

Metallin ruiskuvalu ampuma- asealalla

Suunnitteluopas

Kimi Ahola

OPINNÄYTETYÖ
Joulukuu 2024

Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys ja koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikan tutkinto-ohjelma
Tuotekehitys ja koneautomaatio

AHOLA, KIMI:
Metallin ruiskuvalu ampuma-asealalla
Suunnitteluopas

Opinnäytetyö 61 sivua, joista liitteitä 4 sivua
Joulukuu 2024

Opinnäytetyössä tarkasteltiin metallin ruiskuvalua (MIM) valmistusmenetelmänä, ja sitä miten teknologian käyttö soveltuu ampuma-asealan osien valmistukseen. Työ tehtiin Sako Oy:n toimeksiannosta, ja sen tavoitteena oli perehtyä valmistusmenetelmän eri vaiheisiin ja sille ominaisiin haasteisiin. Työssä selvitettiin, millä tavoin MIM-osien suunnittelua ja yhteistyötä valmistajan kanssa on mahdollista kehittää. Työn tuloksena laadittiin suunnitteluopas, joka esittelee MIM-valmistusmenetelmän perusteet, tunnistaa sen tunnusomaiset haasteet ja lopuksi kokoaa yhteen ohjeet ja suositukset MIM-osien suunnitteluprosessin tueksi.

Toiminnallisessa opinnäytetyössä hyödynnettiin systemaattista tiedonhakua useista eri tietolähteistä, kuten kirjastotietokannoista, tekniikan alan painetuista kirjoista, tutkimusartikkeleista, verkkolehtien artikkeleista ja internetistä. Lisäksi hyödynnettiin opinnäytetyöntekijän ammatin tuomaa kokemusta aihepiiristä.

Opinnäytetyössä kuvattiin MIM-valmistusmenetelmän prosessi ja metallin ruiskuvalun tunnusomaiset piirteet. Suunnitteluoppaaseen koottiin valmistusmenetelmän mahdolliset valmistusvirheet ja niiden aiheuttajat. Opas sisältää myös kattavasti ohjeita, jotka tukevat MIM-osien suunnittelua ja valmistettavuutta.

Työssä selvisi, kuinka monimutkainen ja erityistä osaamista vaativa valmistusprosessi MIM on. Laadukkaiden MIM-osien ja komponenttien suunnittelu ja valmistus edellyttävät valmistusmenetelmän, sen prosessien ja sille ominaisten haasteiden perusteellista ymmärrystä. Onnistuessaan MIM tarjoaa ampumaasealalle potentiaalisen valmistusmenetelmän laadukkaiden, turvallisten ja suorituskykyisten komponenttien sarjatuotannolliseen valmistukseen.

Asiasanat: metallin ruiskuvalu, MIM, suunnitteluopas, ase

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Product Development and Machine Automation

AHOLA, KIMI:
Metal Injection Molding in Firearms Manufacturing
Design Guide

Bachelor's thesis 61 pages, appendices 4 pages
December 2024

The purpose of this thesis was to examine Metal Injection Molding (MIM) as a manufacturing method, and how it can be utilised in manufacturing within the firearms industry. An assignment was issued by Sako Oy to shed light on the steps and challenges associated with the manufacturing process of Metal Injection Molding. The goal of this thesis was to identify ways to improve the design process of MIM products and improve co-operation with MIM manufacturers. The findings discovered during the making of this thesis were compiled into a design guide that covers the basics of MIM manufacturing, acknowledges its challenges and combines tips and recommendations to aid in the design process of MIM parts.

This thesis describes the process of MIM manufacturing, its characteristic features and possible manufacturing defects and their origin. The design guide was compiled to consist of a broad selection of instructions and recommendations to aid in the design process and manufacturability of MIM components. Information from various sources, such as library catalogues, printed books from the technical field, research articles, online journals and internet websites were referenced.

This study brought forward the complexity and specific expertise required by Metal Injection Molding as a process. Design and manufacturing of quality MIM parts and components presented a demand for thorough understanding of MIM as a manufacturing method, understanding its processes and recognizing its characteristic challenges. When successful, Metal Injection Molding offers potential means for mass production of safe, high-quality and high-performance parts and components for the firearms sector.

Key words: metal injection molding, MIM, firearm, design guide

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	METALLIN RUISKUVALU	7
2.1	Yleistä	7
2.2	MIM-tekniikan soveltuvuus aseteollisuudelle	10
2.3	Menetelmä	13
2.3.1	Valmistuksen työkalut ja muotit	14
2.3.2	Raaka-aine	15
2.3.3	Ruiskuvaluprosessi.....	16
2.3.4	Sideaineen poisto (debinding).....	18
2.3.5	Sintraus	19
2.3.6	Jälkikäsittelyt	21
2.4	Materiaalit	22
3	OPAS MIM-OSAN SUUNNITTELUUN	25
3.1	Suunnitteluprosessi.....	25
3.2	3D-Malli ja muotoilu.....	27
3.2.1	Seinämät ja sisennykset.....	28
3.2.2	Päästökulmat.....	30
3.2.3	Pyöristykset ja viisteet	31
3.2.4	Kierteet.....	32
3.2.5	Koristeelliset elementit ja merkinnät	34
3.3	Piirustus ja mitoitus	34
3.4	Laadunvarmistus.....	37
3.5	MIM-tekniikalle ominaiset laatuominaisuudet.....	39
3.5.1	Ruiskuvaluprosessin tunnusomaiset valmistusvirheet.....	41
3.5.2	Sideaineen poiston ja sintrauksen valmistusvirheet	45
3.5.3	Materiaaliperäiset ongelmat	45
3.5.4	Lämpökäsittelyn haasteet.....	46
3.5.5	Jälkikäsittelyihin liittyvät ongelmat	47
3.5.6	Kokoonpanot ja kokoonpano-ohjeet	47
3.5.7	Muut laatuominaisuudet	48
3.6	Muutokset ja revisiot	49
4	POHDINTA	52
	LÄHTEET.....	54
	Liite 1. INDO-MIM:n materiaaleja puolustusteollisuuden tuotteille.	58
	Liite 2. INDO-MIM:n materiaalien fyysiset ominaisuudet.....	59

LYHENTEET JA TERMIT

Anisotropia	Suunnasta riippuvainen fysikaalinen ominaisuus
GPS	Geometrinen tuotemäärittely (Geometric Product Specifications)
Isotropia	Suunnasta riippumaton fysikaalinen ominaisuus
Keerna	Kappaleen sisäpuoliset muodot aikaansaava muotin osa
Kompaundi	Metallijauheesta, sideaineista ja lisäaineista koostuva homogeeninen seos
Metallin ruiskuvalu	Metal Injection Molding (MIM)
Overmolding	Kappaleen pinnoitus eri materiaalilla (overmolding)
Pintapainuma	Kappaleen pinnalla näkyvä painuma (sink mark)
Pistekorrosio	Pistemäinen syöpymä kappaleen pinnalla (pitting)
Plastisointi	Materiaalin saattaminen ruiskuvalettavaan tilaan
Ruiskutusjakso	Toimintojen sarja, joilla valmistetaan ruiskuvalettava osa
Ruskea osa	Hauras ruiskuvalettu MIM-osa, josta on poistettu sideaineet (brown part)
Sintraus	Kiinteän kappaleen muodostaminen lämmön ja/tai paineen avulla (sintering)
Sintrausalusta	Alusta, joka tukee kappaletta sintrauksen aikana. (setter, fixture)
Ulostyöntötappi	Muotin osa, joka työntää ruiskuvaletun kappaleen ulos muotista (ejector pin)
Vihreä osa	Ruiskuvalettu MIM-osa (green part)
Yhtymäsauma	Kohta, jossa kaksi sularintamaa kohtaavat toisensa (weld line)

1 JOHDANTO

Metallin ruiskuvalu (MIM) on valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa monimutkaisia, kestäviä ja suorituskykyisiä metalliosia matalammilla valmistuskustannuksilla kuin perinteisesti koneistamalla. MIM-valmistusmenetelmällä valmistetut osat ovat myös tarkempia, kuin esimerkiksi tarkkuusvalumenetelmällä valmistetut komponentit. Kokemus on kuitenkin osoittanut, että MIM-valmistusmenetelmä on monimutkainen. Laadukkaiden komponenttien suunnittelu ja valmistus edellyttää prosessin perusteellista ymmärtämistä ja osaamista kaikilla osa-alueilla.

Opinnäytetyö tehtiin Sako Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää toimeksiantajayrityksen ymmärrystä metallin ruiskuvalusta valmistusmenetelmänä ja sille tunnusomaisista haasteista. Opinnäytetyössä selvitetään, miten MIM-teknologialla valmistettujen osien suunnittelua on mahdollista kehittää. Opinnäytetyön tarkoituksena on luoda kattava suunnitteluopas, joka selittää lukijalle MIM-valmistusmenetelmän perusteet, esittää lukijalle menetelmän tunnusomaiset piirteet ja kokoaa yhteen vinkit, joiden avulla MIM-osien suunnittelua ja valmistusta voidaan kehittää.

Opinnäytetyön toinen osio esittelee MIM-valmistusteknologian yleisellä tasolla ja käsittelee MIM-valmistusmenetelmän prosessin vaiheet. Suunnitteluopas esittelee valmistusmenetelmälle tunnusomaiset laatuomaisuudet ja niiden aiheuttajat. Suunnitteluopas kokoaa yhteen myös ohjeita ja suosituksia MIM-komponenttien suunnitteluprosessin, tuotesuunnittelun ja vaatimustenmäärittelyn tueksi.

2 METALLIN RUISKUVALU

2.1 Yleistä

Metallin ruiskuvalu on valmistusmenetelmä, jolla voidaan valmistaa täysin valmiita, tai viimeistelyä vaille valmiita kappaleita. Valmistusmenetelmänä MIM on edullisempi vaihtoehto kuin koneistaminen. MIM mahdollistaa myös tarkemmat valmistustoleranssit kuin tarkkuusvalu ja sillä voidaan valmistaa kestävämpiä osia, kuin perinteisesti valamalla on mahdollista. Valmistusprosessi on kuitenkin monimutkainen ja edellyttää ymmärrystä ja osaamista prosessin eri osa-alueilta, jotta laadukkaiden osien ja komponenttien valmistus on mahdollista. (German 2012, 1, Heaney 2012, 254; Alpha Precision Group 2024a.)

MIM on teknologia, joka yhdistää jauhemetallurgian ja ruiskuvalun hyödyt. Ruiskuvaluprosessi mahdollistaa geometrisesti monimutkaisten osien valmistuksen edullisesti suurissa volyymeissä. (German 2012, 1; Alpha Precision Group 2024b.)

Metallin ruiskuvalu on hyvin samankaltainen menetelmä, kuin muovien ruiskuvalu. Molemmissa valmistusmenetelmissä käytetään muotteja ja työkaluja, joiden sisään ruiskutetaan kompaundia eli raaka-ainetta korkealla paineella. MIM-prosessi eroaa muovien ruiskuvalusta siinä, että prosessissa käytetään raaka-ainetta, joka sisältää metallijauhetta ja sideaineita pelkän muovin sijaan. Raaka-aine puristetaan muottiin, joka muodostaa ylikokoisen ”vihreän” osan (green part). Vihreät osat käyvät tämän jälkeen vielä sideaineen poistossa (debinding) ja sintrauksessa (sintering), joiden jälkeen kappale saavuttaa lopullisen muotonsa ja kovuutensa. (Heaney & Greene 2012, 109; McClements & Schadeegg 2024.)

Metallin ruiskuvalulle on olemassa vaihtoehtoisia valmistusmenetelmiä. TAULUKKO 1 esittää metallin ruiskuvalun, perinteisen jauhemetallurgian, valamisen ja koneistamisen parametreja ja niiden eroja. (Heaney 2012, 30.) Taulukosta voidaan tulkita, että MIM-valmistusmenetelmä soveltuu erityisesti kevyiden ja pien-

ten kappaleiden valmistukseen suurella volyyymillä. Valmistettavien osien mittatarkkuuden näkökulmasta MIM on tarkempi menetelmä kuin tarkkuusvalu, mutta ei yllä koneistamalla saavutettavaan tarkkuuteen. MIM-menetelmällä on mahdollista valmistaa myös kappaleita, joissa on ohuita seinämäpaksuuksia. (Heaney 2012, 30, 35.)

TAULUKKO 1. Valmistusmenetelmien ominaisuuksien vertailu (Heaney 2012, 30, muokattu).

Ominaisuus	MIM	Jauhemetallurgia	Valaminen	Koneistaminen
	0.030–			
Komponentin koko (g)	300	0.1–10 000	1+	0.1+
	0.025*-			
Seinämäpaksuus (mm)	15	2+	5+	0.1+
Teoreettinen tiheys (%)	95–100	85–90	94–99	100
Teoreettinen lujuus (%)	95–100	75–85	94–97	100
Pinnanlaatu (µm)	0.3–1	2	3	0.4–2
Tuotantomäärät	2000+	2000+	500+	1+

*Piirteissä saattaa olla epämuodostumia.

