eivätkä sitä kaikki käytä, mutta se voisi olla mahdollista integroida korkkaustyökaluun, jos muoteista tehtäisiin monimutkaisemmat. Jos korkkaustyökalun suunnittelisi uudelleen, niin yksi kehitysmahdollisuus olisi asennustyökalun integroiminen muotteihin ilman, että se vaikuttaisi valmistettavuuteen.

3.9 Tuotannon ylösajo

Tuotannon ylösajossa etsittiin vielä piileviä vikoja tuotteesta tai valmistusmenetelmistä. Ainoa ongelma oli silikonimuotin kannessa (kuva 23, nro 3), jonka huomattiin menneen kieroksi, jolloin valuosan purseet olivat paksuuntuneet. Tämä johtui ilmeisesti siitä, että epoksista valmistettu kansi ei ollut vielä täysin kovettunut, kun se oli irrotettu muotista. Kansi on sitten jälkikäteen vielä kovettunut ja kutistunut, jolloin se on sisäisten rasitusten takia vääntynyt kieroksi. Ratkaisuna tehtiin uusi kansi, joka oli varmuuden vuoksi valmistettu vähemmän kutistuvasta polyuretaanista.

Tuotannon tehokkuutta ja tuottavuutta parannettiin organisoimalla työtilat ja standardoimalla työmenetelmät. Esimerkiksi hartsin sekoittamiselle ja kaasunpoistolle vakuumisäiliössä standardisoitiin tietty aika, jotta työvaihe tulisi suoritettua mahdollisimman tehokkaasti ja laadukkaasti.

Valuhartsien kovettumislämpötilaa myös optimoitiin ja standardoitiin tuotannon ylösajossa. Nostamalla kovettumislämpötilaa saatiin nopeutettua valuosan muotista irrotusaikaa. Tällä päästiin sellaiseen rytmiin, että valaminen pystyttiin suorittamaan samaan muottiin kahdesti päivässä. Nostamalla lämpötilaa valuosien mitat hieman kasvoivat, mutta ne pysyivät vielä toleransseissa.

4 Lopputulos ja yhteenveto

Työssä valetuilla korkkaustyökaluilla on tehty onnistuneesti yli 200 IHS:n irrotusta tietokoneharrastajien keskuudessa. Korkattujen prosessorien lämpötilojen on raportoitu laskevan 10 - 20 °C, mikä on osoittanut korkkauksen ja siihen tarkoitetun työkalun hyödylliseksi vaihtoehdoksi jäähdytysominaisuuksien parantamisessa. Tutkinnan alla on myös kaksi tapausta, jossa työkalu ei kestänyt siihen kohdistuneita rasituksia.

Valmistusmenetelmänä hartsivalamisella on selkeästi omat vahvuudet ja heikkoudet, joihin on hyvä tutustua tuotekehitysprojektien alkuvaiheissa. Valettavan osan suunnittelussa ja valmistamisessa on otettava huomioon mm. valmistettavan osan geometria, tuotantomäärä, muottityypit, materiaalit, lisäaineet, irrotusaineet ja valutekniikka.

Korkkaustyökalun valamisessa lupaavimmaksi vaihtoehdoksi valittiin silikonimuotteihin valettu polyuretaani, jossa valaminen tehdään avoimeen 1-osaiseen muottiin. Kovettaminen oli suoritettava ylipaineessa, jotta saatiin tasaisesti hyvä pinnanlaatu.

Silikonimuotilla pystytään tekemään haastavia geometrisia muotoja, joita hyödynnettiin korkkaustyökalun toiminnassa. Silikonin joustavuus mahdollistaa lieviä vastapäästöjä, jotka auttavat mm. erilaisten toimintamekanismien integroimisen suoraan muottiin ja näin valettavaan osaan. Korkkaustyökalun kohdalla muottien joustavuutta hyödynnettiin raihojen tekemisessä, jotka ohjasivat ja lukitsivat korkkaustyökalun liikerataa. Joustavaan muottiin oli myös helppoa asentaa valmiiksi inserttejä (metallinen kierresisäke), mikä nopeutti ja helpotti valmistusprosessia.

