

Santtu Mäkinen

METALLIKAPPALEIDEN VALMISTUS SIDEAINEEN SUIHKUTUS - MENETELMÄLLÄ

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Jorma Vihinen
Toukokuu 2020

TIIVISTELMÄ

Santtu Mäkinen: Metallikappaleiden valmistus sideaineen suihkutusta -menetelmällä
Tampereen yliopisto
TkK-tutkinto-ohjelma, Konetekniikka
Kandidaatintyö
Toukokuu 2020

Sideaineen suihkutusta -menetelmä on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa kappaleita valmistetaan liittämällä jauhepartikkeleita toisiinsa sideaineen avulla. Tässä työssä tutkitaan sideaineen suihkutusta -menetelmän käyttöä metallikappaleiden valmistuksessa sekä tällä menetelmällä valmistettujen metallikappaleiden ominaisuuksia. Työn tavoitteena on selvittää sideaineen suihkutusta -menetelmän vahvuudet ja heikkoudet metallikappaleiden valmistuksessa, sekä selvittää, minkälaisia teknologioita valmistajat käyttävät laitteissaan ja minkälaisia laitteita näiltä valmistajilta on saatavilla.

Työ on toteutettu kirjallisuusselvityksenä ja se on jaettu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käsitellään sideaineen suihkutusta -menetelmän toimintaperiaatetta, menetelmällä valmistettujen kappaleiden jälkikäsitelyä, menetelmään soveltuvia materiaaleja ja sideaineita sekä niiden ominaisuuksia. Toisessa osassa käsitellään menetelmän soveltuvuutta metallikappaleiden valmistukseen tarkastelemalla menetelmän valmistusaikaa, valmistettujen kappaleiden laatua sekä valmistuksessa esiintyviä haasteita. Viimeisessä osassa käydään läpi sideaineen suihkutusta -menetelmän laitevalmistajia, niiden ratkaisuja menetelmän ongelmakohtiin sekä saatavilla olevia laitteita.

Työssä selviää, että menetelmän suurimpia ongelmakohtia ovat pitkä jälkikäsitelyaika sekä valmiin kappaleen huokoinen rakenne ja tämän poistamisesta johtuva merkittävä kutistuminen. Kappaleissa esiintyvien ongelmakohtien vaikutus voidaan kuitenkin minimoida oikealla materiaallivalinnalla ja sintrausprosessin optimoinnilla. Pitkää jälkikäsitelyaikaa voidaan kompensoida kasvattamalla samanaikaisesti tuotettujen kappaleiden määrää, jonka mahdollistaa muita materiaalia lisääviä menetelmiä parempi soveltuvuus sarjatuotantoon.

Valmistajaselvityksessä huomataan, että kiinnostus sideaineen suihkutusta -menetelmää kohtaan on noussut ja uusia laitevalmistajia on ilmaantunut viime vuosien aikana. Nämä laitevalmistajat ovat kehittäneet erilaisia teknisiä ratkaisuja, joilla saadaan minimoitua menetelmän suurimpia ongelmakohtia ja parantaa menetelmän toimintaa metallikappaleiden valmistuksessa. Työssä selviää myös, että laitevalmistajat tarjoavat laitteita monipuolisesti eri käyttökohteisiin yksittäiskappaletuotannosta aina kohtuullisen suureen sarjatuotantoon asti.

Avainsanat: materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, metallikappaleiden valmistus, jauhepeti-
menetelmät

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SIDEAINEEN SUIHKUTUS -MENETELMÄ.....	2
2.1 Menetelmän peruseriaate.....	2
2.1.1 Järjestelmän perusrakenne	2
2.1.2 Menetelmän toimintaperiaate	4
2.2 Jälkikäsittely.....	5
2.3 Materiaalit	7
2.4 Sideaineet.....	9
3. METALLIKAPPALEIDEN VALMISTUS	11
3.1 Valmistusaika.....	11
3.2 Valmistettujen kappaleiden laatu.....	13
3.2.1 Dimensionaalinen tarkkuus	13
3.2.2 Mekaaniset ominaisuudet	14
3.3 Valmistuksen haasteet	16
4. VALMISTAJASELVITYS	18
4.1 Laitteiden valmistajia.....	18
4.2 Valmistajien tekniikan vertailu	19
4.2.1 ExOne.....	19
4.2.2 HP	20
4.2.3 Desktop Metal.....	21
4.3 Saatavilla olevat laitteet	21
5. YHTEENVETO.....	23
LÄHTEET	24

1. JOHDANTO

Sideaineen suihkutus -menetelmä on Massachusettsin teknisessä korkeakoulussa (Massachusetts Institute of Technology, MIT) 1980-luvulla kehittämä materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa kappale valmistetaan kerroskerrokselta liittämällä materiaali jauhepartikkeleita toisiinsa sideaineen avulla. Tällä valmistusmenetelmällä voidaan valmistaa kappaleita useista eri materiaalityypeistä, kuten metalleista, keraameista ja polymeereistä, jos käyttökohteeseen löydetään sopiva sideaine. (MIT 1989) Tässä työssä keskitytään kuitenkin vain metallikappaleiden valmistamiseen kyseisellä menetelmällä.

Työn tavoitteena on selvittää, minkälaisia vahvuuksia ja heikkouksia sideaineen suihkutus -menetelmällä on metallikappaleiden valmistuksessa ja, miten näitä vahvuuksia ja heikkouksia voidaan käyttää hyödyksi tai miten niiden vaikutuksia voidaan minimoida. Tutkimus toteutetaan kirjallisuusselvityksenä, jossa tietoa etsitään alan kirjallisuudesta, erilaisista konferenssijulkaisuista ja artikkeleista.

Ensin tarkastellaan, miten kappaleiden valmistus tapahtuu ja mitä materiaaleja sideaineen suihkutus -menetelmällä voidaan valmistaa. Tämän jälkeen tutustutaan valmistusmenetelmän vahvuuksiin ja mahdollisiin haasteisiin metallikappaleiden valmistuksessa. Lopuksi käydään vielä läpi laitevalmistajia vertailemalla valmistajien laitteita ja niissä käytettyä teknologiaa. Tällä vertailulla pyritään selvittämään, minkälaisia laitteita on saatavilla ja minkälaisiin käyttötarkoituksiin eri valmistajien laitteet soveltuvat.

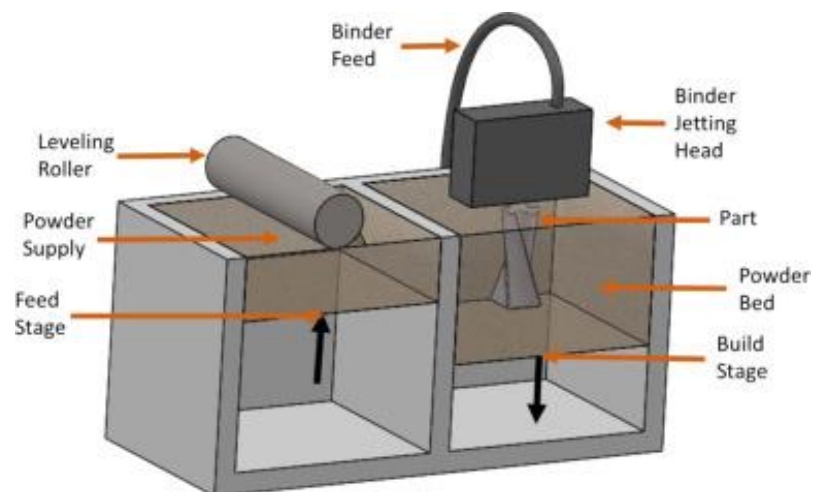
2. SIDEAINEEN SUIHKUTUS -MENETELMÄ

Tässä luvussa selvitetään ensin sideaineen suihkutus -menetelmän valmistusprosessin peruseriaate ja järjestelmän perusrakenne, minkä jälkeen keskitytään tarkemmin menetelmällä valmistettujen kappaleiden jälkikäsittelyyn. Tämän jälkeen selvitetään, minkälaisia materiaaleja tällä menetelmällä voidaan valmistaa. Lopuksi selvitetään vielä, minkälaisia sideaineita valmistuksessa voidaan käyttää.

2.1 Menetelmän peruseriaate

2.1.1 Järjestelmän perusrakenne

Sideaineen suihkutus -menetelmä on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa materiaalijauheen partikkeleita kiinnitetään toisiinsa sideaineen avulla muodostaen kolmiulotteisia kappaleita. Tutustutaan ensin menetelmässä käytetyn järjestelmän perusrakenteeseen, joka on esitetty kuvassa 1. Järjestelmä koostuu kahdesta toisiinsa nähden pystysuunnassa eri suuntiin liikkuvista säiliöistä, raaka-aineen levitykseen ja tasoitukseen käytetystä telasta sekä yhdestä tai useammasta sideainetta suihkuttavasta tulosuspästä, joka on valmistuksen tarkkuuden kannalta järjestelmän merkittävin osa. (Saheli 2018, s. 9)



Kuva 1. Järjestelmän perusrakenne (Gonzalez et al. 2016).