Ominaisuus	Minimi	Tyypillinen	Maksimi
Komponentin koko (g)	0.030	10–15	300
Maks. mitta (mm)	2	25	150
Min. seinämäpaksuus (mm)	0.025*	5	15
Toleranssi (%)	0.2	0.5	1
Tiheys (%)	93	98	100
Tuotantomäärät	1000	100 000	100 000 000

*Piirteissä saattaa olla epämuodostumia.

MIM-teknologiaa hyödynnetään monilla teollisuuden aloilla, kuten autoteollisuudessa, lääketeollisuudessa, erilaisten kuluttajatuotteiden valmistuksessa ja puolustusteollisuudessa. Muutamia maininnan arvoisia valmistajia toimialoittain ovat:

- puolustusteollisuus (Glock, Colt, Remington, Primary Weapon systems, Honor Defence, Sig Sauer, Halo Ammunition)
- elektroniikka (Hewlett Packard, Dell, Motorola, Samsung, Apple)
- käsityökalut (Sears, Leatherman, Snap-on Tools)
- autoteollisuus (Mercedes-Benz, Honda, BMW, Toyota, Chrysler).

(German 2012, 4; Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2018, 46, 48; Schloder 2023; Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2024, 102, 106.)

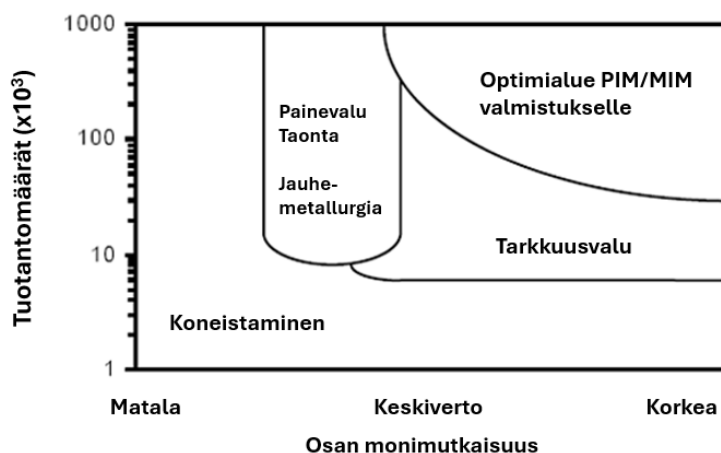
Esimerkkejä MIM-teknologialla valmistetuista osista ja komponenteista ovat

- kellojen komponentit (kehys, ranneke ja salvan osat)
- kameroiden osat, kuten vivut ja painikkeet
- leikkuutyökalut, kuten jyrsintapit ja vaihdettavat teräpalat
- rakettimoottoreiden osat
- rekkojen ja autojen turboahtimen roottorin lavat
- kirurgiset käsityökalut
- hiustenleikkuukoneet, niiden osat ja terät
- yleistyökalut, niiden terät ja vaihtokärjet
- polkupyörien osat, kuten polkimet ja jarrujen komponentit
- käsi-, ja sähkötyökalut ja niiden osat.

(German 2012, 5; INDO-MIM 2024.)

Hyvä nyrkkisääntö on, että jos kappale sopii kämmenelle, silloin osa soveltuu valmistettavaksi MIM-teknologialla. Suositeltava painoraja kappaleelle on n. 100 grammaa. (Heaney 2012, 29.)

Kustannusmielessä MIM ei sovellu mataliin tuotantomääriin. Tuotteen tai kappaleen valmistettavuutta MIM-teknologialla on arvioitava myös taloudellisesta näkökulmasta. Valmistettavan kappaleen lopullinen hinta ja sen valmistamiseen tehdyt työkaluinvestoinnit tulee ottaa huomioon. Benson ja Chikwanda (n.d.) kertovat MIM:n taloudellisen hyödyn näkyvän selkeimmin silloin, kun valmistetaan suuria määriä pieniä ja monimutkaisia osia (KUVIO 1).



KUVIO 1. Valmistusmääriin soveltuvat valmistusmenetelmät (Froes 2006, Benson & Chikwanda, n.d., 2, muokattu).

Koneistus on hyvä vaihtoehto, jos valmistettavat osat ovat yksinkertaisia. Koneistamalla ei kuitenkaan pystytä tuottamaan monimutkaisia osia suurissa kappalemäärissä. Jauhemetallurgia ja taonta mahdollistavat hieman monimutkaisempien osien sarjatuotannollisen valmistuksen, mutta sen valmistuskyvyt eivät yllä tarkkuusvalun tai MIM:n tasolle osien monimutkaisuudessa. Tarkkuusvalu on yksi vaihtoehto MIM:lle, kun tehdään monimutkaisia osia suurissa tuotantomäärissä. Tarkkuusvalun valmistuskapasiteetti ei kuitenkaan kykene tuottamaan kappaleita samaa tahtia, kuin MIM:llä on mahdollista.

2.2 MIM-teknologian soveltuvuus aseellisuudelle

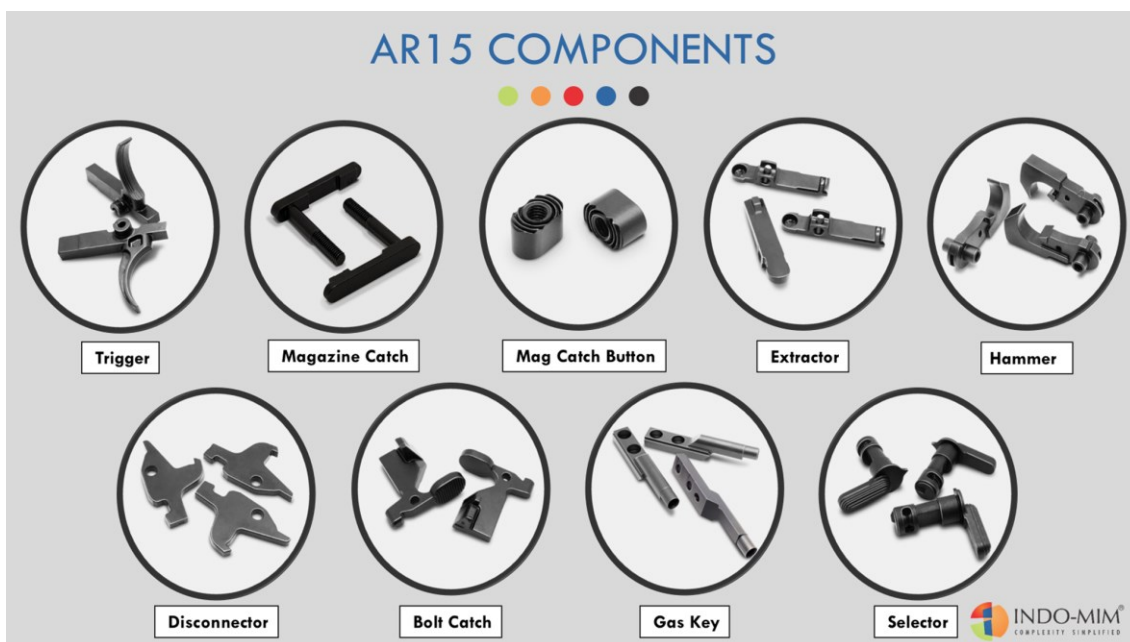
Ampuma-aseet sisältävät monia pieniä, kevyitä ja monimutkaisia osia, joihin kohdistuu suuria kuormia ja voimia aseiden elinkaaren aikana. Yhdet osat vastaavat ampuma-aseen turvallisuudesta, ja toiset osat takaavat aseiden toimintavarmuuden. Aseet ja niiden osat ovat jatkuvasti altistuneena monille eri kemikaaleille, kuten huollon yhteydessä liuottimille ja öljyille. Vaativa toimintaympäristö edellyttää aseiden osilta erinomaista korroosion ja kemikaalien kestoja. MIM tarjoaa myös mahdollisuuden valmistaa osia, joiden pinnat ovat kiiltäviä ja pinnankarheus on matala (Hwang 2012, 250). Kaikki edellä mainitut ominaisuudet ja vaatimukset ovat ominaisia piirteitä iskuvasaralle, joka on kriittinen osa aseiden laukaisukoneistoa (KUVA 1). Voidaan tiivistää, että ampuma-aseiden osat ovat koon, geometrian, vaatimusten ja valmistusmäärien puolesta ideaali tuote valmistettavaksi MIM-teknologialla.



KUVA 1. Iskuvasara edustaa tyypillisen MIM-osan kokoluokkaa, muotoa, sille asetettuja vaatimuksia ja siltä odotettua suorituskykyä (Kuva: Kimi Ahola 2024).

Tänä päivänä monia ampuma-aseen osia valmistetaan MIM-teknologialla. Toimijat alalla ovat kehittäneet jo useita eri osia eri asemalleihin, kuten AR15 ja 1911 sarjan käsiaseisiin (KUVIO 2 ja KUVIO 3) (Metal Injection Molding Revolutionizing the Defence Industry 2024). Huomionarvoista kuvioissa on valmistettujen komponenttien yhteiset piirteet; kaikki osat ovat pieniä ja monimutkaisia. Muita MIM-teknologialla valmistettuja komponentteja ovat

- laukaisulaitteen osat
- ulkoiset hallintalaitteet
- monimutkaiset ja pienet ulko-osat
- itselataavan aseiden kaasujärjestelmän osat
- lisävarusteet
- rautatähtäimet ja optiikan osat
- luodit.



KUVIO 2. AR15 standardiosia (INDO-MIM n.d.).



KUVIO 3. 1911 käsiaseen standardiosia (INDO-MIM n.d.).

MIM-valmistusmenetelmän kyvyt eivät rajoitu vain pieniin teräsosiin. MIM-tekniikan rajoja on koeponnistettu myös isommilla komponenteilla ja jopa poikkeavilla materiaaleilla, kuten titaanilla ja kuparilla.

Vuonna 2024 Primary Weapon Systems valmistutti TriTech Titanium Parts LLC:llä titaanisen ”kehymksen” (trunnion), joka mahdollistaa nopean ampumaseen piipun ja kaliiperin vaihdon (KUVA 2). Osa voitti MPIF Design Excellence Awards 2024 pääpalkinnon kategoriassa armeija ja ampumaseet. (Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2024, 102.)



KUVA 2. (Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2024, 102, muokattu).

Armeija ja ampuma-aseet-kategoriassa myönnettiin myös tunnustuspalkinto kuparista valmistetulle luodille (KUVA 3). MIM-tekniikalla valmistettua luotia ei tarvitse koneistaa jälkeempään. Kaikki hukkamateriaali, joka syntyy MIM-prosessissa, on kierrätettävissä. (Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2024, 105, 106.) Perinteinen tapa valmistaa luoteja, on sorvata luoti tankomateriaalista. Menetelmä on tarkka, mutta prosessissa syntyy merkittävä määrä hukkamateriaalia. MIM tarjoaa potentiaalisen vaihtoehdon kulutustuotteen, kuten luodin valmistusmenetelmäksi.



KUVA 3. (Metal Powder Industries Federation (MPIF) 2024, 106, muokattu)

2.3 Menetelmä

Metallin ruiskuvalu on monivaiheinen ja monimutkainen valmistusmenetelmä, joka voidaan yksinkertaistaa neljään päävaiheeseen. Valmistus alkaa sekoittamalla haluttu raaka-aine (feedstock). Raaka-aine ruiskutetaan ylikokoiseen muottiin, muodostaen valmistettavasta kappaleesta hieman isomman version. Muodostettu kappale jatkaa sideaineen poistoon ja sen jälkeen sintraukseen (KUVIO 4) (Metal Injection Molding (MIM) Process 2024.)



KUVIO 4. MIM-komponentin vaiheet (Coyle 2024, 79, muokattu).

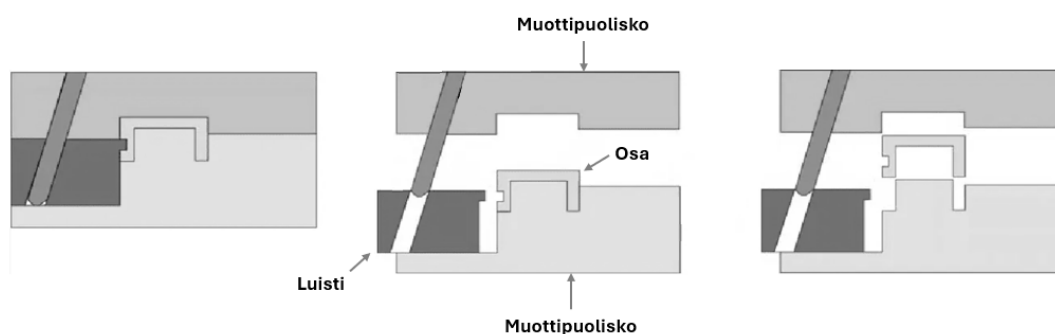
Päävaiheita seuraa kappaleen viimeistely (Metal Injection Molding (MIM) Process 2024). Viimeistely käsittää mahdolliset jälkikoneistukset, lämpökäsittelyt ja pintakäsittelyt, jotka ovat yleisiä työvaiheita myös perinteisille valmistusmenetelmille.