Silikonimuotilla tiukkoihin toleransseihin pääseminen oli haastavaa hartsien eksotermisen reaktion ja silikonin suuren lämpölaajenemisen takia. Työssä päästiin kuitenkin haluttuihin toleransseihin, kun edellä mainitut tekijät otettiin huomioon silikonimuottia valmistaessa. Tämä toteutettiin siten, että tehtiin alustavasti liian tiukka muotti, joka hartsin kovettuessa lämpenee ja lämpölaajenemisen seurauksena saavuttaa halutut dimensiot.

Korkkaustyökalun valmistettavuutta voisi olla mahdollista parantaa, jos korkkaustyökaluun ja muottiratkaisuihin tekisi muutoksia. Suurimmat ongelmat olivat silikonimuoteissa, joista ei saatu montaa osaa valmistettua, ennen kuin ne alkoivat menettämään irrotusominaisuuksia ja lohkeilemaan. Käytetyllä muottisilikonilla ja polyuretaanilla oli vaikutusta irrotuskertoihin, mutta tarpeeksi hyvää yhdistelmää ei kuitenkaan löytynyt.

Irrotusaineilla voidaan myös lisätä muottien elinikää, mutta korkkaustyökalun kohdalla sen levittäminen tasaisesti kaikkialle muottiin oli haastavaa vaikeiden muotojen takia.

Silikonimuottien käyttöeliniän parantaminen olisi mielenkiintoinen jatkokehitysprojekti, jossa perusteellisemmin tutkittaisiin, kuinka eri polyuretaanihartsit ja muottisilikonit toimivat yhdessä, sekä erilaisten irrotusaineiden vaikutus.

Lähteet

- 1 Tietokoneen perusrakenne. Verkkoaineisto. <https://www.cs.tut.fi/etaopetus/titepk/luku15/tietokone_rak.html#suoritin>. Luettu 9.9.2017.
- 2 Intel CPU Delid Tool Removes Heat. Verkkoaineisto. <<http://www.gadgetexplained.com/2016/04/intel-cpu-delid-tool-removes-heat.html>>. Luettu 9.9.2017.
- 3 Berger, M. 2012. Graphene sets new record as the most efficient filler for thermal interface materials. Verkkoaineisto. <<https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=24109.php>>. Luettu 9.9.2017.
- 4 Gowda, A. 2007. Reliability Testing of Thermal Greases. Verkkoaineisto. <<https://www.electronics-cooling.com/2007/11/reliability-testing-of-thermal-greases/>>. Luettu 12.9.2017.
- 5 O'Hearn, W. Liquid Resin Casting for Prototype to Production. Verkkoaineisto. <<http://www.jobshop.com/techinfo/papers/plasticliqrescast2.shtml>>. Luettu 9.9.2017.
- 6 Mellberg & Ketell. Resin Casting Class. Verkkoaineisto <<http://bayareawoodturners.org/Resources/Documents/1-Resin%20Casting%20Class.pdf>>. Luettu 16.9.2017.
- 7 Are these materials safe to use?. Verkkoaineisto. Smooth-On, Inc. <<https://www.smooth-on.com/support/faq/120/>>. Luettu 15.10.2017.
- 8 Muotin valmistus. Verkkoaineisto. Jacomp Oy. <<https://www.materialshop.fi/Muotin-valmistus>>. Luettu 16.9.2017.
- 9 Goldsberry, C. 2014. Adoption of 3D printing for cores/cavities remains low in spite of advantages. Verkkoaineisto. <<https://www.plasticstoday.com/content/adoption-3d-printing-corescavities-remains-low-spite-advantages/68217201521533>>. Luettu 18.10.2017.
- 10 Juelch, K.K. 2013. Secrets of Expert Mold Making. Wroclaw: Amazon Fulfillment.
- 11 Understanding Physical Property Specifications for Rubbers & Plastics. Verkkoaineisto. Polytek Development Corp. <<https://www.polytek.com/tutorial/tek-tip-understanding-physical-property-specifications-rubbers-plastics>>. Luettu 20.9.2017.
- 12 Zalewski, M. Guerrilla guide to CNC machining, mold making, and resin casting. Verkkoaineisto. <<http://lcamtuf.coredump.cx/gcnc/ch4/>>. Luettu 14.9.2017.
- 13 Barnard, M. 2015. Controlling Exotherm. Verkkoaineisto. <<http://epoxyworks.com/index.php/controlling-exotherm/>>. Luettu 22.9.2017.