Järjestelmän kaksi säiliötä ovat säiliö jauheena olevalle materiaalille sekä säiliö, jossa yksi tai yleensä useampi kappale valmistetaan. Säiliöt on asetettu pystysuunnassa liikkuville tasoille, jotka liikkuvat toisiinsa nähden eri suuntiin aina kun edellinen kerros valmistuu. Valmistussäiliö laskee valmistuksen aikana alaspäin ja raaka-ainesäiliö nousee

ylöspäin aina yhden kerrospaksuuden verran. Tällä tavalla valmistunut osa kappaleesta laskeutuu ja uusi materiaali saadaan siirrettyä säiliöstä toiseen, jotta voidaan siirtyä seuraavan kerroksen valmistukseen. Tämä raaka-aineen siirto tapahtuu telan avulla, jolla raaka-aine siirretään valmistussäiliöön tasaisesti koko valmistusalueelle. Tämä on valmistuksen kannalta tärkeä työvaihe valmistuksen luotettavuuden ja valmistettujen kappaleiden tasalaatuisuuden kannalta. (Salehi 2018, s. 9)

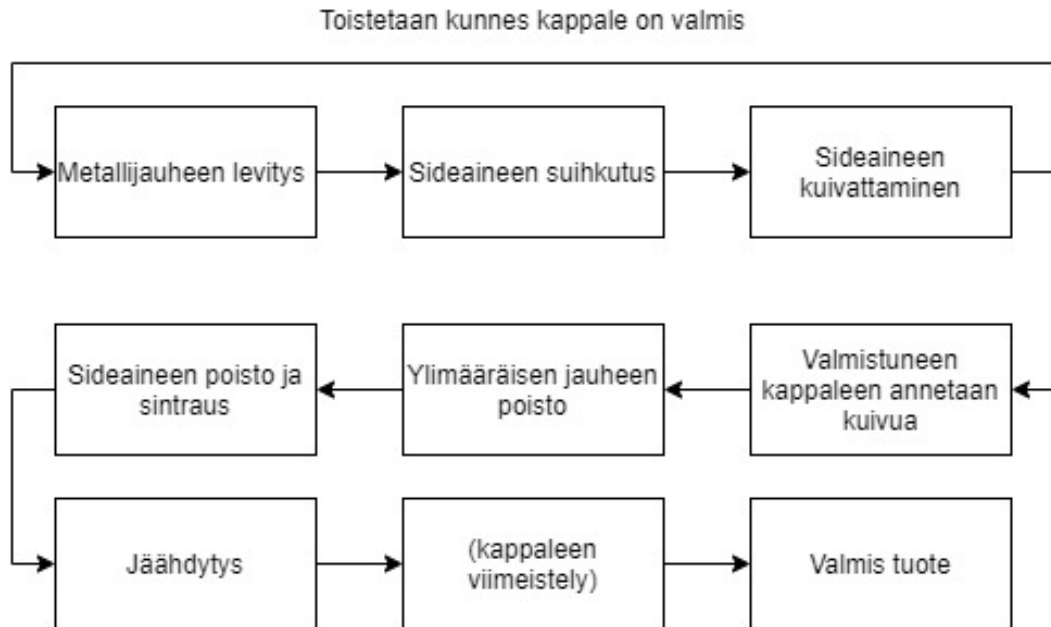
Sideaineen suihkuttamiseen käytetään yhtä tai useampaa tulostuspäätä, joiden määrä riippuu halutusta tulostusnopeudesta. Yhdessä tulostuspäässä voi olla muutamista sadoista suuttimista kymmeneen tuhansiin suuttimiin. HP:n (2018) mukaan heidän uusissa laiteissaan on kuusi erillistä tulostuspäätä, joissa jokaisessa on 10 560 suutinta. Desktop Metallin (2019) tulostimissa on taas yksi 70 000 suuttimen tulostuspää. Suuttimien suurella määrällä pyritään lisäämään tulostimien tuottavuutta, kasvattamaan tulostusresoluutiota sekä lisäämään laitteen valmistusvarmuutta. Valmistusvarmuutta saadaan lisäämällä sijoittamalla suuttimia samaan linjaan niin, että yhtä tulostusalueen pistettä kohti on useampia suuttimia. Tällä tavalla aseteltuna jokaisen suuttimen ei tarvitse olla toiminnassa koko prosessin ajan ja käyttämättömät suuttimet voivat olla varalla suuttimen vikaantumisen varalta. Suuttimien toimintaa tarkkaillaan koko tulostusprosessin ajan, ja vian havaintohetkellä voidaan vaihtaa vikaantunut suutin ehjään normaalisti toimivaan suuttimeen. (HP 2018; Zabka 2018, s. 582–591)

Sideaineen suihkutusta tulostuspäältä ohjataan joko jatkuvan virtauksen *Continuous Inkjet* -tekniikalla (CIJ), jossa virtausta ohjataan sähkökentän avulla tai yleisemmin käytössä olevalla *Drop On Demand* -tekniikalla (DOD). DOD-tekniikkaa käytettäessä voidaan jokaista suutinta ohjata erikseen ja tällä tavalla suihkuttaa sideainetta vain tilanteen vaatiessa. DOD-tekniikalla saavutettava pienempi pisarakoko ja pisaroiden asettamisen suurempi tarkkuus ovat suurimpia syitä sen yleisyyteen verrattuna CI -tekniikkaan. Yleisimmät tekniikat sideaineen suihkutukseen DOD-tekniikalla ovat lämmön avulla ohjautuva *Thermal Inkjet* -tekniikka (TIJ) sekä pietsosähköilmiöön perustuva tekniikka. (Salehi 2018, s. 63–71)

TIJ- ja pietsosähkötekniikoissa suihkutusta tapahtuu sähköä avulla tuotettavalla paineen kasvulla sideaineessa, mikä aiheuttaa hetkellisen virtauksen suuttimessa. TIJ-tekniikassa paineen kasvu tuotetaan nopeasti lämpenevällä lämpövastuksella luotavan pienen sideainehöyrykuplan avulla ja pietsosähkötekniikalla sähkövirta johdetaan kiteeseen, jonka muodonmuutos aiheuttaa paineen kasvun sideaineessa. (Salehi 2018, s. 63–71)

2.1.2 Menetelmän toimintaperiaate

Tutustutaan seuraavaksi, minkälaisella prosessilla sideaineen suihkutus -menetelmässä valmistetaan kappaleita. Toimintaperiaate on esitetty prosessikaaviossa kuvassa 2.



Kuva 2. Sideaineen suihkutus -menetelmälle tyypillinen valmistusprosessi, perustuu lähteisiin (HP 2018; Salehi 2018 s. 9).

Käydään läpi kyseessä oleva valmistusprosessi kuvassa 2 esitetystä järjestyksessä. Kappaleita valmistetaan kerroksittain yhden kerrospaksuuden paksuudella kerrallaan. Prosessi alkaa materiaalijauheen siirtämisellä ja levittämisellä raaka-ainesäiliöstä valmistussäiliöön. Tämän jälkeen sideainetta suihkuttava tulostuspää kulkee tulostusalueen ylitse samalla ruiskuttaen sideainetta laitteelle annettujen ohjeistusten mukaisiin paikkoihin. Tämä sideaineen suihkutus -vaihe on hyvin samanlainen perinteisen mustesuihkutulostuksen kanssa kuitenkin, sillä erolla, että musteen sijasta suihkutetaan sideainetta. Kun sideaine on levitetty haluttuihin paikkoihin tulostusalustalla, sen annetaan kuivua, ennen seuraavan kerroksen valmistamisen alkamista. Näin prosessi etenee, kunnes halutut ”vihreät” kappaleet ovat valmistuneet. (HP 2018; Salehi 2018, s. 9) Vihreällä kappaleella tarkoitetaan tässä yhteydessä keskeneräistä sintraamatonta kappaletta.

Kun kappaleet ovat valmistuneet, niissä olevan sideaineen annetaan kuivua, minkä jälkeen kappaleiden ympäriltä poistetaan ylimääräinen raaka-aine ”kakku”. Kappaleet eivät kuitenkaan ole vielä valmiita, vaan niiden toimintakuntoon saaminen vaatii vielä jälkikäsittelyä. Jälkikäsittelyyn lukeutuu ainakin sideaineen poistaminen sekä sintraus, joiden

avulla kappaleet saadaan täyttämään vaadittavat mekaaniset ominaisuudet. Näiden lisäksi voidaan valmiita kappaleita tarvittaessa myös koneistaa. Näistä menetelmälle tyypillisiä jälkikäsittelymenetelmiä käsitellään tarkemmin seuraavassa luvussa. (HP 2018; Salehi 2018, s. 9)

2.2 Jälkikäsittely

Käytettäessä metallikappaleiden valmistuksessa sideaineen suihkutusta -menetelmää kappaleiden jälkikäsittely on välttämätöntä, jotta voitaisiin saavuttaa käytetylle materiaalille tyypilliset mekaaniset ominaisuudet, vähentää valmistusmenetelmästä johtuvaa huo-koisuutta ja tarvittaessa parantaa kappaleen pinnanlaatua ja dimensioita vaadituissa pai-koissa. Tälle menetelmälle onkin tyypillistä, että käyttökelpoisen kappaleen valmistuk-seen vaaditaan useita jälkikäsittelyvaiheita. Jälkikäsittely viekin huomattavan suuren osan sideaineen suihkutusta -menetelmällä valmistettavien kappaleiden valmistusajasta, sillä itse vihreiden kappaleiden valmistus on hyvin nopea työvaihe. (Salehi 2018) Tyypil-lisimpiä jälkikäsittelyvaiheita ovat sideaineen poistaminen, sintraus sekä valmiin kappaa-leen viimeistely koneistamalla (HP 2018). Näitä työvaiheita käsitellään seuraavaksi.

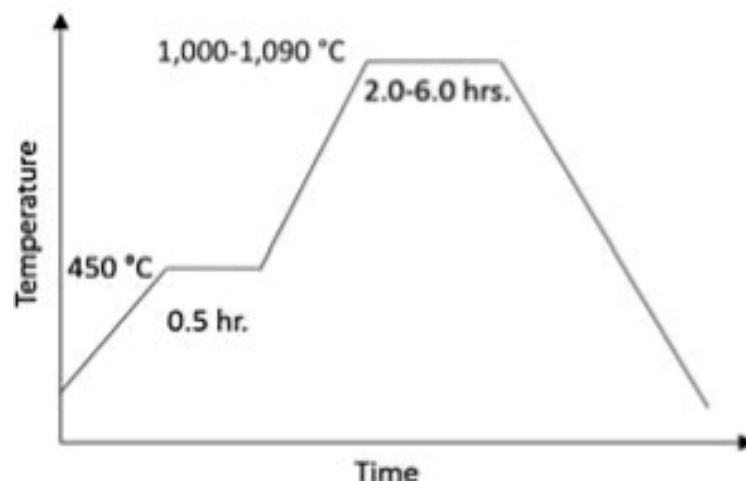
Sideaineen poisto sekä sintraus ovat molemmat lämpökäsittelymenetelmiä, missä käy-tettävät lämpötilat riippuvat kyseessä olevasta materiaalista ja sideaineesta. Nämä kaksi työvaihetta toteutetaan usein samassa uunissa yhden prosessin aikana. Prosessi aloi-tetaan matalamassa lämpötilassa tapahtuvalla sideaineen poistolla. Uunin lämpötilaa nostetaan hitaasti haluttuun lämpötilaan, jossa käytettävä sideaine hajoaa kaasuiksi ja poistuu rakenteesta. Käytettävä lämpötila riippuu sideaineen hajoamislämpötilasta, joka on yleensä muutamia satoja celsius-asteita. Esimerkiksi PVA:lla (Polyvinyylialkoholi) si-deaineen poisto tapahtuu yleensä noin 300 °C lämpötilassa. (Salehi 2018 s. 85–88)