2.3.1 Valmistuksen työkalut ja muotit

Luvussa 2.1 Metallin ruiskuvalumenetelmä esiteltiin samankaltaisena valmistusmenetelmä kuin muovin ruiskuvalu. Yhtäläisyydet jatkuvat muottien ja työkalujen puolelle. Schlieper (2012) suosittelee tietolähteeksi muovin ruiskuvalutekniikan kirjallisuutta, joka soveltuu myös MIM-osien työkalusuunnitteluun.

Yksinkertaisimmillaan muotti koostuu kahdesta puoliskosta, joiden väliin jäävä tilavuus muodostaa valmistettavan kappaleen geometrian. Ruiskuvalutekniikalle ominaisesti muotit tehdään usein yhtä määrättyä tuotetta varten. Muottien tuotekohtaisen luonteen vuoksi muotin valmistuskustannukset ovat korkeat verrattuna sarjatyönä tehtyisiin koneisiin. (Järvelä, Syrjälä & Vastela 2000, 113.) Tuotantoa voidaan tehostaa käyttämällä monipesäisiä (multi-cavity) muotteja, jolla mahdollistetaan useamman kappaleen valmistus yhdellä ruiskutusjaksolla. Perhemuoteille (family mold) voidaan valmistaa useampia eri kappaleita yhdellä ruiskutusjaksolla. (Ramsay 2019.)

Valmistettavat osat voivat olla kolmiulotteisesti monimutkaisia, jolloin valmistus perinteisellä kaksiosaisella muotilla ei ole mahdollista. Joskus valmistettavat kappaleet ovat kolmiulotteisesti monimutkaisia ja muottiin tarvitaan osia, jotka liikkuvat eri suuntaan, kuin muotin aukeamissuunta. Luistikeernamuotin avulla voidaan valmistaa osia, joissa on piirteitä muuhunkin suuntaan, kuin vain muotin avautumissuuntaan (KUVIO 5). (Järvelä ym. 2000, 117.)



KUVIO 5. Sisennyksen teko luistikeernamuotin avulla (Tip-Top Molds 2022, muokattu).

Monimutkaisempien piirteiden, kuten sisä-, ja ulkokierteiden valmistaminen valettavaan kappaleeseen on mahdollista toteuttaa paineilmalla, hydraulisesti tai sähköisesti ajetuilla pyörivillä keernoilla. Haluttu muoto valmistetaan osaan jo muotissa ennen muotin avausta ja kappaleen ulostyöntöä. (Järvelä ym. 2000, 118; Heaney 2012, 44.)

2.3.2 Raaka-aine

MIM-valmistusmenetelmän raaka-aine koostuu kahdesta pääainesosasta, sideaineesta ja metallijauheesta (Enneti, Onbattuvelli & Atre 2012, 64; Banerjee & Joens 2012, 134). Raaka-aineen tarkka koostumus on käytännössä huomattavasti monimutkaisempi ja se sisältää lukuisia eri seosaineita. Alalla toimivat valmistajat kehittävät jatkuvasti myös omia materiaaleja, jolloin raaka-aineen yksityiskohdat ja vaikutus lopputuotteeseen on valmistajan suorassa hallinnassa.

Yksinkertaistettuna, hienojakoinen metallijauhe sekoitetaan sideaineiden kanssa, joiden yhdistelmä muodostaa raaka-aineen (MIM – METALLIRUISKUVALU n.d.).

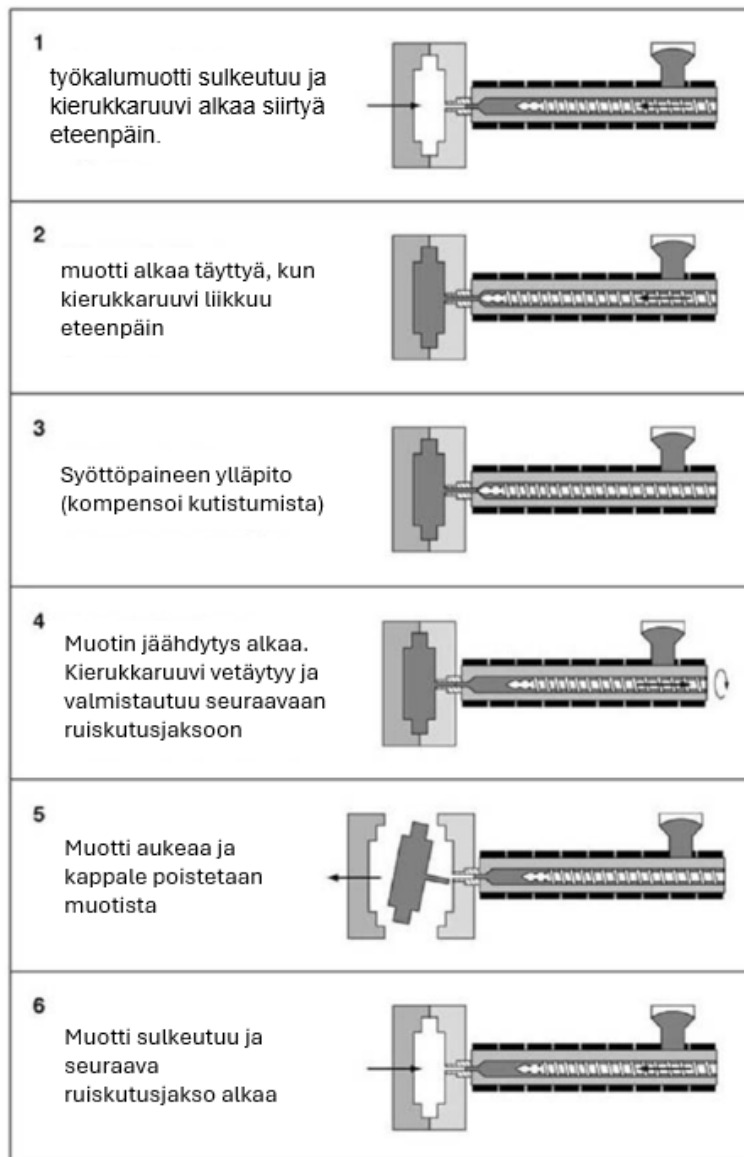
Sideaineilla on erittäin tärkeä rooli MIM-komponenttien valmistuksessa. Sideaine on seos, joka koostuu useista eri polymeereistä. Sideaineen päätarkoitus on helpottaa kappaleen valmistusta ruiskutusvaiheessa kuljettamalla metallijauhe kaikille työkalumuotissa. Sideaine antaa myös valmistettavalle kappaleelle rakenteellista lujuutta ennen sintrausvaihetta. (Enneti ym. 2012, 64; Banerjee & Joens

2012, 156.) Banerjee ja Joens (2012) kategorioivat sideaineet kahteen komponenttiin. Ensimmäinen komponentti on poistettavissa matalassa lämpötilassa, ja sen tehtävä on avata huokosverkosto toisen komponentin poistoa varten myöhemmässä vaiheessa. Toisen komponentin tehtävä on pitää metallipartikkelit paikallaan, kunnes prosessin lämpötila on riittävän korkea metallipartikkeleiden välisten diffuusiosidosten muodostumiseen. (Banerjee & Joens 2012, 134.)

2.3.3 Ruiskuvaluprosessi

MM valmistusmenetelmän ruiskuvaluprosessi on sama, kuin perinteisen muovin ruiskuvaluprosessi. Pelletoitu raaka-aine syötetään ruiskuvalukoneeseen, jossa se plastisoidaan, eli sulatetaan ruiskuvalettavaan tilaan. Raaka-aine ruiskutetaan muottiin korkealla paineella. (Metal Injection Molding (MIM) Process 2024.) Muotista poistettu ruiskuvalettua osaa kutsutaan tässä vaiheessa vihreäksi osaksi.

Ruiskuvaluprosessin toiminta voidaan jakaa kuuteen päävaiheeseen. Heaney ja Greene (2012) ovat kuvanneet vaiheet KUVIO 6:ssä. Prosessi alkaa siitä, kun työkalumuotti sulkeutuu ja kierukkaruuvi alkaa siirtyä eteenpäin. Vaiheessa 2. muotti alkaa täyttyä, kun kierukkaruuvi liikkuu eteenpäin. Muottiin ruiskutettu materiaali alkaa kutistua jäähtyessään. Tätä kutistumaa kompensoidaan pitämällä syöttöpainetta yllä kolmannen vaiheen ajan. Neljännessä vaiheessa muotti alkaa jäähtyä ja kierukkaruuvi vetäytyy taaksepäin, valmistautuen seuraavaan ruiskuvalujaksoon. Viidennessä vaiheessa muotti avautuu, ja kappale työnnetään irti muotista. Näiden vaiheiden jälkeen muotti sulkeutuu ja kone aloittaa seuraavan ruiskutusjakson. (Heaney & Greene 2012, 119.)



KUVIO 6. MIM-ruiskutusprosessin vaiheet (Heaney & Greene 2012, 119, muokattu).

Surin (2012) mukaan valmistettavaan kappaleeseen on mahdollista lisätä myös muovinen pinnoite (overmolding). Ensin muottiin ruiskutetaan pääraaka-aine, jonka jälkeen muotti avataan ja tilalle vaihdetaan tai pyörytetään toinen tilavampi muottipuolisko. Tämä antaa mahdollisuuden ruiskuttaa muottiin halutun pinnan muodostava lisämateriaali. (Suri 2012, 339.)

2.3.4 Sideaineen poisto (debinding)

Luvussa 2.3.2 Raaka-aine, käsiteltiin raaka-aineen koostumusta ja sivuttiin sideaineiden merkitystä ja tehtävää sideaineen poistossa. Sideaineen poisto jakautuu yleisesti kahteen tai tietyissä tapauksissa kolmeen vaiheeseen. Sideaineen vaiheittainen poisto mahdollistaa kappaleen muodon säilymisen, kun prosessi etenee. Sideaineen poiston ensimmäinen vaihe luo kappaleeseen huokosverkoston, joka mahdollistaa sideaineen toisen komponentin poiston. Sideaineen poiston jälkeen kappaletta kutsutaan ruskeaksi osaksi (brown part). (Järvelä ym. 2000, 183; Banerjee & Joens 2012, 134, 137, 176; Hwang 2012, 243.)

Nykyaikaisissa valmistusprosesseissa 1. sideaineen poisto tehdään joko liuottimilla, vedellä tai orgaanisilla aineilla, tai jopa katalyyttisesti. Tavoite on poistaa kaikki ensimmäisen vaiheen sideaine kappaleesta, edeten kappaleen ulkopinnalta sisälle päin. Tällä tavoin kappaleeseen 1. sideaineen poisto vaikuttaa mahdollisimman vähän jäljelle jäävään 2. sideaineeseen. (Banerjee & Joens 2012, 136.)

Jäljelle jäävää 2. sideainetta kutsutaan valmistettavan kappaleen selkärangaksi (backbone). Näiden sideaineiden tehtävä on pitää kappale muodossaan seuraavaan vaiheeseen asti. Valmistettavat kappaleet asetetaan keraamisten telineiden (setter) päälle ja siirretään ilmasto-ohjattuun sintrausuuniin. Uunin lämpötilaa nostetaan hitaasti pitolämpötilaan ja pidetään siellä, kunnes kaikki sideaine on poistunut kappaleesta. (Banerjee & Joens 2012, 144; Metal Injection Molding (MIM) Process 2024.)

KUVIO 7 esittää MIM-osan koostumuksen prosessin eri vaiheissa. Vihreässä tilassa lähes kiinteä kappale koostuu sideaineista ja metallipartikkeleista. 1. sideaineen poiston jälkeen huokoista ruskeaa osaa pitää kasassa. KUVIO 7:ssä näkyvät punaiset viivat, jotka edustavat 2. sideainetta. Sintrauksen yhteydessä viimeisetkin sideaineet poistuvat ja metallipartikkelien väliset tilat kuroutuvat umpeen, muodostaen kiinteän kappaleen. (Coyle 2024, 79.)

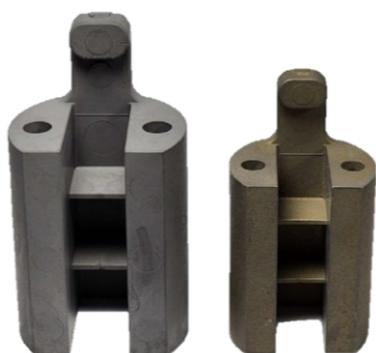


KUVIO 7. MIM-osan koostumus prosessin eri vaiheissa (Coyle 2024, 79, muokattu).

Kaikki sideaine tulee poistaa ennen kuin kappale siirtyy valmistusprosessin seuraavaan vaiheeseen, sintraukseen. Epäonnistunut sidemateriaalin poisto voi aiheuttaa sintrauksessa kappaleeseen murtumia ja karstaa, jotka voivat heikentää lopullisen kappaleen rakenteellista lujuutta. (Banerjee & Joens 2012, 134; Hwang 2012, 243.)