- 14 Adding Fillers to Polyurethane Casting Resin. Verkkoaineisto. Polytek Development Corp. <<https://www.polytek.com/tutorial/adding-fillers-polyurethane-casting-resin>>. Luettu 22.9.2017.
- 15 Did you know? Epoxy and Polyurethane Tips. Verkkoaineisto. Crosslink Technology Inc. <<http://www.crosslinktech.com/support/tips-and-tricks/did-you-know.html>>. Luettu 30.9.2017.
- 16 Epoxy Urethane Common Problems. Verkkoaineisto. Crosslink Technology Inc. <<http://www.crosslinktech.com/support/trouble-shooting-guide/epoxy-urethane-common-problems.html>>. Luettu 30.9.2017.
- 17 The Importance of Epoxy Glass Transition Temperature. 2016. Resin Designs™. <<https://resindesigns.com/2016/05/10/the-importance-of-epoxy-glass-transition-temperature/>>. Luettu 22.9.2017.
- 18 McClelland, D. 2014. Post Curing Thermoset Resins. Verkkoaineisto. Hapco, Inc. <<https://hapcoincorporated.com/post-curing-thermoset-resins/>>. Luettu 10.10.2017.
- 19 Muotin ja valukappaleiden valmistuksen opas. Verkkoaineisto. Silcom Oy. <[http://silcom.fi/upload/File/Muotin%20valmistuksen%20ja%20valukappaleiden%20valmistuksen%20opas\(1\).pdf?rnd=1315237511](http://silcom.fi/upload/File/Muotin%20valmistuksen%20ja%20valukappaleiden%20valmistuksen%20opas(1).pdf?rnd=1315237511)>. Luettu 13.9.2017.
- 20 How (and Why) to Vacuum Degas RTV Silicone Rubber and Casting Resins in a Degassing Chamber. 2013. Easy Composites Ltd. Verkkoaineisto (video). <<https://www.youtube.com/watch?v=GKddrZI4qAo>>. Luettu 18.10.2017.
- 21 What is Condensation Cure and Addition Cure Silicone?. EnvironMolds, LLC. Verkkoaineisto. <<https://www.artmolds.com/condensation-addition-cured-silicone>>. Luettu 1.10.2017.
- 22 Engineering Polyurethanes - RIM Part and Mold Design Guide. 2008. Bayer MaterialScience LLC. Verkkoaineisto. <www.reactioninjectionmolding.com/wp-content/.../RIM-PartMoldDesignGuide.pdf>. Luettu 23.9.2017.
- 23 Zalewski, M. 2013. Prototypes That Last: Simple Tips for Making Durable Parts, Part 2. Verkkoaineisto. <<https://makezine.com/2013/06/13/prototypes-that-last-simple-tips-for-making-durable-parts-part-2/>>. Luettu 2.10.2017.
- 24 Campbell, F.C. 2010. Structural Composite Materials. Ohio: ASM International.
- 25 Mold Release Agent Chemistries: Which is right for you?. 2016. Verkkoaineisto. Miller-Stephenson, Inc. <<https://www.miller-stephenson.com/mold-release-agent/>>. Luettu 15.10.2017.