Hitaalla lämpötilan nostolla pyritään tasalaatuisen rakenteeseen. Tällä tavoin menetel-len sideaineen hajoamisesta syntyvät kaasut pääsevät vapautumaan rakenteesta tasai-sesti, eikä kaasua jää rakenteiden sisälle. Tämän lisäksi pitämällä lämpötila mahdolli-simman alhaisena, estetään myös kaasujen reagointi materiaalin kanssa, mikä voi joh-taa faasimuutoksiin sekä muutoksiin mikrorakenteessa. Nämä muutokset voivat vaikut-taa materiaalin mekaanisiin ominaisuuksiin. Erilaisia sideaineen poistoon käytettäviä lämpökäsittelyprofilleja voidaan tutkia termisen analyysin menetelmin. Näiden menetel-mien avulla voidaan määrittää mahdollisimman paljon sideainetta rakenteesta poistava profiili erilaisille sideaineille. (Salehi 2018, s. 85–88)

Sideainetta voidaan pitää epäpuhtautena metallirakenteessa. Sideaineen poistolla pyritäänkin lisäämään lopullisen rakenteen puhtautta ja parantaa näin valmistettujen kappaleiden ominaisuuksia. Kuitenkin rakenteesta poistunut sideaine jättää kappaleeseen huokoisen rakenteen. Tätä huokoisuutta sekä valmiin kappaleen mekaanisia ominaisuuksia, kuten tiheyttä ja murtolujuutta, pyritään sideaineen poiston jälkeen parantamaan sideaineen poistoa korkeammassa lämpötilassa tapahtuvan sintrauksen avulla. (Salehi 2018, s. 85–88)

Sintraus tapahtuu lämpötilassa, joka on lähellä käytettävän materiaalin sulamispistettä, mutta kuitenkin sen alapuolella. Sintrauksen tarkoituksena on diffuusion avulla yhdistää metallipartikkelit kiinteäksi rakenteeksi, jonka tiheys on mahdollisimman suuri materiaalia sulattamatta. (Salehi 2018, s. 85–88) Joissakin käyttökohteissa, kuten lääketieteessä proteesien valmistuksessa, kuitenkin halutaan myös pienempiä tiheyksiä ja huokoinen rakenne (Wiria et al. 2014). Tiheyttä voidaankin säädellä erilaisilla sintrausprofiileilla niin, että sintrauslämpötilaa ja sintrausaikaa kasvattamalla päästään suurempiin tiheyksiin (Verlee et al. 2012). Suurilla sintrauslämpötiloilla ja sintrausajoilla on kuitenkin myös ongelmansa, mitä käsitellään tarkemmin luvussa 3.

Kuvassa 3 on esitetty metalleille tyypillinen sintrausprofiili, josta nähdään sintrausprosessin vaiheet selvästi.



Kuva 3. Tyypillinen kuparin sintrausprofiili (Bai & Williams 2015).

Kuvan tilanteessa lämpötila nostetaan ensin 450 °C, jossa sitä pidetään puolen tunnin ajan. Tässä lämpötilassa tapahtuu sideaineen poisto. Tämän jälkeen lämpötila nostetaan noin 1000°C, jossa lämpötilaa pidetään useamman tunnin ajan. Tässä lämpötilassa tapahtuu kappaleen sintraus. Lopuksi kappaleen annetaan vielä jäähtyä. (Bai & Williams 2015) Kuvassa on esimerkki kuparin sintrausprofiilista ja muilla materiaaleilla lämpötilat ja sintrausajat voivat poiketa merkittävästi mainituista.

Edellä mainittujen pakollisten jälkikäsittelyvaiheiden jälkeen kappaleet voivat vielä vaatia viimeistelyä esimerkiksi koneistamalla. Kappaleiden kriittisiä mittoja voidaan joutua koneistamaan, että päästäisiin haluttuihin toleransseihin ja pinnanlaatuihin (HP 2018). Näin voidaan varmistua, että osat toimivat suunnitellusti.

2.3 Materiaalit

Sideaineen suihkutus -menetelmä mahdollistaa lukuisien eri materiaalien ja materiaalityyppien käyttämisen kappaleiden valmistuksessa. Käydään seuraavaksi läpi, mitä ovat yleisimmin käytössä olevat materiaalit, missä muodossa niitä käytetään ja mitä ominaisuuksia materiaalilta vaaditaan.

Yleisimpiin ja tutkituimpiin menetelmässä käytettyihin materiaaleihin lukeutuu yleisesti käytössä olevia puhtaita metalleja, sekä niiden seoksia, kuten kupari, erilaisia teräksiä sekä titaani ja sen seoksia. Myös muiden yleisten metallien, kuten alumiinin käyttöä on tutkittu kappaleiden valmistuksessa sideaineen suihkutus -menetelmällä. (Bai & Williams 2015; Salehi 2018 s. 95–96; ExOne 2020a) Taulukossa 1 on esitetty ExOne:n listaus vuoden 2020 ensimmäisen neljänneksen käyttöön hyväksytyistä materiaaleista.

Taulukko 1. Exone Q1 2020 hyväksytyt materiaalit (ExOne 2020a).

Teräkset	Muut metallit ja metalliseokset
17-4PH SS	Kupari
304L SS	Titaani
316L SS	Koboltti-Kromi
M2 Tool Steel (Pikateräs)	Volframi rikas metalliseos
H13 Tool steel (Kuuma-työstöteräs)	Inconel 625 (Nikkeli pohjainen superseos)

Taulukossa 1 olevat materiaalit ovat ExOne:n ja sen asiakkaiden testaamia ja ne täyttävät ExOne:n niille asettamat vaatimukset esimerkiksi sintrauksessa ja dimensionaalisissa toleransseissa. Tästä listauksesta nähdään, että materiaali valikoima tällä hetkellä on vielä melko suppea ja teräs painotteinen, joka on ymmärrettävää teräksien käytön yleisyyden takia. Listauksesta puuttuu joitakin erittäin käytettyjä materiaaleja, kuten alumiini. Useat materiaalit ovat kuitenkin jatkuvan kehitystyön alla. (ExOne 2020a) Tästä voidaan päätellä materiaalivalikoiman voivan kasvaa merkittävästi tulevaisuudessa.

Metallien lisäksi kyseisellä menetelmällä voidaan kappaleita valmistaa myös polymeeri-pohjaisista sekä keraamisista materiaaleista. Metallikappaleiden valmistus huomioiden tämä mahdollistaa itse kappaleiden valmistuksen lisäksi myös mahdollisuuden valmistaa esimerkiksi valumuotteja. Tällä tavalla muotteihin on mahdollista valmistaa monimutkaisempia sisäisiä muotoja kuin, mitä perinteisemmillä menetelmillä. (Salehi 2018, s. 9–13)

Materiaalina menetelmässä käytetään samankaltaisia metallijauheita, kuin metallien ruiskuvalussa. Sideaineen suihkutusta -menetelmän yksi eduista verrattuna esimerkiksi jauhepetisulatus -menetelmiin on tämän materiaalin parempi uusiokäyttöaste. Tässä menetelmässä käytetyn jauheen ominaisuudet eivät muutu verrattuna uuteen jauheeseen, joten suuri osa materiaalista voidaan käyttää uudelleen. Jauhepetisulatus -menetelmissä materiaalin uudelleenkäyttöasteen heikkous johtuu menetelmästä aiheutuvista suurista lämpötilaeroista, mitä sideaineen suihkutusta -menetelmässä ei esiinny.

Jauheen raekolla ei teoriassa ole väliä lopputuloksen kannalta, mutta liian pieni tai suuri raekoko voi tuottaa ongelmia prosessin eri vaiheissa. Raekoko vaikuttaa valmistusprosessin aikana jauheen juoksevuuteen, jauheen pakkaustiheyteen, sintraukseen sekä tulostuksen resoluutioon. (Salehi 2018, s. 34–51) Raekoon vaikutus tulostusresoluutioon on yksinkertainen ymmärtää, sillä suurempi raekoko kasvattaa pienimmän mahdollisen yksityiskohdan kokoa. Valmiissa kappaleessa raekoon vaikutukset näkyvät esimerkiksi kappaleen pinnanlaadussa ja tiheydessä. Selvitetään seuraavaksi, miten raekoko vaikuttaa valmistusprosessin kannalta merkittävimpiin jauheen juoksevuuteen ja sintraukseen.

Jauheen juoksevuus vaikuttaa kappaleen valmistusvaiheessa uuden materiaalin siirtämiseen valmistussäiliöön. Tässä vaiheessa telan on siirrettävä tasalaatuinen ohut kerros valmistussäiliöön, jotta olisi mahdollista valmistaa tasalaatuisia tuotteita. Jos jauheen juoksevuus on heikko, tasaiseen lopputulokseen on hyvin vaikea päästä. Butscher et al. tutkimuksen mukaan raekoko vaikuttaa juoksevuuteen niin, että se heikkenee raekoon pienentyessä. Varsinkin hyvin pienillä raekoilla alkaa juoksevuus heiketä huomattavasti, sillä jauhepartikkelien väliset voimat alkavat kasvamaan, mikä vaikeuttaa jauheen siirtämistä. tutkimuksen mukaan optimaalinen keskimääräinen raekoko juoksevuuden kannalta on 20-35 µm välillä. (Butscher et al. 2012)

Sintraukseen raekoko vaikuttaa päinvastaisesti verrattuna juoksevuuteen. Pienemmillä raekoilla saavutetaan parempi sintrautuvuus. Pienemmän raekoon ansiosta sintrauksessa tapahtuvan diffuusion aktivaatioenergia laskee, sillä partikkelit pääsevät tehokkaammin vuorovaikuttamaan toistensa kanssa pienillä raekoilla. Koska sintrauksella on hyvin suuri merkitys käyttökelpoisten metallikappaleiden valmistuksessa, sintrauksen

kannalta sopivan raekoon käyttäminen on hyvin tärkeää, jotta voidaan saavuttaa mahdollisimman tiheä rakenne. (Salehi 2018, s. 34–51)