2.3.5 Sintraus

Sintraus on prosessin vaihe, jossa valmistettavat kappaleet lämmitetään korkeaan lämpötilaan kontrolloidussa atmosfäärissä. Esimerkiksi työkaluterästen ja ruostumattomien terästen sintrauslämpötilat ovat 1100–1290 °C ja 1180–1380 °C. Saavutettuaan sintrauslämpötilan, metallijauheen partikkelien väliset tilat alkavat kuroutua umpeen ja partikkelit sulautuvat yhteen. Kutistuma on sintrausvaiheessa n. 15–20 %. (Banerjee & Joens 2012, 147, 160; Heaney 2012, 35; Metal Injection Molding (MIM) Process 2024; Vierimaa 2011, 109) Vihreän ja sintratun kappaleen välistä kokoeroa havainnoi KUVA 4.



KUVA 4. MIM-tekniikalla volframista valmistettu ase-lukon punnus. Vihreän ja sintratun osan välinen kokoero (PTI Tech Inc. n.d., Bose 2024, 101, muokattu).

Kutistuman luonteesta on kuitenkin saatavilla vaihtelevaa tietoa. Metal Injection Molding (MIM) Process (2024) kuvailee kutistumaa isotrooppiseksi. Heaney ja Greene (2012) ja Bulger (2018) puolestaan kuvailevat kutistumaa anisotrooppiseksi. Isotropia viittaa tässä tapauksessa suunnasta riippumattomaan kutistumaan, joka olisi hyvin ennustettavissa. Anisotrooppinen kutistuma on isotrooppisen vastakohta, joka tarkoittaa, että kappale kutistuu eri määrän eri suunnissa.

Vihreät osat voidaan asettaa sintrausalustalle (setter, fixture) jo ennen 2. sideaineen poistoa, jos 2. sideaineen poisto ja sintraus suoritetaan samassa uunissa (Banerjee & Joens 2012, 136). Sintrausalustan tärkeys korostuu kuitenkin vasta sintrausvaiheessa, kun valmistettavat osat kuumennetaan sintrauslämpötilaan.

Sintrausalustan tehtävä on tukea ja pitää kappaleita paikallaan sintrausvaiheessa (KUVIO 8). Korkeiden lämpötilojen vuoksi alustat tehdään joko keraamista tai molybdeenistä. Rautapitoiset materiaalit kuitenkin reagoivat molybdeenin kanssa, joten teräsosien kanssa keraamiset sintrausalustat ovat ainoa vaihtoehto. (Banerjee & Joens 2012, 167, Coyle 2024, 82.)

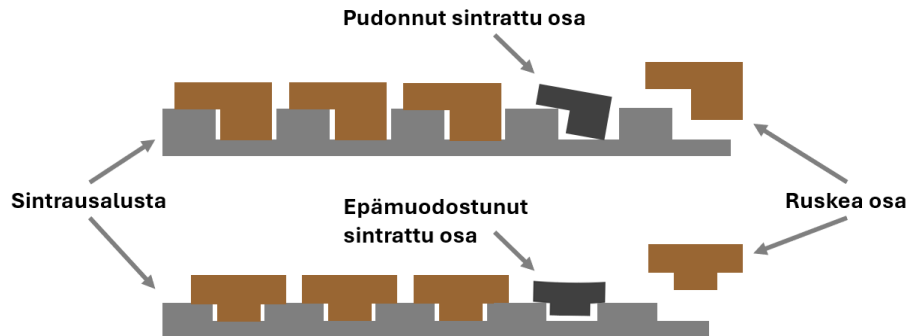


KUVIO 8. Sintrausalusta ja osien asettelu (Coyle 2024, 82, muokattu).

Coyle (2024) suosittelee kuvittelemaan sintrauksessa olevat osat kuin kypsennetyn pastan. Kappaleet tulevat valumaan, putoamaan ja niiden muodot tulevat vääristymään. (Coyle 2024, 82.)

Sintrausalustojen tehtävä on tukea kappaleita ennen sintrausta, sen aikana ja sen jälkeen. Ylikokoiset sintratut kappaleet kutistuvat sintrausprosessin yhteydessä, joka pitää ottaa huomioon suunnitellessa valmistettavalle tuotteelle sintrausalustaa. (Heaney 2012, 40.) Sintrausalustan suunnittelussa pitää huomi-

oida kappaleen olomuoto ja käyttäytyminen kaikissa sintrauksen vaiheissa. Puutteellinen tuenta voi näkyä valmiissa kappaleessa muotovirheinä ja laatuerokeamina (KUVIO 9).



KUVIO 9. Mahdollisia laatuerokeamia sintrauksen yhteydessä. Osa voi pudota tai epämuodostua sintrauksen aikana.

Yksinkertaisten osien, kuten lieriöiden tuenta voidaan toteuttaa V-urallisella sintrausalustalla. Monimutkaisempien osien kanssa yksinkertainen tuenta ei riitä, ja voidaan joutua tukeutumaan huomattavasti kehittyneempiin sintrausalustoihin, jotka mukailevat valmistettavan kappaleen muotoa. (Banerjee & Joens 2012, 169.)

2.3.6 Jälkikäsitteilyt

Jälkityöstö ja "täsmäys" eivät ole MIM-valmistusmenetelmälle yksilöllinen prosessin vaihe. Monilla menetelmillä valmistettuja osia ja aihioita jalostetaan ja viimeistellään jälkityöstöllä. Pursotetut profiilit, valuaihiot ja taotut ahiot ovat kaikki puolivalmiita tuotteita, joiden tarkat piirteet viimeistellään koneistamalla. (Vierimaa 2011, 116; Vuorinen 2011, 67.)

MIM-tekniikalla pystytään valmistamaan suhteellisen mittatarkkoja osia. Tiettyissä tapauksissa valmistettavan osan toiminta vaatii tiukempia toleransseja ja mittoja, kuin MIM-prosessilla on mahdollista valmistaa. Nämä piirteet viimeistellään jälkityöstössä koneistamalla, hiomalla tai muulla menetelmällä. (Coyle 2024, 83.)

Valmistettavat osat viimeistellään usein tuotteen suunnittelun kannalta valikoidulla pinnoitus-, tai pintakäsittelymenetelmällä. Tavoitteena pinnoitteelle voi

olla ulkonäön parantaminen, korroosion ja mekaanisen keston parantaminen tai pinnan liukuominaisuuksien parantaminen.

MIM-teknologialla valmistetut teräsosat ovat pinnoitettavissa ja lämpökäsiteltävissä samalla tavalla, kuin mikä tahansa muukin teräs. Pintakäsittelyt eivät myöskään ole MIM-teknologialle yksilöllinen prosessin vaihe. MIM-osille voidaan tehdä samat pintakäsittelyt, kuin koneistetulle teräsosalle. INDO-MIM (2024) markkinoi, että pinnoitukset ja pintakäsittelyt ovat helposti tehtävissä MIM-osille. (Metal Injection Molding (MIM) Process 2024.)

2.4 Materiaalit

Metallin ruiskuvalumenetelmällä on mahdollista valmistaa osia lukuisiin eri käyttökohteisiin useista eri materiaaleista. Tohtori David Whittakerin (2017) mukaan periaatteessa mitä tahansa materiaalia voisi olla saatavilla jauhemuodossa. Valmistettavan osan käyttötarkoitus, vaatimukset ja käyttöympäristö ovat muutamia tekijöitä, jotka vaikuttavat kappaleen materiaalin valintaan. TAULUKKO 2:ssa on listattuna materiaalien yleisimmät käyttökohteet ja erityisominaisuudet. INDO-MIM:n materiaalisuosituksien puolustusteollisuuden tuotteille on koottu liitteeseen 1. (Banerjee & Joens 2012, 161; Heaney 2012, 32; Metal Injection Molding MIM Materials 2024; Metal Injection Molding Revolutionizing the Defence Industry 2024.)

MIM-tuotteiden valmistajat tarjoavat laajan kirjon yleisiä materiaalivaihtoehtoja. Niukkaseosteiset teräkset, työkaluteräkset, ruostumattomat teräkset, volframi-pohjaiset kovametallit, titaani ja korkean lämpötilan kestävät metalliseokset ovat vain kategorioita, joiden alta löytyy useita materiaalivaihtoehtoja valittavaksi. Jotkin valmistajat ovat kehittäneet myös omia materiaaleja, joille luvataan entistä parempaa suorituskykyä verrattuna kilpailijoihin. Omavalmisteiset materiaalit parantavat myös valmistusprosessin hallintaa ja laatua. (Banerjee & Joens 2012, 160, 161; Heaney 2012, 32; Metal Injection Molding MIM Materials 2024.)

TAULUKKO 2. MIM-materiaalien erityisominaisuudet ja käyttökohteet (Heaney 2012, 32, muokattu).

MIM-materiaalien erityisominaisuudet ja käyttökohteet			
Terästyyppi	Käyttökohteet	Metalli-seokset	Erityisominaisuudet
Ruostumaton teräs	Lääketeollisuus, elektroniikka,	17-4PH	Lujuus, lämpökäsiteltävissä
	rautatavara, urheiluvälineet, ilmailuteollisuus,	316 L	Korroosionkestävyys Muokkautuvuus, ei-magneettinen
	kuluttajatuotteet	420, 440C 310	Kovuus, kulutuksen kesto, lämpökäsiteltävissä Korroosion ja lämmönkestävyys
Niukka-seosteinen teräs	Rautatavara, laakerit,	1000-sarja	Pintakarkaistavissa
	kuluttajatuotteet, koneiden osat	4000-sarja 52100	Yleiskäytettävyys Korkea kulutuksen kesto
Työkaluteräs	Puun ja metallien leikkuutyökalut	M2/M4	61–66 HRC
		T15	63–68 HRC
		M42	65–70 HRC
		S7	55–60 HRC
Titaani	Lääketeollisuus, ilmailuteollisuus, kuluttajatuotteet	Ti	Keveys
		Ti-6Al-4V	Keveys, korkea lujuus
Kupari	Elektroniikka, lämmönhallinta	Cu	Korkea lämmön-, ja sähkönjohtokyky
Magneettinen	Elektroniikka, solenoidit, ankkurit, releet	Fe-3 %Si	Korkea resistiivisyys ja matalat ydinhäviöt
		Fe-50 %Ni	Korkea permeabiliteetti ja matala koersitiivinen kentänvoimakkuus
		Fe-50 %Co	Korkein magneettinen saturaatio
Volframi	Puolustusteollisuus, elektroniikka, urheiluvälineet	W	Tiheys
		W raskas seos	Tiheys ja iskutkeys
Kovametalli	Leikkuu-, ja kulutuksen kestävät osat	WC-5Co	Korkeampi kovuus
		WC-10Co	Korkeampi iskutkeys
Keramiikka	Kulutuksen kestävät osat, suuttimet, holkit	Alumiini-oksidi	Yleiskäytettävyys
		Zirkonium-oksidi	Korkea kulutuksen kesto

Materiaalien fyysiset ominaisuudet antavat kattavamman kuvan materiaalien ominaisuuksista (TAULUKKO 3). Myötölujuus, murtolujuus ja kovuus ovat keskeisessä roolissa tehdessä materiaalivalintaa valmistettavalle komponentille.

INDO-MIM on myös listannut materiaalitarjontansa fyysiset ominaisuudet perusteellisesti liitteeseen 2. (Heaney 2012, 33; MIM Material Properties 2014.)

TAULUKKO 3. MIM-materiaalien fyysisiä ominaisuuksia (Heaney 2012, 33, muokattu).

MIM-materiaalien fyysisiä ominaisuuksia							
Materiaali	Tiheys (g/cm ³)	Myötö- lujuus (MPa)	Murtolujuus (MPa)	Venymä (%)	Charpy iskulujuus (J)	Makro- kovuus	Kimmokerroin (GPa)
316 L SS 17-4 PH	7.8	180	520	40	190	67 HRB	185
SS 17-4 PH	7.6	740	900	6	140	27 HRC	190
SS H900	7.6	1100	1200	4	140	33 HRC	190
420 SS	7.5	1200	1370	-	40	44 HRC	190
440C SS	7.6	1600	1250	1	-	55 HRC	190
310 SS	7.5						185
Fe	7.6	-	-	20	-	-	190
2200	7.6	125	280	35	135	45 HRB	190
2700	7.6	250	400	12	175	69 HRB	190
4605	7.55	210	440	15	70	62 HRB	200
4605 HT	7.55	1480	1650	1	55	48 HRC	210
4140 HT	7.5	1200	1600	5	75	46 HRC	200

3 OPAS MIM-OSAN SUUNNITTELUUN

3.1 Suunnitteluprosessi

Uuden osan valmistaminen uudella valmistusmenetelmällä voi vaikuttaa arvelutavalta. Yritysten näkökulmasta on ymmärrettävää, miksi näin on tapana ajatella. Menestyvät yritykset voivat nähdä muutokset ylimääräisinä riskeinä, joita ei kannata ottaa kevyin perustein (Bulger 2018, 61). MIM on vielä suhteellisen tuntematon valmistusmenetelmä Suomen teollisuudessa, joten on ymmärrettävää, että MIM-tekniikan vastaanotto voi olla samanlaista kuin Bulger kuvailee.