- 26 Release Agents. Verkkoaineisto. HP-Textiles GmbH. <http://hp-textiles.com/proddat/Entscheidungshilfe_Trennmittel_E.pdf>. Luettu 15.10.2017.
- 27 Ulrich, K. & Eppinger, S. 2008. Product Design and Development. Singapore: MCGraw-Hill Inc.
- 28 Honkala, S., Hämäläinen, M., Koisaari, T., Reinikainen, M., Sipilä, P. & Vanhamaa, M. 2006. Tuotekehityksen ABC-kirjanen. Helsinki: Teknillinen korkeakoulu. Konetekniikan osasto, konesuunnittelun laboratorio. 1.10.2017.
- 29 Broekhuijsen, N. 2015. Aqua Computer Makes 3D-Printable Skylake CPU Delidding Tool. Verkkoaineisto. <<http://www.tomshardware.com/news/aqua-computer-skylake-delid-spacer,30806.html>>. Luettu 22.10.2017.

Konsepti A:n valuhartsit - tuoteseloste

TASK® 9 Colormatch

Color Matching High Performance Resin



www.smooth-on.com

PRODUCT OVERVIEW

TASK®9 Colormatch is a high performance urethane casting resin that features very high compressive strength and tensile strength. TASK®9 is clear amber, which makes this plastic very easy to color using SO-Strong® or IGNITE® colorants. With a mix ratio of 1A:1B by volume, TASK®9 is easy to use and a low mixed viscosity (300 cps) ensures minimal bubble entrapment. Pot life is 7 minutes and cure time is about 60 minutes (depending on mass).

TASK®9 is ideal for making impact resistant tooling, color accurate prototypes / models as well as durable reproductions. This resin is designed for casting in thicknesses up to ½" (1.27 cm).

TECHNICAL OVERVIEW

Mix Ratio; 1A:1B by volume 115A:100B by weight	
Mixed Viscosity (cps); 300	(ASTM D-2393)
Specific Gravity, g/cc; 1.14	(ASTM D-1475)
Specific Volume, cu. in. /lb.; 24.3	(ASTM D-1475)
Pot Life; 7 minutes @ 73°F/23°C	(ASTM D-2471)
Cure time; 1 hour @ 73°F/23°C **	
Color; Clear Amber	
Shore D Hardness; 85	(ASTM D-2240)
Ultimate Tensile, psi; 7,800	(ASTM D-638*)
Tensile Modulus; 370,000 psi	(ASTM D-638*)
Elongation @ Break; 6%	(ASTM D-638*)
Flexural Strength; 11,850 psi	(ASTM D-790*)
Flexural Modulus; 350,000 psi	(ASTM D-790*)
Compressive Strength; 11,000 psi	(ASTM D-695*)
Heat Deflection Temp; 131°F/55°C	(ASTM D-648*)
Compressive Modulus; 98,000 psi	(ASTM D-695*)
Shrinkage; 0.009 in/in	(ASTM D-2566*)

* Value measured after 7 days at 73°F/23°

** Depending on Mass

PROCESSING RECOMMENDATIONS

Preparation . . .

Materials should be stored and used in a warm environment (73°F/23°C). These products have a limited shelf life and should be used as soon as possible. All liquid urethanes are **moisture sensitive and will absorb atmospheric moisture**. Mixing tools and containers should be clean and made of metal, glass or plastic. Mixing should be done in a well-ventilated area. Wear safety glasses, long sleeves and rubber gloves to minimize contamination risk. **Because no two applications are quite the same, a small test application to determine suitability for your project is recommended if performance of this material is in question.**

Release Agent . . .

Silicone rubber molds (Mold Max® Silicones) do not require a release agent. Applying a release agent, however, will prolong the life of the mold. A release agent is necessary to facilitate demolding when casting into urethane rubber molds. Use a release agent made specifically for mold making (Universal® Mold Release or Mann's Ease Release®200 available from Smooth-On or your Smooth-On distributor). A liberal coat of release agent should be applied onto all surfaces that will contact the plastic.

Mixing . . .

Shake or stir both Part A & Part B before using. After dispensing required amounts of Parts A and B into mixing container, **mix thoroughly**. Stir deliberately making sure that you scrape the sides and bottom of the mixing container several times. Be careful not to splash low viscosity material out of the container. Material will briefly turn cloudy during mixing. Continue mixing until material becomes clear again before pouring.