Raekoon vaikutuksista juoksevuuteen ja sintraukseen voidaan huomata, ettei raekoon valinta ole välttämättä yksiselitteinen asia, vaan valinnassa täytyy tehdä kompromissi eri ominaisuuksien suhteen. Kuitenkin sintraus on onnistuneen kappaleen kannalta hyvin tärkeä valmistusvaihe, joten sitä voidaan priorisoida hieman juoksevuuden suhteen kuitenkin juoksevuutta täysin menettämättä. (Salehi 2018, s. 34–51)

2.4 Sideaineet

Sideaineen suihkutuksen menetelmässä sideaineen valinnalla on suuri merkitys onnistuneen metallikappaleen valmistuksessa. Eri materiaalien erilaisten ominaisuuksien vuoksi, voidaan eri materiaaleille tarvita erilaisia sideaineita. Oikealla sideaineen valinnalla voidaan välttää ongelmia kappaleen valmistuksessa ja sen jälkikäsittelyssä. Oikein toimiva sideaine estää vääristymien, kuten kerrosten siirtymisen, syntyminen valmistuksen aikana ja pitää valmiin vihreän kappaleen mahdollisimman kestäväenä jälkikäsittelyvaiheissa ennen sideaineen poistoa. Sideaineen poistossa oikein toimiva sideaine häviää rakenteesta jättämättä rakenteeseen jäännöksiä itsestään ja mahdollistaa puhtaan materiaalin valmistamisen. Käydään seuraavaksi läpi, minkälaisia sideaineita käytetään ja mitä ominaisuuksia niiltä vaaditaan. (Salehi 2018, s.50–52)

Metallikappaleiden valmistuksessa sideaineen suihkutuksen menetelmällä käytössä on pääosin kolme eri sideainetyyppiä. Näitä tyyppisiä ovat vesi- ja liuotinpohjaiset polymeeriliuokset sekä metallisuolaliuokset. Näistä kaupallisessa käytössä on lähinnä vesi- ja liuotinpohjaisia sideaineita. Polymeerinä näissä sideaineissa käytetään lämmöstä kovettuvia polymeerejä, kuten esimerkiksi PVA:a. (Salehi 2018, s. 50–52) Sideaineiden valmistajat kehittävät koko ajan uusia mahdollisia sideaineita, joilla voidaan valmistaa erilaisia ja mahdollisesti ongelmallisia materiaaleja. Nämä ongelmat liittyvät yleensä sideaineen tai sen jäämien reagointiin materiaalin kanssa. Esimerkiksi erittäin paljon metallikappaleiden valmistuksessa käytetty alumiini käyttäytyy heikosti sideaineesta rakenteeseen jäävän hiilen kanssa (ExOne 2020).

Sideaineen valintaan vaikuttaa käytössä oleva tulostuspää ja sen suuttimet. Tulostuspään valmistajan määritysten perusteella tulee valita sideaine, jolla on sopiva viskositeetti, pintajännitys sekä partikkelikoko kyseessä olevaan tulostuspäähän. Väärä parametrien valinta voi johtaa tuotannon luotettavuuden heikkenemiseen esimerkiksi suuttimen tukkeutumisesta ja niiden suuresta kulumisesta johtuen. Sideaine valinta vaikuttaa

myös suutinten kykyyn muodostaa tasaisia pisaroita sekä näiden pisaroiden leviämiseen niiden osuessa materiaali jauheen pintaan. (Utela et al. 2008; Salehi 2018, s. 50–52)

Sideaineen haluttuun viskositeettiin vaikuttaa käytössä oleva tulostuspäättyppi ja sen tapa tuottaa sideainepisaroita. Magdassin (2009 s.19) mukaan sideaineen viskositeetti on yleensä alle 20 cP:a, mutta se vaihtelee pietsosähköilmiöön perustuvan laitteen 8-15 cP:sta, TIJ-tekniikkaa hyödyntävän laitteen alle 3 cP:n viskositeettiin. Pisaroiden muodostukseen vaikuttaa viskositeetin lisäksi myös sideaineen pintajännitys. Pintajännitystä manipuloimalla voidaan vaikuttaa muodostuvan pisaran kokoon niin, että pisaran koko kasvaa sideaineen pintajännitystä kasvattamalla. Tämän lisäksi sideaineen pintajännityksellä on myös toinen merkittävä tehtävä pisaran muodostuksessa. Tarpeeksi suuri pintajännitys estää ylimääräisen sideaineen vuotamisen suuttimesta käytön aikana. (Magdassi 2009 s. 19–42)

Viskositeetti ja pintajännitys vaikuttavat myös pisaran leviämiseen sen osuessa materiaalin pintaan. Pienemmillä viskositeetin ja pintajännityksen arvolla pisaran leviämisalue kasvaa, mutta Utela et al. (2008) mukaan liian suuri leviämisalue voi johtaa huonoon pinnanlaatuun. Tämä johtuu siitä, että sideaineen leviämisalueen koko vaikuttaa suoraan tulostustarkkuuteen xy-tasolla ja sen koon kasvaessa pienimmän mahdollisen yksityiskohdan koko kasvaa samassa suhteessa.

3. METALLIKAPPALEIDEN VALMISTUS

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin metallikappaleiden valmistusta sideaineen suihkutuksen menetelmällä, sekä tällä menetelmällä valmistettujen kappaleiden tyypillisiä ominaisuuksia. Ensin käsitellään menetelmän keskimääräistä valmistusaikaa ja, mitkä asiat siihen vaikuttavat. Tämän jälkeen käsitellään menetelmän tarkkuutta ja valmistuneiden kappaleiden mekaanisia ominaisuuksia. Lopuksi tarkastellaan vielä metallikappaleiden valmistuksen yleisiä haasteita.

3.1 Valmistusaika

Sideaineen suihkutuksen menetelmässä valmistusaika ei ole yksiselitteinen asia ja sen vertaaminen muihin lisäävän materiaalin valmistusmenetelmiin on haasteellista. Sideaineen suihkutuksen menetelmässä vihreän kappaleen valmistus on erittäin nopea toimenpide verrattuna muihin materiaalia lisääviin valmistusmenetelmiin, mutta muihin menetelmiin verrattuna jälkikäsitelyyn aikaa kuluu merkittävästi enemmän. Käsitellään seuraavaksi, mistä sideaineen suihkutuksen menetelmän valmistusaika koostuu, minkä jälkeen verrataan tarkemmin valmistusaikaa verrattuna muihin materiaalia lisääviin menetelmiin.

Vihreän kappaleen valmistuksessa suurin osa ajasta kuluu kerrosten valmistusten välissä tapahtuvaan sideaineen kuivumisprosessiin. Chenin ja Zhaon (2016) mukaan kuivumiselle voidaan löytää optimaalinen aika, joka heidän tutkimuksessaan todettiin olevan 30 s. Kuivumisaika riippuu toki käytetystä materiaalista ja sideaineesta ja Salehin (2018 s. 79) mukaan tämä kuivumisaika voi korkeintaankin olla minuutin luokkaa.

Kuivumisprosessi täytyy suorittaa kappaleen valmistuksen aikana aina niin monta kertaa kuin on valmistettavia kerroksia. Valmistusaikaan vaikuttaa siis myös valmistettujen kerrosten määrä ja näin ollen myös kerrospaksuus ja materiaalin raekoko. Kasvattamalla materiaalin raekokoa voidaan valmistaa paksumpia kerroksia ja näin vähentää tarvittavien kerrosten määrää. Tällä on toki sivuvaikutuksia valmiin kappaleen mekaanisiin ominaisuuksiin sekä myös tulostustarkkuuteen, eikä kerrospaksuuden kasvattaminen ole näin ollen välttämättä järkevä ratkaisu valmistusajan lyhentämisessä (Chen & Zhao 2016).

Merkittävimmät valmistusaikaan vaikuttavat työvaiheet ovat sideaineen poisto sekä sintraus. Näiden vaiheiden kesto voi olla useita tunteja. Sideaineen poiston kesto riippuu käytetystä kerrospaksuudesta ja käytetystä sideaineen määrästä. Sideaineen poiston tulee jatkua niin kauan, kunnes kaikki sideaine on hävinnyt rakenteesta. Rishmawi et al.

(2018) tutkimuksen mukaan tämä prosessi voi kestää 5–40 minuuttia riippuen sideaineen määrästä ja kerrospaksuudesta. Tässä toki ei ole huomioitu lämmön nostoon kuluva aikaa. Tutkimuksessa lämpötilaa kasvatettiin 5 °C/min, minkä takia esimerkiksi lämpötilan nosto 300 °C veisi aikaa 60 minuuttia. Kokonaisaika voi siis vaihdella tässä lämpötilassa 65-100min välillä. Do et al. (2017) vastaavassa tutkimuksessa 460 °C ta-
pahtuvassa sideaineen poistossa aikaa käytettiin 2 tuntia ja kokonaisaika oli yli 3 tuntia. Näistä tuloksista voidaan nähdä, että tähän prosessiin kuluva aika on hyvin tapauskoh-
tainen ja riippuu käytetystä sideaineesta ja sen määrästä.

Sintraukseen vaadittu aika riippuu suurimmalta osin käytetystä materiaalista, sen rae-
koosta ja sintrauslämpötilasta. Sintrausaika riippuu myös siitä, kuinka tiheää lopullisesta
kappaleesta halutaan ja siitä tuoko huokoisuus ongelmia käyttökohteessa. Lähelle 100%
suhteellista tiheyttä pääseminen vaatii hyvin pitkiä sintrausaikoja. Rishmawi et al. tutki-
muksessa päästiin noin 80% suhteelliseen tiheyteen 2 tunnin sintrausajalla ja 6 tunnin
sintrausajalla päästiin 90% suhteelliseen tiheyteen materiaalin ollessa puhdas rauta.
Tutkimuksessa todettiin myös, että pidemmillä sintrausajoilla olisi mahdollista päästä
vielä korkeampiin suhteellisen tiheyden arvoihin. (Rishmawi et al. 2018) Do et al. tutki-
muksessa, jossa päämääränä oli kehittää metodi täysin tiheiden ruostumattomasta te-
räksestä valmistettujen kappaleiden valmistukseen, päästiin 99,6% suhteelliseen tihey-
teen 4 tunnin sintrauksella. Tässä tutkimuksessa sintrausprosessin kokonaisaika oli noin
12 tuntia, kun ajassa on huomioitu lämmitys- ja jäähdytysvaiheet. (Do et al. 2017)

Näistä voidaan nähdä, että pelkästään lämpökäsittelyyn voi kulua aikaa yli 15 tuntia. Kun
tähän aikaan lisätään vielä muihin jälkikäsittelyvaiheisiin kulunut aika, niin aikaa kuluu
helposti yli 20 tuntia pelkästään jälkikäsittelyyn. Näihin jälkikäsittely vaiheisiin kuluvan
ajan takia saattaa kappaleen valmistusaika kasvaa suuremmaksi kuin muilla materiaalia
lisäävillä menetelmillä (Klein 2019).