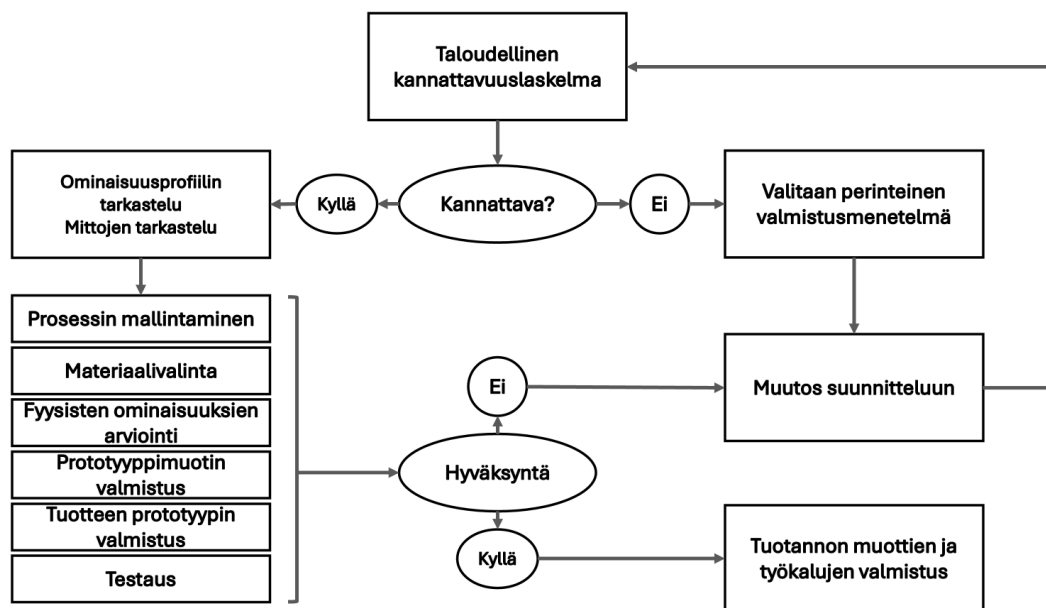
Luvussa 2.1 esiteltiin, kuinka menestyksekkäästi MIM-valmistusmenetelmällä on mahdollista valmistaa monimutkaisia ja suorituskykyisiä osia. Luvussa varoitettiin hieman prosessin monimutkaisuudesta, jota tämä kappale käsittelee tarkemmin.

Taso, jolla MIM-valmistusprosessin tulee suoriutua, riippuu suoraan valmistettava osasta, sen käyttötarkoituksesta ja vaatimuksista. Ilmailualan osat ja lääketieteelliset tuotteet ovat vaatimustasoltaan korkeampia. Vähemmän kriittiset kuluttajatuotteet puolestaan vaativat prosessilta vähemmän. Optimitilanteessa MIM-prosessilla pystytään valmistamaan vaatimukset täyttäviä osia matalimmilla mahdollisilla kustannuksilla. (Heaney 2012, 254.)

Ampuma-aseiden osat ja komponentit sopivat tämän skaalan välimaastoon. Osien ja komponenttien tulee olla suorituskykyisiä, niiden tulee täyttää niille asetetut vaatimukset ja ennen kaikkea niiden tulee olla turvallisia. Suunnittelun näkökulmasta on tärkeää, että valmistettava osa suunnitellaan huolellisesti ja sille asetetaan selkeät ja tarpeenmukaiset tavoitteet.

Jonkin osan kysyntä voi kasvaa, ja koneistetusta osasta siirrytään massatuotannollisempaan menetelmään. Tällöin tarpeen tunnistaminen on tehtävä. Onko järkevää lähteä valmistamaan MIM-tekniikalla? Taloudellinen kannattavuuslaskelma olisi paikallaan tukemaan tätä päätöstä. Osa voidaan myös suunnitella heti alusta massatuotettavaksi MIM-tekniikalla.

Heaney (2012) mukaan osan valmistettavuutta MIM-valmistusteknologialla voidaan arvioida kahdella kysymyksellä: Onko osan valmistus teknisesti toteutettavissa, ja onko osan valmistus taloudellisesti järkevää? (Heaney 2012, 255.) Usein kappaleen fyysinen koko riittää kertomaan, onko suunniteltu osa valmistettavissa MIM-teknologialla. Perinteisin MIM-valmistusmenetelmin taloudellisen kannattavuuden raja menee 300 grammassa, johtuen teknisten syiden lisäksi metallijauheen hinnasta. Tilanne voi olla, että valmistettava osa on kokonaan uusi tai voidaan olla tilanteessa, jossa halutaan siirtyä MIM-valmistukseen esimerkiksi matalampien valmistuskustannusten vuoksi. KUVIO 10 esittää vuokaaviomuodossa, miten uuden tuotteen kanssa on suositeltavaa menetellä. MIM-teknologialla valmistettavalle osalle on tehtävä kustannusanalyysi ja vertailu mahdollisesti olemassa olevan valmistusmenetelmän kanssa. Mikäli taloudellinen tarkastelu on MIM-valmistusteknologian puolella, voidaan edetä suunnitteluprosessissa valmistettavan osan mittojen ja ominaisuusprofiilin tarkasteluun. (Heaney 2012, 255–256.)



KUVIO 10. MIM-valmistusprosessin valinta konseptitasolta valmistusmenetelmäksi (Heaney 2012, 256, muokattu).

Valmistettavan kappaleen ominaisuusprofiilin ja kriittisten mittojen perusteella valituilla materiaaleilla ruiskupuristetaan koekappaleet, joiden avulla voidaan arvioida ominaisuusprofiilin täyttymistä, esimerkiksi vetolujuuden ja korroosion näkökulmasta. Materiaalin valinnassa Heaney (2018) toteaa, että hyvän MIM-toimijan

tai MIM-tuotesuunnittelijan pitäisi pystyä valitsemaan käyttökohteeseen soveltuva materiaali tuotteen käyttötietojen perusteella. Hyväksyttävien tulosten pohjalta voidaan valmistaa prototyypimuotti, jolla valmistetaan ensimmäiset komponentit. Valmistetuilla prototyypiosilla suoritetaan käytännön testejä, joilla arvioidaan MIM-tekniikan soveltuvuutta osan valmistukseen. Jos prototyypiosa ei täytä sille asetettuja vaatimuksia tässä vaiheessa, on osan tuotekehitys aloitettava uudestaan tekemällä tuotteeseen tarvittavat muutokset ja kannattavuuslaskelmat. (Heaney 2012, 256–257.)

Tarve nopeuttaa tuotteiden saattamista markkinoille voi vaikuttaa MIM-osan tuotekehitysprosessiin. On mahdollista, että prototyypimuottia ei valmisteta lainkaan, vaan muotit valmistetaan suoraan sarjatuotannolliseen käyttöön. Motivaationa oikopolulle voi olla tuotteen saattaminen nopeammin markkinoille. Oikopolkuihin liittyy tietysti riskejä, kuten korkeammat alkuinvestoinnit ja riskit, jos muotteja tarvitseekin muokata tulevaisuudessa. (Heaney 2012, 257.)

Pohtiessani MIM-osan tuotekehityksen filosofiaa, ymmärrän että molemmille etenemistavoille on teollisuudessa varmasti paikkansa. Heaney (2018) kertoo kirjoituksissaan myös prototyypimuotin kustannusten olevan alle neljänneksen sarjatuotannollisen muotin valmistuskustannuksista. Huomioiden prototyypimuotin edulliset kustannukset, matalamman riskin ja MIM-osien suuret valmistusmäärät, koen prototyypimuottien olevan olennainen osa MIM-osien tuotekehitystä, jota ei tule jättää välistä.

3.2 3D-Malli ja muotoilu

Ruiskuvaluteknologian ja jauhemetallurgian etu on monimutkaisten osien ja komponenttien valmistaminen, eikä sillä ole samoja rajoitteita kuin perinteisillä valmistusmenetelmillä. MIM-osat voidaan suunnitella maksimaalisen materiaalin hyötykäytön perusteella. Tavoitteena on luoda mahdollisimman kevyt ja pieni osa, joka täyttää sille asetetut vaatimukset ja tehtävät.

Myös Rolls Royce on lähestynyt MIM-valmistusta sen matalampien kustannusten, materiaalivaihtoehtojen ja monimutkaisten osien valmistuskyvyn vuoksi (KUVIO 11). Perinteisesti osa valmistettiin takoihiosta, joka viimeisteltiin koneistamalla. MIM mahdollisti osan valmistamisen yhdessä vaiheessa, jolloin perinteisen valmistusmenetelmän monivaiheiselta prosessilta vältyttiin. (Whittaker 2017, 48)

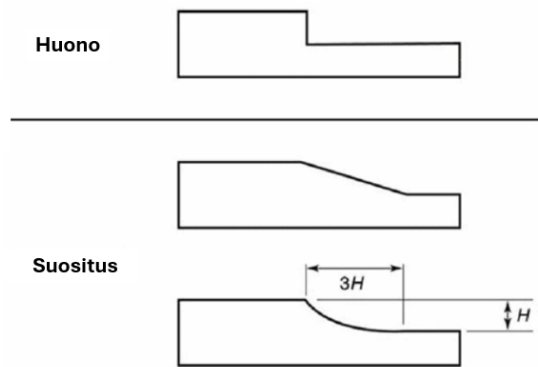


KUVIO 11. MIM-valmistusmenetelmälle uudelleensuunniteltu osa (Whittaker 2017, 48)

Heaney (2012) muistuttaa välttämään osia, joiden massa on yli 100 g. Tietyissä tapauksissa 300 g painoisten osien valmistaminen on vielä mahdollista. Kappaleeseen olisi hyvä luoda myös tasopinta, joka tukee kappaletta sintrauksen ajan. (Heaney 2012, 30–31.)

3.2.1 Seinämät ja sisennykset

Seinäma- ja materiaalivahvuudet tulee olla tasapaksut, ja siirtymä materiaalivahvuudesta toiseen on hyvä tehdä pyöristyksen tai viisteen avulla (KUVIO 12). Äkilliset muutokset materiaalivahvuudessa voivat aiheuttaa valmiiseen kappaleeseen imujälkiä ja taipumia. MIM-valmistusmenetelmään pätevät samat säännöt, kuin perinteiseen muovin ruiskuvaluun. (Heaney 2012, 41.)



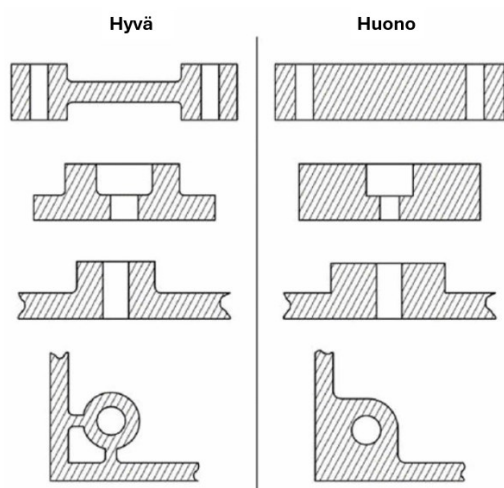
KUVIO 12. Siirtymä materiaalivahvuudesta toiseen (Heaney 2012, 42).

Seinämien osalta tärkeimmät säännöt voidaan listata seuraavasti:

1. välttä osia, jotka ovat paksumpia kuin 12.5 mm
2. välttä materiaalivahvuuksia alle 0.1 mm
3. optimaalinen materiaalivahvuus MIM-osalle on 10 mm
4. välttä suoria ja pitkiä seinämiä ilman päästöjä
5. poista ylimääräinen materiaali paksuilta alueilta ja välttä massakeskittymiä
6. suosi tasaista materiaalivahvuutta seinämissä ja rakenteissa (KUVIO 13)
 - a. kappaleen poikkileikkauksen suositeltava suhdeluku on 1:1. Ideaali kappale on yhtä leveä ja korkea
 - b. materiaalivahvuuden muutos suositellaan olevan alle 60 %
 - c. sulavan siirtymän lisääminen materiaalivahvuuden muutoskohtaan parantaa kappaleen valmistettavuutta ja vähentää sintrauksessa syntyviä taipumia ja muotovirheitä
 - d. halutun materiaalivahvuuden muutos suositellaan tapahtuvan kolme kertaa halutun materiaalivahvuuden muutoksen matkalla. Esimerkiksi 1 mm materiaalivahvuuden muutos tapahtuu 3 mm matkalla.

(Heaney 2012, 30–31, 41.)

Bulgerin antamat suositukset poikkeavat hieman Heaneyn suosituksista. Bulger (2018) toteaa, että 0.3 mm paksuiset osiot on vielä mahdollista valmistaa MIM-menetelmällä.

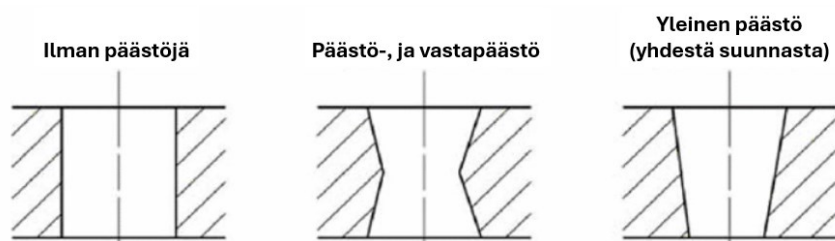


KUVIO 13. Seinämien suunnittelun hyvät ja huonot käytänteet (Heaney 2012, 42, muokattu).