Sideaineen suihkutusta -menetelmällä on kuitenkin yksi suuri vahvuus verrattuna muihin
materiaalia lisääviin menetelmiin, mikä vähentää pitkän jälkikäsittelyyn kuluvan ajan vai-
kutusta. Sideaineen suihkutusta -menetelmä mahdollistaa muista menetelmistä poiketen
mahdollisuuden useiden kappaleiden valmistamisen samaan aikaan samassa ajassa.
Kaikkien samassa tasossa olevien kappaleiden valmistukseen menee siis yhtä paljon
aikaa kuin, jos valmistettaisiin vain yksi kappale. Tämä on mahdollista järjestelmällä,
jossa tulostuspään suuttimet kattavat koko valmistusalueen leveyden. Tämän lisäksi
kappaleita voidaan myös valmistaa koko valmistussäiliön tilavuudelta, sillä kappaleiden
valmistusta ei tarvitse aloittaa tulostustasolta. Näiden asioiden takia sideaineen suihku-
tusta -menetelmän nopeus verrattuna muihin menetelmiin kasvaa samanaikaisesti valmis-

tettävien kappaleiden määrän kasvaessa. Tästä ja myös menetelmän hyvästä skaalautuvuudesta johtuen sideaineen suihkutusta -menetelmä on ainoa materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä metallikappaleille, joka mahdollistaa järkevän sarjatuotannon. (Klein 2019)

3.2 Valmistettujen kappaleiden laatu

Tässä luvussa käsitellään ensin sideaineen suihkutusta -menetelmällä valmistettujen kappaleiden dimensionaalista tarkkuutta ja siihen vaikuttavia asioita. Tämän jälkeen tarkastellaan, minkälaisia mekaanisia ominaisuuksia tällä menetelmällä on mahdollista saavuttaa ja mitkä asiat siihen vaikuttavat.

3.2.1 Dimensionaalinen tarkkuus

Dimensionaalinen tarkkuus voidaan jakaa kahteen osaan, vihreän kappaleen dimensioiden tarkkuuteen ja lopullisen kappaleen tarkkuuteen. Kappaleen muodostusvaiheessa tarkkuuteen vaikuttavat tulostuspään ominaisuudet, materiaalin raekoko, sideaineen pisarakoko ja kerrospaksuus. Lopullisen kappaleen tarkkuuteen edellä mainittujen lisäksi vaikuttaa myös sintrauksesta aiheutuva kutistuminen.

Käydään ensin läpi kappaleen muodostusvaiheen tarkkuutta. Z-akselin suunnassa tarkkuuden asettaa kerrospaksuus. Kerrospaksuus kertoo, kuinka paksu jokainen kerros kappaleessa on ja näin ollen määrittää z-akselin suuntaisen resoluution. Tämä resoluutio on yleensä 30-200 µm suuruinen (HP 2018; ExOne 2019). Yleensä käytössä on aina mahdollisimman pieni kerrospaksuus, mikä mahdollistaa paremman resoluution lisäksi myös paremmat lopullisen kappaleen ominaisuudet (Chen & Zhao 2016).

XY-tasolla resoluution määrää sideaineen pisarakoko ja sideaineen leviämialue. Magdassin (2009 s.15) mukaan käytössä olevilla tekniikoilla, optimaalisella sideaineella ja normaaliolosuhteissa voi tämä sideaineen leviämialue olla vähimmillään 30 µm suuruinen. Eri valmistajat ilmoittavatkin laitteiden maksimaaliseksi tulostusresoluutioksi 30-50 µm (ExOne 2019; Desktop Metal 2020).

Nämä edellä mainitut kappaleen muodostusvaiheen resoluutiot eivät kuitenkaan ole lopputuloksen kannalta kovin merkittäviä. Eniten valmiiden kappaleiden tarkkuuteen vaikuttaa sintrausvaiheessa tapahtuva erittäin merkittävä kappaleen kutistuminen. Tämä kutistuminen ja sen hallitseminen on yksi suurimmista ongelmista sideaineen suihkutusta -menetelmässä. Tarkastellaan seuraavaksi, mitkä asiat kutistumiseen vaikuttavat ja miten kutistuminen saadaan minimoitua.

Kutistuminen johtuu sideaineen poiston jälkeen kappaleeseen jäävästä huokoisuudesta ja sen poistamisesta sintrausvaiheessa. Bai et al. mukaan 15% lineaarinen kutistuminen ja 40-50% tilavuuden kutistuminen on tyypillistä sideaineen suihkutusta -menetelmässä. Heidän mukaansa suurin kutistumiseen vaikuttava tekijä on vihreän kappaleen suhteellinen tiheys ja, että suuremmilla suhteellisilla tiheyksillä saadaan kutistuminen minimoitua. Suurin vaikuttaja vihreän kappaleen tiheyteen on valmistussäiliössä olevan jauheen pakkaustiheys. Bai et al. tutkimuksen mukaan pakkaustiheyttä saadaan kasvatettua seostamalla hienompaan materiaali jauheeseen karkeampaa jauhetta. Seostaminen parantaa hienon jauheen juoksevuuutta, minkä takia tasalaatuisen ja tiheän kerroksen luominen on helpompaa kuin pelkällä hienolla jauheella. (Bai et al. 2017)

Mostafaei et al. tutkimuksessa vertailtiin vesi- ja kaasuatomoitujen jauheiden eroja valmiiden kappaleiden mekaanisissa ominaisuuksissa. Vihreiden kappaleiden ja valmiiden kappaleiden tiheydellä on suuri vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin. Heidän tutkimuksessaan selvisi, että kaasuatomisoidulla jauheella pystyttiin saavuttamaan suuremmat tiheydet sekä vihreiden kappaleiden, että valmiiden kappaleiden tiheydessä. Heidän mukaansa ero johtui kaasuatomisoidun jauheen tasaisemmista pyöreämmistä jauhepartikkeleista. (Mostafaei et al. 2017) Tasaisempien muodoltaan parempien jauheiden valmistus kuitenkin lisää merkittävästi materiaalikustannuksia, eikä se näin ollen välttämättä ole aina mahdollinen vaihtoehto.

Edellä mainittujen tutkimusten perusteella voidaan huomata, että merkittävää sintrausvaiheen kutistumista voidaan hallita erilaisin menetelmin ja näin pienentää sen aiheuttamia vaikutuksia valmiiden kappaleiden tarkkuuteen. Rishmawi et al. (2018) tutkimuksen mukaan kutistuminen on kohtuullisen tasaista ja se on ennustettavissa. Kun kutistumista vähennetään esimerkiksi edellä mainituin menetelmin, saadaan kutistumisen tasaisuutta todennäköisesti parannettua. Tämä tasainen kutistuminen mahdollistaa kutistamisen kompensoinnin ja huomioon ottamisen kappaleiden mallinnus- ja suunnitteluvaiheessa ja näin ollen helpottaa tasalaatuisten kappaleiden valmistamista. Kuitenkin hyvin pienien yksityiskohtien luotettava valmistaminen voi olla hankalaa, johtuen kaikesta huolimatta merkittävästä kutistumisesta.

3.2.2 Mekaaniset ominaisuudet

Useiden tutkimusten mukaan suurin vaikutus sideaineen suihkutusta -menetelmällä valmistettujen kappaleiden mekaanisiin ominaisuuksiin on valmiin kappaleen suhteellisella tiheydellä. Näiden tutkimusten mukaan mekaaniset ominaisuudet paranevat merkittävästi, kun valmiin kappaleen huokoisuus vähenee ja suhteellinen tiheys lähestyy täysin

tiheää rakennetta. Muista materiaalia lisäävistä menetelmistä poiketen jäännösjännityksillä ei ole merkittävää vaikutusta tällä menetelmällä valmistetuissa metallikappaleissa, sillä valmistus tapahtuu huoneen lämmössä. Jauhepetisulatus -menetelmissä jäännösjännitykset johtuvat materiaalin sulattamisesta syntyvästä nopeasta lämpötilanvaihtelusta, minkälaisista sideaineen suihkutusta -menetelmässä ei tapahdu. (Klein 2019)

Valmiin kappaleen tiheyteen vaikuttaa hyvin pitkälle samat asiat kuin aikaisemmin käsitellyssä kutistumisessa eli jauheen pakkaustiheys ja vihreän kappaleen tiheys. Näiden lisäksi lopulliseen tiheyteen vaikuttavat sintrausaika ja -lämpötila sekä materiaalin sintrautuvuus eli käytetyn jauheen raekoko. Näitä asioita on käsitelty aiemmin tässä työssä, mutta käydään seuraavaksi lyhyesti läpi, miten ne vaikuttavat lopulliseen tiheyteen.

Parempi jauheen pakkaustiheys kasvattaa vihreän kappaleen suhteellista tiheyttä, mikä puolestaan helpottaa mahdollisimman tiheiden kappaleiden valmistusta. Optimoimalla sintrauslämpötila ja kasvattamalla sintrausaikaa päästään tiheämpiin rakenteisiin. Jauheen raekokoa pienentämällä saadaan parannettua materiaalin sintrautuvuutta, mutta kuten aiemmin tässä työssä on mainittu, hienon jauheen juoksevuus on erittäin huono, mikä heikentää pakkaustiheyttä.

Pakkaustiheyden ja vihreän kappaleen tiheyden optimointi käytiin aiemmin läpi kutistumisen yhteydessä, joten käydään seuraavaksi läpi sintrausvaiheen optimointia tiheämpien kappaleiden valmistuksessa. Mostafaei et al. tutkimuksessa, jossa selvitettiin erilaisesti sintrattujen ja lämpökäsiteltyjen vaikutuksia stelliitistä valmistettujen kappaleiden ominaisuuksiin, huomattiin sintrauslämpötilan vaikuttavan merkittävästi lopullisen kappaleen tiheyteen. Tutkimuksesta voidaan huomata, että muutamien kymmenien asteiden erolla sintrauslämpötilassa voi olla merkittävä kymmenien prosenttien ero suhteelliseen tiheyteen. Tutkimuksessa saavutettiin korkein 99,8% suhteellinen tiheys sintrauksen tapahtuessa 1300 °C ja vain 30 °C alhaisemmassa lämpötilassa ja samassa sintrausajassa suhteelliseksi tiheydeksi saatiin alle 60%. (Mostafaei et al. 2019) Näistä tuloksista voidaan nähdä, että sintrauslämpötilan optimoinnilla on suuri merkitys valmistettaessa kyseessä olevalla menetelmällä täysin tiheitä metallikappaleita.

Do et al. tutkimuksen mukaan valmiin kappaleen tiheyttä voidaan parantaa myös muuttamalla sintrausolosuhteita. Tutkimuksen mukaan usein sintrauksessa käytetty argon suojakaasu jää rakenteen huokosiin ja näin estää täysin tiheän rakenteen syntymisen. Argonia käytettäessä päästiin korkeimmillaan noin 95% suhteelliseen tiheyteen. Korkeampiin tiheyksiin tutkimuksessa päästiin suorittamalla sintraus prosessi tyhjiössä, jolloin

prosessin aikana uunissa ei ole rakenteisiin jääviä kaasuja. Kun tyhjiössä ja muuten samoilla parametreilla suoritettiin sintraus, päästiin lähes täysin tiheään rakenteeseen, jonka suhteellinen tiheys oli 99,6%. (Do et al. 2017) Samaa tyhjiössä sintrausta käytettiin myös edellä mainitussa Mostafaei et al. (2019) tutkimuksessa. Argonia käytetään kuitenkin sintrauksessa estämässä hapettumista, eikä tämän takia tyhjiössä sintraaminen aina ole mahdollista kaikilla materiaaleilla varsinkaan, jos kyseessä on herkästi hapettava materiaali.

Kuten nähdään, on sideaineen suihkutuksen menetelmällä mahdollista päästä hyvin lähelle täysin tiheää rakennetta. Tarkastellaan seuraavaksi, minkälaisia mekaanisia ominaisuuksia tällä menetelmällä valmistetuilta metallikappaleilta voidaan odottaa. Mostafaei et al. tutkimuksessa sideaineen suihkutuksen menetelmällä valmistettujen kappaleiden murtolujuutta ja -venymää verrattiin vastaavasta materiaalista valamalla valmistettujen kappaleiden vastaaviin arvoihin. Sideaineen suihkutuksen menetelmällä valmistettujen kappaleiden murtolujuus oli 8% pienempi ja murtovenymä 10-kertaa suurempi kuin valetun kappaleen ominaisuudet. Kun valmiille kappaleelle tehtiin vielä lämpökäsittely, saatiin murtolujuus ja -venymä lähes vastaamaan valetun kappaleen ominaisuuksia. (Mostafaei et al. 2019) Mostafaei et al. (2017) aiemmassa tutkimuksessa päädyttiin myös saman kaltaisiin lopputuloksiin nikkelpohjaisen seoksen kanssa. Voidaan siis todeta että, sideaineen suihkutuksen menetelmällä on mahdollista, ainakin laboratorio olosuhteissa, päästä valettuja kappaleita vastaaviin mekaanisiin ominaisuuksiin.

3.3 Valmistuksen haasteet

Tässä luvussa tarkastellaan muutamia sideaineen suihkutuksen menetelmässä valmistusprosessin aikana yleisesti syntyviä haasteita ja ongelmia, mitä ei ole vielä käsitelty sekä, miten näitä ongelmia voidaan välttää. Ongelmia syntyy sekä vihreän kappaleen valmistus- että jälkikäsittelyvaiheissa. Valmistusvaiheen ongelmana voidaan pitää onttojen rakenteiden sisään jäävää materiaalia ja jälkikäsittely vaiheessa kappaleen hajoamista josain jälkikäsittelyvaiheessa.

Jauhepedissä valmistettaessa onttoja kappaleita yleinen ongelma on ontton rakenteen sisään jäävä tiivistetty jauhe. Jos ylimääräistä jauhetta ei jostain syystä poisteta rakenteesta, syntyy sintrausprosessin jälkeen ontton kappaleen sijasta täysin kiinteä kappale (Salehi 2018, s. 62–89). Tämä ongelma voidaan ratkaista esimerkiksi suunnittelemalla kappaleeseen reikä, josta ylimääräinen jauhe saadaan poistettua jauheen poiston yhteydessä.

Valmistettavan kappaleen hajoaminen voi olla merkittävä ongelma kaikissa jälkikäsittely vaiheissa, kunnes metallikappaleiden sintrautuminen alkaa. Tämä kappaleen hajoamiseen johtava syy vaihtelee tilanteissa ennen ja jälkeen sideaineen poistamisen. Ennen sideaineen poistamista todennäköisimmin kappaleen hajoaminen tapahtuu jauheenpoiston yhteydessä, missä kappaleita joudutaan käsittelemään esimerkiksi paineilman avulla. Tässä vaiheessa hajoaminen yleensä johtuu heikosta vihreän kappaleen kestävydestä, joka yleensä johtuu väärin valitusta sideaineesta tai sen liian pienestä määrästä valmistusvaiheessa. (Salehi 2018, s. 62–89) Tämä ongelma voidaan siis välttää käyttämällä tilanteeseen sopivaa sideainetta.

Sideaineen poiston jälkeen, kun partikkeleita tukeva sideaine häviää rakenteesta, ollaan kappaleen hajoamisen kannalta hyvin kriittisessä vaiheessa. Tässä vaiheessa kappale voi hajota pelkästään oman painonsa vaikutuksesta, eikä ulkoisia tekijöitä välttämättä vaadita ollenkaan. Kappaleet on siis tuettava ennen sideaineen poistoa ja sintrausta, jotta voidaan välttyä kappaleiden hajoamiselta. Sintraus prosessin ajaksi kappaleet voidaan esimerkiksi tukea korkeita lämpötiloja kestäville keraamijauheilla, mikä tukee rakennetta ja kantamalla sen painon estää sitä hajoamasta. (Klein 2019)

4. VALMISTAJASELVITYS

Tässä luvussa tarkastellaan ensin, mitkä yritykset valmistavat laitteita metallikappaleiden valmistukseen sideaineen suihkutusta -menetelmällä. Tämän jälkeen vertaillaan eri yritysten teknisiä ratkaisuja ja lopuksi tarkastellaan näiden yritysten saatavilla olevia tai lähiaikoina saatavilla olevia laitteita ja niiden ominaisuuksia.

4.1 Laitteiden valmistajia

Viimeisen muutaman vuoden aikana kiinnostus sideaineen suihkutusta -menetelmää kohtaan metallikappaleiden valmistuksessa on kasvanut merkittävästi. Tähän suurimpana syynä on tämän menetelmän selvästi parempi soveltuvuus sarjatuotantoon verrattuna muihin materiaalia lisääviin menetelmiin metallikappaleiden valmistuksessa. Useat uudet valmistajat ovatkin viime aikoina ilmoittaneet kehittävänsä laitteita metallikappaleiden valmistukseen sideaineen suihkutusta -menetelmällä, mistä osa on tulossa markkinoille lähiaikoina. Menetelmän kiinnostus on kasvanut erityisesti autoteollisuudessa, jossa esimerkiksi Volkswagen, BMW ja Ford ovat toimineet yhteistyössä sideaineen suihkutusta -menetelmän laitevalmistajien kanssa (ExOne 2019a; HP 2020; Desktop Metal 2020a).

Yli 20 vuoden ajan ExOne ja sen edeltäjä on ollut käytännössä ainoa merkittävä sideaineen suihkutusta -menetelmän laitevalmistaja. ExOne on valmistanut kyseisen menetelmän laitteita metallikappaleiden valmistukseen vuodesta 1998 lähtien ja on kehittänyt tuotteitaan siitä lähtien asiakaspalautteen ja omien kokemuksiansa perusteella. ExOne on julkaissut markkinoille tähän mennessä 10 eri sideaineen suihkutukseen perustuvaa laitetta metallikappaleiden valmistukseen. Kuitenkin markkinoille on ilmoittautunut viime aikoina mahdollisesti merkittäviä kilpailijoita (ExOne 2019a).

Amerikkalaiset tekniikkajätit HP ja General Electric (GE) ovat ilmoittaneet kehittävänsä sideaineen suihkutusta -menetelmään perustuvia laitteita, joista HP:n laite on tulossa markkinoille loppuvuoden 2020 ja vuoden 2021 aikana. HP on vuodesta 2014 lähtien valmistanut vastaavia laitteita polymeerien valmistukseen ja on nyt laajentamassa toimintaansa myös metallikappaleiden valmistukseen. HP on myös vuosikymmenten ajan valmistanut ja kehittänyt sideaineen suihkutusta -menetelmässäänkin käytettyjä tulostuspääteknologioita perinteisempien 2D-tulostusmenetelmien kohdalla (HP 2020).

GE on toiminut pitkään jauhepetisulatus -menetelmien laitteiden kehityksessä ja valmistuksessa, missä se on käyttänyt sekä elektronisuihkuun että laseriin perustuvia teknologioita. GE on laajentamassa toimintaansa sideaineen suihkutusta -menetelmään. (General

Electric 2020) GE:n laitetta ei käsitellä tässä työssä, sillä tarkempaa tietoa laitteesta ei ole tällä hetkellä saatavilla.

Neljäs laitevalmistaja on kilpailijoihin verrattuna huomattavasti pienempi lähinnä metallikappaleiden materiaalia lisäävään valmistukseen erikoistunut Desktop Metal. Desktop Metal on vielä kohtuullisen nuori yritys, sillä se on perustettu vuonna 2015. Desktop Metalin pienempi laitteista julkaistiin vuoden 2019 lopulla ja on yleisesti saatavilla kevästä 2020 lähtien (Desktop Metal 2020c). Suurempi enemmän sarjatuotantoon suunnattu laite on myös kehityksen kohteena (Desktop Metal 2020b).