Ulkoiset urat ja sisennykset ovat piirteitä, joita on mahdollista valmistaa MIM-tekniologialla ilman merkittäviä lisäkustannuksia (KUVIO 5). Edellytyksenä on, että piirteet ovat joko samansuuntaisesti muotin aukeamisen kanssa tai 90 asteen kulmassa muotin jakopintaan nähden. Sisäpuolisten urien ja sisennysten valmistaminen on mahdollista kokoon painuvalla tai sulavalla keernalla, tai liittämällä osia yhteen ruiskutusvaiheen jälkeen. (Heaney 2012, 48; German 2015, 852.)

3.2.2 Päästökulmat

Päästöt ovat pakollisia kaikentyyppisissä ruiskuvalutekniikoissa, joissa käytetään muotteja (KUVIO 14). Päästökulmat mahdollistavat valetun kappaleen irrottamisen muotista. Päästökulman tulisi olla isoin mahdollinen, jonka kappaleen suunnittelu sallii. Viitearvoina päästökulmien tulee olla $0.5\text{--}0.2^\circ$. Pidempien elementtien ja teksturoitujen pintojen yhteydessä on suositeltavaa käyttää viitearvoja suurempaa päästökulmaa. (Heaney 2012, 41.)



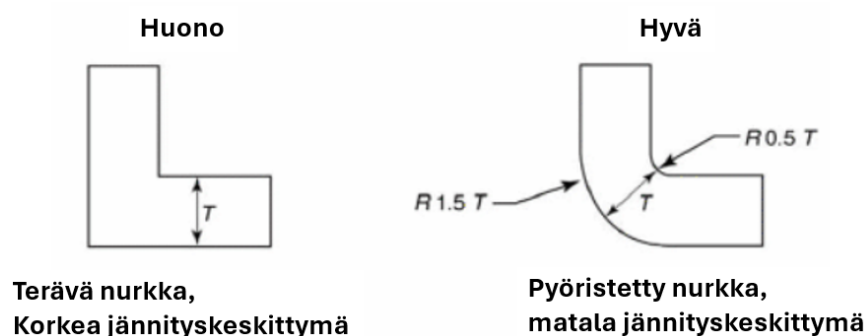
KUVIO 14. Reikä ilman päästökulmaa ja kaksi eri vaihtoehtoa päästökulman toteuttamiseksi (Heaney 2012, 43, muokattu).

Muottiin puristettu kappale kutistuu muotin viilennyksen yhteydessä. Kutistumasta johtuen kappaleen ulkoiset piirteet vaativat minimaalisen päästökulman. (Heaney 2012, 42.)

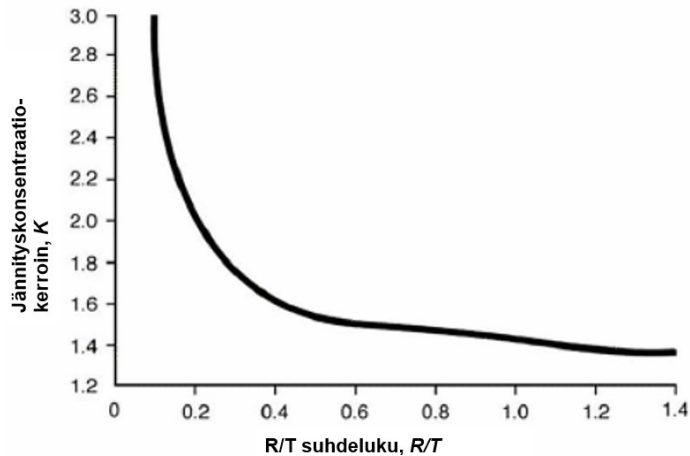
3.2.3 Pyöristykset ja viisteet

Pyöristykset ovat olennainen piirre MIM-osan suunnittelussa. Terävät sisänurkat heikentävät MIM-osan lujuutta, aiheuttavat jännityksiä ja voivat johtaa säröjen muodistumiseen kappaleessa. Pyöristykset vähentävät jännityskeskittymiä kappaleessa, parantavat materiaalin virtausta muotissa ja yksinkertaistavat muottien ja työkalujen rakennetta. MIM-osat ovat luonteeltaan hauraita ja niiden loviherkyys on huono. Tästä johtuen pyöristykset ovat merkittävässä roolissa kappaleen kestävyuden kannalta. (Heaney 2012, 47; Bulger 2018, 68.)

Suosittelava säde kappaleen ulkonurkissa on >0.05 mm (Heaney 2012, 31). Suositeltava säde kappaleen sisänurkissa on >0.13 mm. Bulger (2018) suosittelee sisäkulmiin vähintään 0.1 mm pyöristystä. KUVIO 15:ssä esitetään säteen ja materiaalivahvuuden välinen suhdeluku (R/T), jonka tulisi olla 0.5 tai alle. KUVIO 16 esittää pyöristyksen suhteen materiaalivahvuuteen, ja kuinka se vaikuttaa nurkaan syntyviin jännityksiin. (Heaney 2012, 47.)



KUVIO 15. Terävä ja pyöristetty nurkka. Ohjearvoja pyöristyksille. (Heaney 2012, 47, muokattu).



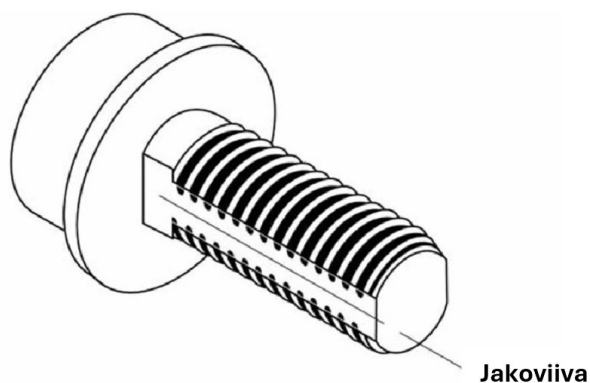
KUVIO 16. Pyöristyksen suhde materiaalivahvuuteen vaikuttaa nurkkaan kohdistuvien jännitysten suuruuteen (Heaney 2012, 47, muokattu).

Erytistapauksissa ohjearvoa pienempiä säteitä voidaan käyttää. Terävät nurkat kuitenkin kasvattavat muottien ja työkalujen valmistuskustannuksia ja haittaavat muotin tasaista täyttymistä ruiskutusvaiheessa. Jos terävä nurkka on osan suunnittelun kannalta kriittinen, voidaan terävä nurkka valmistaa esimerkiksi laminoitujen moniosaisten työkalujen avulla. (Heaney 2012, 47.)

Asealan komponenteissa terävillä reunoilla on yleensä tarkoitus ja toiminnallinen peruste. Tietyissä tapauksissa terävät nurkat voidaan valmistaa kappaleeseen myös jälkikoneistuksen yhteydessä, jos terävän nurkan sijainti ja muoto ovat kappaleen toiminnan kannalta kriittisiä piirteitä.

3.2.4 Kierteet

MIM-teknologialla on mahdollista valmistaa sisä- ja ulkokierteitä. Ulkokierteet valmistetaan kustannussyistä usein suoraan muotissa, jolloin kierteytettyyn osaan jää muottitekniikalle tunnusomaiset tasopinnat (KUVIO 17). Tasopinnat suunnitellaan muottiin, jotta muotin jakoviiva ja siitä aiheutuvat purseet eivät muodostuisi kierteen harjalle. Tasopinta parantaa kierteytetyn osan valmistettavuutta, mutta vähentää samalla kierteen kontaktipinta-alaa, heikentäen kierteen lujuutta. (Heaney 2012, 44.)

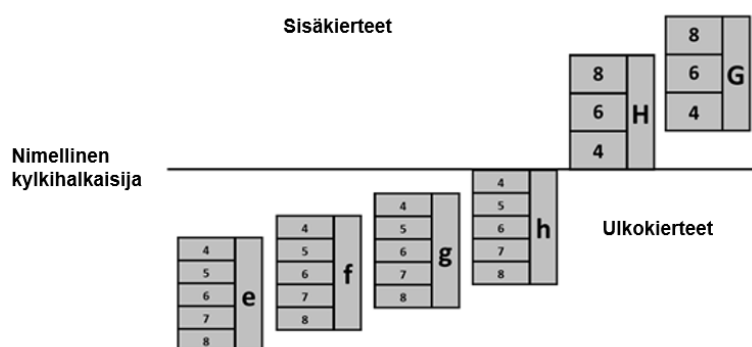


KUVIO 17. Jakosauman sijainti kierteellisessä kappaleessa (Heaney 2012, 45, muokattu).

Kierteet koneistetaan usein jälkikoneistuksen yhteydessä. Massatuotteissa sisäkierre voidaan muodostaa myös paineilma-, tai servo-ohjatulla keernalla suoraan muotissa. Suoraan muotissa valmistettavat kierteet ovat alttiita kutistumalle, joka aiheuttaa yhteensopivuusongelmia. Kierteellisen osuuden suositellaan olevan mahdollisimman lyhyt yhteensopivuusongelmien välttämiseksi. (Heaney 2012, 44.)

Ulkoisten kierteiden vaatimusluokaksi suositellaan e, f ja g toleranssiasemia. Sisäkierteiden valmistuksessa suositellaan käytettäväksi toleranssiasemaa G. Yleisesti sisäkierteiden kohdalla käytettäväksi suositellaan ylempiä toleranssiasemia, ja ulkokierteiden kohdalla alempia toleranssiasemia. (Heaney 2012, 44.)

KUVIO 18 esittää toleranssiasemien sijoittumisen suhteessa kierteen nimelliskylkihalkaisijaan.



KUVIO 18. Kierteiden toleranssiasemat (Toll 2019, muokattu).

3.2.5 Koristeelliset elementit ja merkinnät

Muotteihin perustuva valmistusmenetelmä mahdollistaa koristeellisten ja toiminnallisten piirteiden sijoittamisen valmistettavan kappaleen pinnalle. Näitä piirteitä ovat esimerkiksi pintatekstuurit, pyällykset ja karhennukset, kirjaimet ja tekstit, logot ja muut mahdolliset tunnistet. (Heaney 2012, 48–49.)

Yksinkertaisin tapa valmistaa koristeelliset elementit kappaleeseen, on koneistaa muottiin tai työkaluun haluttu piirre. Muotista poistettu materiaali jättää lopulliseen kappaleeseen koholla olevan piirteen. Kappaleeseen on mahdollista valmistaa myös upotettu piirre tai kaiverrus, jättämällä muottiin tai työkaluun materiaalia halutun piirteen kohdalle. Tässä tapauksessa muotti tai työkalu on valmistettava ki-pinätyöstöllä tai vastaavalla menetelmällä. (Heaney 2012, 48–49.)

Muottiteknologialla valmistetuissa osissa on aina valmistusteknologialle tunnusomaiset jäljet, joita käsitellään tarkemmin osiossa 3.5.1 Ruiskuvaluprosessin tunnusomaiset valmistusvirheet. Nämä piirteet voidaan tietyin rajoittein pyrkiä sijoittamaan kappaleessa paikkaan, jossa se ei herätä huomiota, haittaa osan toimintaa, tai josta se voidaan koneistaa pois jälkityöstön yhteydessä. Samaa toimintamallia voidaan toteuttaa myös, jos halutaan yhdistää valmis kappale tiettyyn nimikkeeseen, versioon tai revisioon. Halutessaan tunniste voidaan jättää näkyville tai se voidaan poistaa jälkityöstön yhteydessä.

3.3 Piirustus ja mitoitus

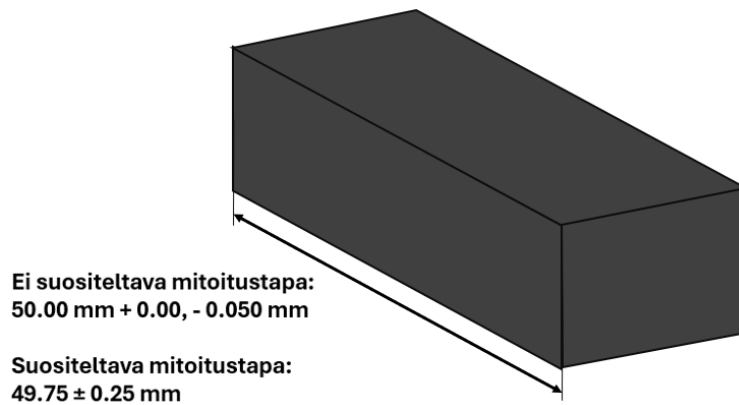
Tekniset piirustukset ovat suunnittelijoiden kieli kommunikoida toisillensa. Kuten normaalissa puheessa, ymmärretyksi tuleminen edellyttää sujuvaa viestintää. Jatkuvasti kehittyvä tekninen ala on lisännyt kansainvälistä toimintaa, jonka vuoksi sujuvan kommunikaation tärkeys on korostunut entisestään. Teknisten piirustusten tulee olla yksiselitteisesti tulkittavissa geologisesta sijainnista riippumatta.

Piirustuksen mitoitustavalla on suuri vaikutus kappaleen valmistettavuuteen ja lopputulokseen. Mitä selkeämpi ja kattavampi piirustus on, sitä pienempi mahdollisuus on virheelliseen tulkintaan. Valmistettavan kappaleen tai laitteen mitoituksen tulee ottaa huomioon sen toiminta, valmistus, tarkastus ja niiden asettamat vaatimukset. Lähtökohtaisesti tuotteen piirustuksessa olevat mitat ovat valmiin osan lopullisia mittoja, ellei toisin mainita. (Pere 2021, 7–1.)

Toiminnallisissa mitoissa kaksipistemitoitusta tulisi välttää. Jos mitoitettava piirre ei ole tärkeä, voidaan mitoitus tehdä kaksipistemitoituksella. Suunnittelussa tulisi varmistua erityisesti siitä, että \pm toleranssin mittaustulos ei ole tulkinnan varassa. ISO GPS standardi SFS-EN ISO 14405-2 suosittelee geometristen toleranssien käyttöä toiminnallisten mittojen yhteydessä. (Valtanen 2022, 173.)

Bulger (2018) kehottaa myös välttämään liiallisen tarkkojen yleistoleranssien käyttöä. INDO-MIM sanoo myös suunnitteluohjeissaan, että kaikki määrittämättömät ei-kriittiset mitat voivat noudattaa 2768-M yleistoleransseja. (Bulger 2018, 62; MIM Design Guidelines – Reference Document n.d.)

Malliteknisestä näkökulmasta katsottuna Bulger (2018) suosittelee käyttämään mitoissa symmetristä (\pm) toleranssialuetta MIM-osien luonteen vuoksi (KUVIO 19). Sintrauksessa MIM-osat tulevat kutistumaan, ja niiden kutistuma tulee aina vaihtelevaan kappaleiden välisen tiheyden vaihtelun vuoksi. Lopputuloksena on MIM-osia, joista jotkin ovat isompia ja toiset pienempiä. Tuotesuunnittelija voi haluta määrittää osan piirteelle epäsymmetriset toleranssit, kun halutaan että sallittu poikkeama on vain toiseen suuntaan nimellimitasta. Tämä voi osoittautua ongelmalliseksi, jos MIM-toimija valmistaa valumuotit osan 3D mallin perusteella, eikä katso piirustusta tarkkaan. Tästä syystä on erityisen tärkeää, että valmistettavan kappaleen 3D malli vastaa nimellimittoja. (Bulger 2018, 63). Bulger (2018) korostaa, että muotin valmistaja tulee aina tukeutumaan 3D malliin. Edellä mainitut ovat tärkeitä syitä, muotin valmistajan kanssa on sovittava, kumpi on nk. ”master”, 3D malli vai piirustus. Epäselvissä tilanteissa ”master” kertoo muottivalmistajalle, kumpaa ohjeistusta tulee seurata.

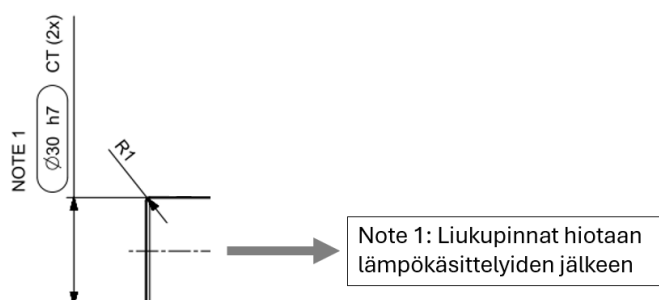


KUVIO 19. Kaksi tapaa mitoittaa kappale. MIM-valmistusmenetelmälle suositeltava symmetrinen toleranssialue alla. (Bulger 2018, 62, muokattu)

Luvussa 2.3.5 sivuttiin MIM-kappaleen kutistumisen käyttäytymistä. Useampi lähde kuvailee MIM-prosessin kutistumaa anisotrooppiseksi kattavin perusteluin. Suunnitellessa MIM-kappaleita on hyväksyttävä, että MIM-osa tulee olemaan hie- man epämuodostunut, kuten Coyle (2024) mainitsi kappaleessa 2.5.2.

Myös Bulger (2018) on kirjoittanut kappaleiden anisotrooppisesta kutistumasta ja sen vaikutuksesta MIM-komponenttien epämuodostumiin. Lieriömäinen kappale tai reikä tulee todennäköisesti olemaan ovaali sintrauksen jälkeen. Lähtökohtai- sesti tarkat reiät ja lieriömuodot on valmistettava MIM-osiin koneistamalla. (Bul- ger 2018, 63–64.) Heaney (2012) muistuttaa myös kirjoituksissaan, että alle 0.1 mm reikiä tulisi välttää.

Jälkikäteen tehtävät koneistukset ja työvaiheet on selkeyden vuoksi suositeltavaa merkitä valmistettavan kappaleen piirustuksiin yksiselitteisellä tavalla. Mitoitetta- vaan piirteeseen voidaan liittää esimerkiksi huomioteksti, joka selitetään piirus- tuksen yleisohjeissa (KUVIO 20).



KUVIO 20. Esimerkki täsmättävästä piirteestä. Lieriöpinta täsmätään lämpökäsit- telyiden (HT) jälkeen hiomalla.

MIM on valmistusmenetelmä, jolla on erittäin toistettava 0.2–0.5 % mittatarkkuus. Vaihtelu on peräisin ruiskutusvaiheesta ja sintrauksesta tulevista kutistumista, jotka ovat n. 1 % ja 15–25 %. Bulgerin (2018) mukaan nämä luvut ovat 0.3–0.5 % ja 15–20 %. Saavutettuun mittatarkkuuteen vaikutta myös sintrausvaiheessa käytetyt keraamiset tuet, joissa voi olla vaihtelua. (Heaney 2012, 30, 35.)

Bulger (2018) muistuttaa, että muottiteknologialla valmistetuissa kappaleissa tulee aina olemaan näkyvillä valmistusteknologialle ominaiset piirteet, kuten portin jäljet, ulostyöntötappien jäljet ja jakoviivat. Osan suunnittelijan on kommunikoi-tava MIM-osan valmistajalle osan kriittiset piirteet, jotta edellä mainitut piirteet ei-vät päädy haittaamaan lopputuotteen toimintaa. (Bulger 2018, 66.) Heaney (2012) muistuttaa myös, että päästökulman vaikutus kappaleen mittoihin on otet-tava huomioon mitoitettavan piirteen toleransseissa.

3.4 Laadunvarmistus

Järvelä ym. (2000) kertovat, että korkealla laadulla on monia positiivisia vaikutuk-sia yrityksen toimintaan. Yrityksen tuotteet täyttävät niille asetetut vaatimukset, hävikki- ja reklaamatiokustannukset laskevat ja työ on yleisellä asteella kannat-tavampaa. Laatu näkyy myös yrityksen työntekijöiden korkeana osaamistasona ja mahdollistaa ammattitaitoisten työntekijöiden saamisen. (Järvelä ym. 2000, 190.)

Yrityksillä voi myös olla omat käytänteet ja mittaraporttipohjat, joilla seurataan valmistettavien kappaleiden tärkeitä toiminnallisia mittoja. Tarkastettavat mitat tai kohdat piirustuksissa voidaan merkitä esimerkiksi symbolein tai huomioita käyt-täen.

Aloitettaessa uuden tuotteen valmistusta tai kun kappaleen valmistuskustannuk-set nousevat korkeaksi, on suotavaa tarkastaa valmistettujen kappaleiden mitto-jen oikeellisuus kattavalla otannalla. Kun tuotteen valmistus etenee ja siirrytään massatuotantovaiheeseen, voidaan mitattavien kohteiden määrää vähentää n. 10 kappaleeseen. Tässä vaiheessa voidaan tarkastaa esimerkiksi kappaleelle

kriittisiksi määritetyt mitat. Tällä tavoin voidaan ”ajaa valmistusprosessi sisään” ja valmistusteknisiin haasteisiin ehditään puuttua jo prosessin alkuvaiheessa. Kolmannessa vaiheessa mitattavia kohteita rajataan entisestään kappaleen kriittisimpiin mittoihin. (Pere 2021, 7–102.)

MIM ja kehittyneet suunnitteluohjelmat ovat ajaneet tuotesuunnittelua suuntaan, jossa kolmiulotteisesti monimutkaisten osien suosio on kasvanut. Bulger (2018) nostaa esiin hyviä ajatuksia, joita kannattaa miettiä suunnitellessa MIM-osia:

- Mitä tarkistusmetodia käytetään piirteen tarkastamiseen?
- Onko tarkastusmetodin mittatarkkuus riittävä piirteen tarkistukseen?
- Onko molemmilla osapuolilla samat resurssit piirteen tarkastamiseen?
- Onko tarkastettavan kappaleen peruselementit määritetty tarkasti?
- Kuinka kauan mittauksen suorittamiseen kuluu aikaa?
- Millä otannalla kappaleet tullaan tarkastamaan?

(Bulger, 2018, 65.)

Oikean mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat mm. mitattava kohde, sen toleranssit ja käytettävissä oleva aika. Suositeltavaa on, että valitun mittausmenetelmän mittausepävarmuus on alle kolmasosa mitattavan piirteen toleranssialueesta. Tuotteen toiminnan ja turvallisuuden kannalta kriittiset mitat voivat vaikuttaa myös mittavälineen valintaan. (Lehto 2011, 434, 435.)

MIM-valmistuksen sarjatuotannollisen luonteen vuoksi piirteiden tarkastamiseen voidaan käyttää myös erilaisia toiminnallisia tulkkeja tarkastusajan lyhentämiseksi (KUVA 5). Tulkkien käyttö kuitenkin edellyttää, että tarkastettavan piirteen mitoituksessa käytetään menorajan periaatetta. Tämän jälkeen tulkeilla voidaan tarkastaa geometrisia ja toiminnallisia piirteitä, kuten sisähalkaisijoita, ulkohalkaisijoita, kierteitä ja varmistua että suunniteltujen osien välinen sovite ja toiminta toteutuu. (Lehto 2011, 442–443; Valtanen 2022, 722.)



KUVA 5. Go / No-go tulkki, jolla on mahdollista tarkastaa useampi piirre kappaleesta yhdellä kiinnityksellä (Kuva: Kimi Ahola 2024).

GPS standardeista, kuten eurooppalaisesta ISO GPS:stä ja amerikkalaisesta ANSI/ASME Y14.5:stä, niiden yksityiskohdista ja eroista on kirjoitettu kattavasti mm. Esko Valtasen Tekniikan Taulukkokirjassa ja Aimo Peren teoksessa Koneenpiirustus 1 & 2. (Pere 2021, 20-1–20-179; Valtanen 2022, 704-756.)

MIM-osan suunnittelija voi määrittää osalle myös muita tarkastusmetodeja. Esimerkkinä HRC kovuusmittaus, joka on oleellinen osa lämpökäsitellyn osan fyysisten ominaisuuksien varmistusta. Mahdolliset säröt ja huokoisuuden voi havaita ultraäänellä tai visuaalisin menetelmin. Vaativampien ja kriittisten osien kohdalla kappaleita voidaan tarkastella perusteellisemmin röntgenin avulla. (Heaney 2012, 263.)

3.5 MIM-teknologialle ominaiset laatupoikkeamat

Kaikilla valmistusmenetelmillä on niille ominaiset haasteet, viat ja tunnusomaiset piirteet. Myös metallin ruiskuvalun harjoittajat ovat törmänneet useisiin kompastuskiviin. MIM on monivaiheinen valmistusprosessi, jonka kussakin vaiheessa voi ilmetä uusia haasteita ja erilaisia laatupoikkeamia. Muotin suunnittelu ja valmistus, ruiskutusjakson parametrit, sideaineen poiston ja sintrauksen parametrit voivat kukin aiheuttaa erilaisia laatupoikkeamia lopputuotteeseen. (Zhang 1989, Hwang 1996, Hwang 2012, 235.)

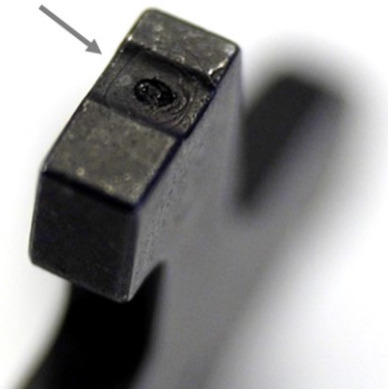
Hwangin (2012) sanoin vaihteleva tuotelaatu, heikko mittatarkkuus, epämuodostuneet kappaleet ja sisäiset sekä ulkoiset valmistusvirheet ovat laatupoikkeamia, joita MIM-alan toimijat ovat onnistuneet aliarvioimaan.