4.2 Valmistajien tekniikan vertailu

Tässä luvussa käsitellään luvussa 4.1 mainittujen laitevalmistajien Exone:n, HP:n ja Desktop Metalin laitteissaan käyttämiä teknisiä ratkaisuja ja, miten nämä ratkaisut vaikuttavat laitteiden toimintaan. Käsiteltäviin tekniisiin ratkaisuihin kuuluvat pääosin tulostuspää- ja jauheenlevitysteknologiat.

4.2.1 ExOne

Kolmesta vertailun kohteena olevasta yrityksestä ExOnella on pisin yli 20 vuoden kokemus sideaineen suihkutuksen menetelmästä metallikappaleiden valmistuksessa ja se onkin kehittänyt teknologiaansa eteenpäin näiden vuosien aikana. Tarkastellaan ensin lyhyesti, minkälaista tulostuspääteknologiaa ExOne käyttää laitteissaan. Tämän jälkeen käydään vielä läpi, minkälaisen ratkaisun jauheenlevityksen ongelmiin ExOne on kehittänyt.

ExOne antaa hyvin vähän informaatiota käyttämistään tulostuspäistä, mutta heidän laajasta sideainevalikoimastansa voidaan arvioida heidän käyttävän tulostuspäissään pietsosähköteknologiaa (ExOne 2020b). Magdassin (2010) mukaan pietsosähköteknologian yksi vahvuuksista on nimenomaan laaja sideainevalikoima, mikä TIJ-teknologiassa rajoittuu lähinnä vesipohjaisiin sideaineisiin.

Mielenkiintoisin ExOnen teknisistä ratkaisuista on jauheenlevitykseen kehitetty kolmivaiheinen The ExOne triple act -tekniikka, mitä hyödynnetään sen viimeisimmissä laitteissa. Tässä tekniikassa jauheen syöttö, levitys ja tiivistys on integroitu samaan laiteyksikköön, minkä avulla pyritään parantamaan jauheenlevityksen tasalaatuisuutta varsinkin suurilla valmistusalueilla ja hienoilla jauheilla (ExOne 2019b).

Tekniikassa ensimmäisenä vaiheena on jauheen syöttäminen. Tämä tehdään ultraäänellä avulla ohjattavan supilon avulla. ExOnen mukaan tämä mahdollistaa jauhepartikkelien tasaisen levittämisen ohuissa kerroksissa myös suurilla valmistusalueilla. ExOnen

mukaan tämä tekniikka mahdollistaa myös tarkan jauheenmäärän annostelun. (ExOne 2019b)

Seuraavat kaksi vaihetta ovat erilaisilla pinnoilla varustetuilla rullilla tehtävät jauheen levitys ja sen tiivistäminen. Ensimmäisenä tapahtuvassa jauheenlevityksessä käytössä on korkeakitkainen pinta, mikä mahdollistaa tasaisen jauheenlevityksen ja sen jälkeen tapahtuvassa jauheentiivistyksessä käytössä on vähemmän kitkainen jauhetta siirtämätön pinnoite. (ExOne 2019b)

ExOnen mukaan tällä tekniikalla saadaan parannettua valmiiden tuotteiden tiheyttä ja valmistuksen toistettavuutta. Heidän mukaansa tämä myös vähentää valmistetuissa kappaleissa esiintyviä tiheys eroja noin 90% verrattuna heidän aikaisempiin menetelmiinsä. (ExOne 2019b) Tiheyksien paranemisessa syynä on luultavasti tekniikan mahdollistama suurempi pakkaustiheys hienoilla jauheilla, mikä lisää vihreän kappaleen tiheyttä ja sintrautuvuutta. Kuten aiemmin tässä työssä on mainittu, pakkaustiheys ja jauhepartikkelien raekoko vaikuttavat merkittävästi lopullisen kappaleen tiheyteen.

4.2.2 HP

HP:n lähiaikoina markkinoille tulevan sideaineen suihkutuksen -menetelmää hyödyntävän laitteen teknisistä ratkaisuista on vielä hyvin vähän tietoa. Ainoa merkittävä tekninen ratkaisu, josta he antavat tietoa on tulostuspää ja siihen liittyvät ratkaisut. Tämä teknologia valinta poikkeaa hieman esimerkiksi ExOnen käyttämästä tulostuspääteknologiasta.

HP käyttää laitteessaan tulostuspääteknologiana TIJ-tekniikkaa. Tässä valinnassa suurimpana syynä on HP:n aiempi kokemus tämän tekniikan kanssa 2D-tulostuksen yhteydessä. (HP 2018) Tämän tekniikan käyttäminen voi kuitenkin rajoittaa käytettävien materiaalien määrää, sillä kuten aiemmin on jo mainittu TIJ-tekniikka rajoittaa käytettävissä olevien sideaineiden määrää ja näin ollen voi vaikeuttaa sopivan sideaineen löytämistä joillekin materiaaleille.

HP on keskittynyt tulostuspäiden suunnittelussa myös luotettavuuteen ja huollettavuuteen. Tulostuspään suuttimet on asetettu niin, että aina yhtä tulostusalueen pistettä kohti on 4 suutinta. Tällä saadaan aikaiseksi 4-kertainen varmennus vikatilanteissa, sillä toimintakyvyttömän suuttimen tilalle voidaan vaihtaa toinen suutin käytön aikana. Tämä lisää laitteen luotettavuutta. Huollettavuutta laitteessa parantaa useiden tulostuspäiden asettaminen suurempaan yksikköön. Tällä tavalla koko yksikköä ei tarvitse vaihtaa, vaan voidaan vaihtaa vain vikaantuneet tulostuspäät. Tällä tavalla laitteen kunnossapitokustannuksia saadaan laskettua. (HP 2018)

4.2.3 Desktop Metal

Desktop Metalin laitteiden tekniset ratkaisut ovat vastaavia muiden valmistajien kanssa, mutta joitakin eroja kuitenkin löytyy. Tekniset ratkaisut eroavat myös Desktop Metalin kahden laiteen välillä niin, että pienemmässä Shop System -laitteessa on käytössä yksinkertaisempia ratkaisuja verrattuna suurempaan Production System laitteeseen. Etenkin jauheenlevitystekniikka eroaa merkittävästi näiden laitteiden välillä.

Desktop Metal ei ilmoita, mitä tulostuspääteknologiaa laitteissa käytetään, mutta muista tulostuspäähän liittyvistä ratkaisuista löytyy kuitenkin tietoa. Desktop Metalin laitteissa on 5-kertainen suutinten varmennus jokaisella suuttimella. Laitteen luotettavuuden kannalta tällä tuskin on suurta etua verrattuna esimerkiksi HP:n 4-kertaiseen varmennukseen, mutta mahdollisesti tämä voi pidentää tulostuspään vaihtoväliä. Pidempi vaihtoväli voi olla tarpeellinen, sillä toisin kuin HP:n laitteessa Desktop Metalin laitteissa koko tulostuspäyksikkö joudutaan vaihtamaan sen vikaantuessa. (Desktop Metal 2020c)

Shop System -laitteessa jauheenlevitykseen käytetään tavallista jauheenlevitys menetelmää, jonka toimintaa on selvitetty jo aiemmin tässä työssä, mutta Production System laitteessa on ExOnen kaltainen ratkaisu (Desktop Metal 2020c). Tämä ratkaisu poikkeaa kuitenkin hieman ExOnen vastaavasta ja sitä on kehitetty astetta pidemmälle. Desktop Metalin ratkaisussa kaikki toiminnot, myös sideaineen suihkutusta, on integroitu yhteen laiteyksikköön. (Desktop Metal 2020 b)

Tässä ratkaisussa laite syöttää ensin jauheen tulostusalueelle, minkä jälkeen yksi rulla tasoittaa ja tiivistää jauheen. Tämän jälkeen laite suihkuttaa sideaineen halutuille alueille ja lopuksi lämpövastus kuivaa sideaineen. Nämä toiminnot ovat laiteyksikössä symmetrisesti molemmin puolin, mikä mahdollistaa molempiin suuntiin liikkeen, jonka aikana kaikki vaaditut toimenpiteet saadaan suoritettua. Tämä pienentää merkittävästi kappaleten valmistusaikaa. (Desktop Metal 2020 b)

4.3 Saatavilla olevat laitteet

Käydään lopuksi vielä läpi uusimpia tällä hetkellä tai lähitulevaisuudessa saatavilla olevia laitteita ExOnelta, HP:lta ja Desktop Metalilta. Näihin laitteisiin lukeutuu 2 laitetta ExOnelta ja Desktop Metalilta sekä yksi HP:n laite. Listaukseen on sisällytetty ainoastaan valmistajien jonkinlaiseen sarjatuotantoon kykeneviä laitteita ja esimerkiksi listauksesta on jätetty pois ExOnen lähinnä tutkimuskäyttöön suunnitellut laitteet. Nämä laitteet on esitetty alla taulukossa 2, johon on listattu laitteiden lisäksi muutamia perusominaisuuksia, kuten tulostusalueen koko, tulostusnopeus sekä tulostusresoluutio.

Taulukko 2. Saatavilla olevia laitteita, perustuu lähteisiin (HP 2018; Desktop Metal 2020 a; Desktop Metal 2020 b; ExOne 2020 b).

Laite	Tulostusalueen koko	Tulostusnopeus	Tulostusresoluutio (Max.)	Muuta
ExOne X1 25PRO	400 x 250 x 250 mm	3600 cm ³ /hr	> 30 µm vokselia	Muiden kuin metallien valmistus mahdollista.
ExOne X1 160PRO	800 x 500 x 400 mm	> 10 000 cm ³ /hr	> 30 µm vokselia	Muiden kuin metallien valmistus mahdollista.
Desktop Metal Shop System	350 x 220 x 50/100/150/200 mm	700 cm ³ /hr	1600 dpi (xy-taso) 40 µm (Kerros paksaus)	
Desktop Metal Production System	490 x 380 x 260 mm	< 12 000 cm ³ /hr	< 50 µm vokselia	
HP Metal Jet	430 x 320 x 200 mm	Ei tiedossa	1200 dpi (xy-taso) 50 µm (Kerros paksaus)	

Taulukosta 2 voidaan nähdä, että saatavilla on erilaisia laitteita eri käyttökohteisiin. Desktop Metalin Shop System soveltuu hyvin pienille tuotantomäärille ja ExOnen X1 25PRO soveltuu tätä hieman suurempaan tuotantoon. ExOnen X1 160PRO ja Desktop Metalin Production System laitteet soveltuvat jo kohtuullisen suurin tuotantomääriin. Koska HP:n Metal Jet:n tulostusnopeudesta ei ole tietoa, voi se sopeutua nopeuden mukaan jompaankumpaan kahdesta viimeisestä kategoriasta. ExOnen X1 160PRO:n soveltuu näistä laitteista parhaiten sarjatuotantoon, sillä sen suuri tulostusalue ja tulostusnopeus mahdollistavat suuren kappalemäärän valmistamisen lyhyessä ajassa.

ExOnen laitteiden perusominaisuuksia vertaamalla voidaan nähdä tulostusalueen koon vaikutus tulostusnopeuteen, sillä kokoa lukuun ottamatta nämä laitteet ovat teknisesti samankaltaisia. Tulostusnopeus kasvaa siis lähes samassa suhteessa kuin tulostusalueen pinta-ala kasvaa. Desktop Metalin Production System laitteen tulostusnopeudesta voidaan nähdä yhdellä liikkeellä tapahtuvan prosessin vaikutus tulostusnopeuteen, sillä sen tulostusnopeus on suurempi kuin ExOne X1 160PRO:lla, vaikka sen tulostusalue on merkittävästi pienempi.

Taulukosta 2 on myös nähtävissä, että ExOnen laitteiden yhtenä vahvuutena verrattaessa muihin laitteisiin voidaan pitää niiden soveltumista myös muille materiaaleille kuin ainoastaan metalleille (ExOne 2020b). Tämä lisää merkittävästi tuotannon mukautumiskykyä, koska esimerkiksi metalli- ja keraamikappaleita voidaan valmistaa samalla laitteella.

5. YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä käsiteltiin, miten sideaineen suihkutusta -menetelmä soveltuu metallikappaleiden valmistukseen ja mitä vahvuuksia ja heikkouksia menetelmällä on. Työn tarkoituksena oli myös selvittää, minkälaisia tekniikoita eri laitevalmistajat käyttävät laiteissaan ja minkälaisia laitteita nämä valmistajat tarjoavat.

Sideaineen suihkutusta -menetelmä on materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä, jossa materiaalijauheesta valmistetaan kappaleita yksi kerros kerrallaan liittämällä jauhepartikkeleita toisiinsa sideaineen avulla. Kiinnostus tätä menetelmää kohtaan on lisääntynyt viime vuosina, mikä johtuu suurelta osin siitä, että menetelmä mahdollistaa metallikappaleiden sarjatuotannon toisin kuin muut materiaalia lisäävät valmistusmenetelmät. Tämän takia uudet valmistajat ovat alkaneet kehittämään omia laitteitaan metallikappaleiden valmistukseen sideaineen suihkutusta -menetelmällä.

Suurimpia tämän menetelmän vahvuuksia ovat hyvä skaalautuvuus, huoneenlämmössä tapahtuva valmistus sekä materiaalin hyvä uusiokäyttökyky verrattaessa vastaaviin menetelmiin. Skaalautuvuus mahdollistaa suurien laitteiden valmistuksen. Huoneenlämpötilassa tapahtuva valmistus puolestaan mahdollistaa jäännösjännityksettömän rakenteen sekä suuren materiaalin uusiokäyttökyvyn.

Sideaineen suihkutusta -menetelmän suurimmat heikkoudet ovat käyttökelpoisten kappaleiden valmistamisen kannalta välttämättömästä sintrauksesta johtuva suuri kutistuminen sekä menetelmällä valmistettujen kappaleiden huokoisuus. Nämä ongelmat pystytään kuitenkin minimoimaan, kun käytetään oikeanlaista materiaalia ja sintrausprosesseja. Myös laitteidenvalmistajien kehittämät jauheenlevitystekniikat ovat vähentäneet näiden ongelmien vaikutusta. Myös jälkikäsitteilyihin kuluva aika voi olla menetelmän heikkous, mutta sen vaikutus pienenee tuotantomäärän kasvaessa.

Merkittävimmät laitevalmistajat tällä hetkellä ovat ExOne, HP ja Desktop Metal. Tällä hetkellä on saatavilla useita eri laitteita eri käyttökohteisiin ja eri valmistajien laitteita on saatavana yksittäiskappaletuotannosta melko suureen sarjatuotantoon riippuen laitteen koosta ja tulostusnopeudesta.

LÄHTEET

Bai, Y. & Williams, C. B. (2015) An exploration of binder jetting of copper. *Rapid Prototyping Journal* [Verkkoaineisto]. Vol. 21 (2), pp.177–185. [Viitattu 20.2.2020] Saatavissa: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-12-2014-0180/full/html>

Bai, Y. et al. (2017) Effect of particle size distribution on powder packing and sintering in binder jetting additive manufacturing of metals. *Journal of manufacturing science and engineering*. Vol. 139(8) [10.3.2020] Saatavissa: <https://asmedigitalcollection.asme.org/manufacturingscience/article/doi/10.1115/1.4036640/376387/Effect-of-Particle-Size-Distribution-on-Powder>

Butscher, A. et al. (2012) Printability of calcium phosphate powders for three-dimensional printing of tissue engineering scaffolds. *Acta Biomaterialia*. [Verkkoaineisto] Vol. 8 (1), pp.373–385. [Viitattu 20.2.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1742706111003801>

Chen, H. & Zhao, Y. F. (2016) Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process. *Rapid Prototyping Journal*. [Verkkoaineisto] Vol. 22 (3), 527–538. [Viitattu 15.3.2020] Saatavissa: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/RPJ-11-2014-0149/full/html>

Desktop Metal (2019) Shop System system specifications [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <https://www.desktopmetal.com/assets/uploads/Shop-System-Spec-Sheet-v1.0.pdf>

Desktop Metal. About us [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.4.2020] Saatavissa: <https://www.desktopmetal.com/company/about/>

Desktop Metal. Production System [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.4.2020] Saatavissa: <https://www.desktopmetal.com/products/production>

Desktop Metal. Shop System [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.4.2020] Saatavissa: <https://www.desktopmetal.com/products/shop>

Do, T. et al. (2017) Process development toward full-density stainless steel parts with binder jetting printing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. [Verkkoaineisto] pp.12150–60. [Viitattu 15.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695516304758>

ExOne (2019) Binder jet 3D printing metal for manufacturing [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.4.2020] Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/ExOne-Binder-Jet-3D-Printing-White-Paper>

ExOne (2019) Binder jet 3D printing metal with excellence: The ExOne triple act [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.4.2020] Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/ExOne-Triple-ACT-Whitepaper>

- ExOne (2020) Q1 2020 Materials update: Metal 3D printer materials [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.3.2020] Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/3d-printing-materials-and-binders/metal-materials-binders>
- ExOne. Metal 3D printers [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.4.2020] Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/3D-printing-systems/metal-3d-printers>
- General Electric. Additive manufacturing machines [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.4.2020] Saatavissa: <https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines>
- Gonzalez, J et al. (2016) Characterization of ceramic components fabricated using binder jetting additive manufacturing technology. *Ceramics International*. [Verkkoaineisto] Vol. 42 (9), pp.10559–10564. [Viitattu 15.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884216302127>
- HP (2018) Technical white paper [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2020]. Saatavissa: <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/metal-jet.html>
- HP. HP Metal Jet [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.4.2020] Saatavissa: <https://www8.hp.com/us/en/printers/3d-printers/products/metal-jet.html>
- Klein, A. (2019) How binder jet 3D printing for metals compares to selective laser melting and electron beam melting, *Future Manufacturing*. [Verkkoaineisto] Vol. 6/2019. pp.6–7. ISSN 2366-777X [Viitattu 3.4.2020] Saatavissa: <https://www.exone.com/en-US/News/How-Binder-Jet-3D-Printing-for-Metals-Compares-to>
- Magdassi, S. (2010) *The chemistry of inkjet inks*. New Jersey: World Scientific. 345 p.
- Mostafaei, A. et al. (2017) Microstructural evolution and mechanical properties of differently heat-treated binder jet printed samples from gas- and water-atomized alloy 625 powders. *Acta Materialia*. [Verkkoaineisto] pp.124280–289. [Viitattu 10.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359645416308825>
- Mostafaei, A. et al. (2019) Microstructural evolution and resulting properties of differently sintered and heat-treated binder-jet 3D-printed Stellite 6. *Materials Science & Engineering C*. [Verkkoaineisto] pp.102276–288. [Viitattu 10.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0928493118336403>
- Rishmawi, I. et al. (2018) Tailoring green and sintered density of pure iron parts using binder jetting additive manufacturing. *Additive Manufacturing*. [Verkkoaineisto] pp.24508–520. [Viitattu 10.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860418304731>
- Salehi, M. 2018, *Inkjet based 3D additive manufacturing of metals*, Materials Research Forum LLC, Millersville, Pennsylvania. 146 p.
- US 5204055. 1989. *Three-Dimensional Printing Techniques*. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA.
- Utela, B. et al. (2008) A review of process development steps for new material systems in three-dimensional printing (3DP). *Journal of Manufacturing Processes*. [Verkkoaineisto] Vol. 10 (2), pp.96–104. [Viitattu 20.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612509000206>

Verlee, B. et al. (2012) Density and porosity control of sintered 316L stainless steel parts produced by additive manufacturing. *Powder Metallurgy*. [Verkkoaineisto] Vol. 55 (4), pp.260–267. [Viitattu 12.3.2020] Saatavissa: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/0032589912Z.00000000082>.

Wiria, F. E. et al. (2014) Manufacturing and characterization of porous titanium components. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. [Verkkoaineisto] Vol. 60 (3-4), pp.94–98. [Viitattu 12.3.2020] Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960897414000230>

Zabka, W. (2018) *Handbook of industrial inkjet printing: A full system approach*. Vol 1. Weinheim, Germany: John Wiley & Sons. 907 p. ISBN 978-3-527-33832-0