Ongelmat mittatarkkuuden hallinnassa ja osien muotojen vääristymät ovat muutama esimerkki vaihtelevasta laadusta. Yksi metallin ruiskuvalun heikkouksista on sen prosessin vaiheiden riippuvuus toisistaan. Aiempien vaiheiden mahdolliset viat ja laatuvirheet voivat ilmentyä heti ruiskutusjakson jälkeen tai vasta prosessin seuraavien vaiheiden yhteydessä. (Heaney & Greene 2012, 129; Hwang 2012, 235.)

3.5.1 Ruiskuvaluprosessin tunnusomaiset valmistusvirheet

Portti

Muotissa on aina materiaalin syöttökohta, josta materiaali ruiskutetaan sisään. Syöttökohtaa kutsutaan myös portiksi. Portti sijaitsee kappaleen paksuimmassa kohdassa, jotta materiaali virtaa mahdollisimman tasaisesti muottipesään. Portista jää valmiiseen kappaleeseen aina jälki, jos tätä ei poisteta jälkityöstön yhteydessä (KUVA 6). (Järvelä ym. 2000, 133; Heaney 2012, 38.)



KUVA 6. Portin jälki MIM-kappaleessa jakoviivan kohdalla (Kuva: Kimi Ahola 2024).

Jakoviivat

MIM-valmistusmuotit koostuvat vähintään kahdesta osasta. Muottipuoliskot eivät koskaan osu toisiaan vasten täydellisesti. Tämä epäjatkuvuuskohta muodostaa valmistettavaan kappaleeseen jakosaumaksi tai jakoviivaksi kutsutun pintavirheen (KUVA 7). Jakoviiva alkaa yleisesti samasta kohdasta, jossa valmistetun kappaleen päästökulmat kohtaavat (KUVIO 21). Jakoviivan koko vaihtelee yleisesti 0.008 ja 0.025 millimetrin välillä. (Järvelä ym. 2000, 113; Heaney 2012, 35, 36.)



KUVA 7. Jakoviiva MIM-kappaleessa (Kuva: Kimi Ahola 2024).

Muottien jakosaumat sijaitsevat kustannussyistä yleensä yhdellä tasolla. Optimaalisessa tilanteessa valmistettavan kappaleen kaikki tärkeät piirteet muodostuvat toisella muotin puoliskolla, jolloin jakoviiva muodostuu kohtaan, jolla ei ole vaikutusta kappaleen toimintaan. Jakosaumat voidaan asemoida kuitenkin myös portaittain, jolloin voidaan välttää jakoviivan muodostuminen kriittiselle pinnalle kappaleessa. Jakoviivan muodostumiseen vaikuttaa vahvasti työkalujen laatu, viimeistely ja kunto. Kuluneet muotit jättävät kappaleeseen selkeämmän jakoviivan. (Heaney 2012, 35, 36, 37.)



KUVIO 21. Kappaleeseen muodostunut jakoviiva.

Jäysteet

Joissakin tapauksissa muottipuoliskojen väliin jää pieni rako. Rako voi syntyä esimerkiksi suuren syöttöpaineen vuoksi, joka työntää muottipuoliskoja erilleen. Materiaalin pursotuksen yhteydessä osa materiaalista voi päätyä tähän rakoon, aiheuttaen ulkonevan jäysteen (flash) (Hwang 2012, 239; Kang, Ahn, Chung. S. H, Chung S. T, Kwon, Park & German 2012, 214.)

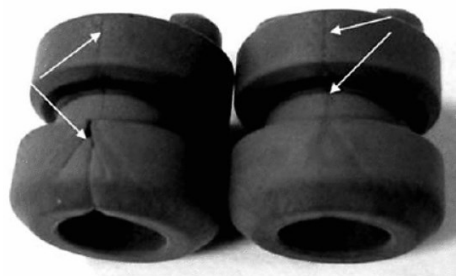
Jäyste muodostuu valmistettavaan kappaleeseen ruiskutusjakson yhteydessä. Vihreän kappaleen pehmeän koostumuksen vuoksi Schlieper (2012) suosittelee jäysteiden poistoa tehtäväksi kappaleen ollessa vihreässä tilassa. Kappaleet ovat tällöin helpommin prosessoitavissa kuin kovassa, sintratussa tilassa. (Schlieper 2012, 101.)

Yhtymäsaumat

Yhtymäsauma (weld line) muodostuu, kun ruiskutusvaiheessa kaksi tai useampi sularintamaa kohtaavat muotissa eivätkä yhdisty täydellisesti (KUVIO 22). Yhtymäsaumat voivat olla joko kosmeettisia virheitä tai rakenteellisia heikkouksia riip-

puen siitä, miten kohtaavat sularintamat ovat yhdistyneet toisiinsa. Kylmäyhymäsauman fyysiset ominaisuudet ovat huomattavasti heikommat, kuin kuumayhymäsaumassa. (Järvelä ym. 2000, 184; Kang ym. 2012, 214; Schlieper 2012, 101; Bulger 2018, 68.)

Järvelä ym. (2000) kuvailevat yhtymäsaumojen täydellistä välttämistä käytännössä mahdottomaksi (Järvelä ym. 2000, 184). Yhtymäsaumojen muodostumista voidaan kuitenkin vähentää esimerkiksi epäsymmetrisellä materiaalinsyötöllä tai lisäämällä muottipesään ylimääräinen tasku, joka luo materiaalivirtauksen yhtymäsauman yli. (Järvelä ym. 2000, 184, 186, 188)



KUVIO 22. Kahden kylmän sularintaman muodostama yhtymäsauma (Hwang 2012, 242, muokattu).

Ulostyöntötappien jäljet

Muotin aukeamisen jälkeen vihreä kappale on saatava ulos muotista. Liikkuvassa muotin puoliskossa on ulostyöntötapit (ejector pin), jotka työntävät kappaleen irti. Ulostyöntötappeja on yleensä useampi koko muotin alueella, jotta irrotettava kappale ei väännä tai rikkoudu prosessin aikana. Ulostyöntötapit jättävät kappaleeseen tunnusomaiset jäljet, pyöreät painaumat (KUVIO 23). Jäljet sijaitsevat yleensä siinä kohdassa kappaletta, jossa vaadittu irrotusvoima on suurimmillaan. (Järvelä ym. 2000, 146, 296; Heaney 2012, 37.)

Työkalutunnisteet

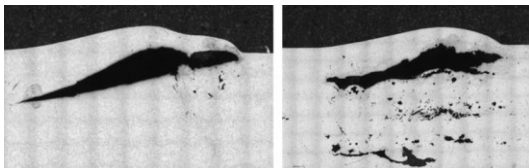
Muotissa ja muottipesässä on myös tunnusmerkinnät, joiden avulla lopullinen kappale voidaan yhdistää muottiin ja muottipesään, jolla se on valmistettu (KUVIO 23). Valmistusvirheiden ja ongelmien ilmetessä voidaan tarkistaa, onko muotteilla tai muottipesillä yhteyttä ongelmaan.



KUVIO 23. Ulostyöntötappien tunnusomaiset pyöreät painumat. Keskellä kappaletta työkalutunniste "4" (Kuva: Kimi Ahola 2024).

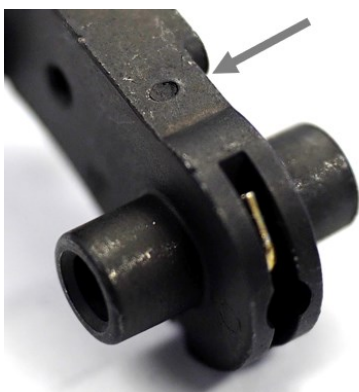
Painumat ja huokoisuus

Jos valmistettavassa kappaleessa on ohuita ja paksuja kohtia, voi paksuissa kohdissa esiintyä myös sideaineen poiston hankaluuksista johtuvia imujälkiä, huokoisuutta ja rakkulamaisia pintavirheitä (Heaney 2012, 41). KUVIO 24 havainnoi rakkulamaisen pintavirheen koostumusta.



KUVIO 24. Rakkulamaisen pintavirheen poikkileikkauksia (Sunrise Metal 2023).

Imujälki voi muodostua kappaleeseen, jos ruiskutuksen prosessisuureet eivät ole kohdallaan. Liian matala puristus-, tai jälkipaine voi johtaa vajaatäyttöön. Vajaatäyttö puolestaan voi kehittyä onkaloiden muodostumiseksi kappaleen paksuissa kohdissa. Sintrauksen yhteydessä kappale kutistuu, ja onkaloiden kohdalle voi muodostua pintapainuma (sink mark) (KUVA 8). (Hwang 2012, 240–241.)



KUVA 8. Pintapainuma kappaleen tasopinnalla (Kuva: Kimi Ahola 2024).

3.5.2 Sideaineen poiston ja sintrauksen valmistusvirheet

Sideaineen poisto

Luvussa 2.3.4 sivuttiin sideaineen poiston mahdollisia laatueroja. Liian aggressiivinen sideaineen poisto voi aiheuttaa valmistettavaan kappaleeseen säröjä tai muodostaa sen pintaan rakkulamaista huokoisuutta. Jos kappaleiden sisälämpötila kasvaa liian nopeasti, voi sideaineen polymeereihin muodostua säröjä ja niiden sisään jäädä karstaa. Epäjatkuvuudet osan rakenteessa puolestaan aiheuttavat kaikenlaisia muita ongelmia, kuten kappaleen epämuodostumista ja muutoksia kappaleen fyysisiin ominaisuuksiin ko. alueella. (Benerjee & Joens 2012, 146.)

Sintraus

Valmistusprosessin sintrausvaiheessa kappale altistetaan korkeille lämpötiloille. Korkean lämpötilan heikentämän lujuuden ja mahdollisesti puutteellisen tuennan seurauksena kappale voi epämuodostua sintrausvaiheessa. Jo pelkkä painovoima riittää vääristämään kappaleen muotoa. (Baerjee & Joens 2012, 167; Heaney 2012, 40.) Coyle (2024) sanoo, että MIM-kappale tulee roikkumaan, valuun ja epämuodostumaan näissä lämpötiloissa, ja se kannattaa vain hyväksyä.

Vääntyminen voi johtua myös muista tekijöistä, kuten valmistettavan kappaleen materiaalivahvuuden vaihtelusta. Materiaalivahvuuden vaihtelu johtaa ruiskutusvaiheessa raaka-aineen pakkauspaineen paine-eroihin, sideaineen poistoajan vaihtelevuuteen ja lämpömassan eroihin (Heaney 2012, 41).

3.5.3 Materiaaliperäiset ongelmat

Toimijat MIM-alalla ovat ottaneet tavaksi säästää valmistuskustannuksissa (Kulkarni & Kolts 2002, Hwang 2012, 237). Raaka-ainetta kierrätetään vaihtelevalla suhteella, joista kaksi yleisintä on 30–50 % ja 100 %. Materiaalin uusiokäytön heikkous on materiaalin fyysisten ominaisuuksien heikkeneminen sen sideaineiden hapettumisen myötä. (Hwang 2012, 237.)

Kierrätetyt raaka-aineet muodostavat heikompia vihreitä osia, ja tuovat valmistusprosessiin vaihtelua valmistuserien välille (Kulkarni & Kolts 2002, Hwang 2012, 237). Useamman kerran kierrätetty raaka-aine vaikuttaa lopullisiin osiin, aiheuttamalla niihin enemmän säröjä ja epämuodostumia sideaineen poiston yhteydessä. (Hwang 2012, 237.)

3.5.4 Lämpökäsittelyn haasteet

Suuri osa ampuma-asealan MIM-osista lämpökäsitellään jollain asteella, riippuen osan käyttötarkoituksesta. Niin kuin perinteiset menetelmät, myös MIM on altis mahdollisille lämpökäsittelyongelmille. Epäonnistuneet lämpökäsittelyt voivat johtaa liian suureen, tai matalaan kovuuteen lopputuotteessa.

Yleiset lämpökäsittelyt teräsosalle ovat karkaisu, sammutus ja päästö. Karkaisussa teräsosa kuumennetaan austenointilämpötilaan (austenitization), jossa sen rakenne alkaa muuttua austeniittiseksi. Kuuma teräs sammutetaan, eli jäähdytetään nopeasti (quench). Nämä käsittelyt muuttavat teräksessä olevan austeniitin martensiitiksi. Hiili on kovien teräsosien kulmakivi, jota ilman teräsosa ei pysty karkenemaan. Hiilen tehtävä on lisätä karkaisussa syntyvää martensiitin kovuutta, ja tätä kautta nostaa teräksen lujuutta ja kovuutta. Martensiittinen rakenne on kuitenkin erittäin haurasta, eikä se kestä rasituksia, iskuja tai taivutusta. Päästön tehtävä on palauttaa osa muodostuneesta martensiitista takaisin kohti ferriittistä tilaa, jolloin teräksestä tulee sitkeämpää. Teräksen päästössä ja kappaleen tulevissa pintakäsittelyissä tulee kuitenkin kiinnittää huomiota päästölämpötilaan. Martensiitilla on kuitenkin taipumus päästöaurauteen 200–370 °C lämpötiloissa. (Kivivuori 2016, 51; Hannula, Haimi & Lindroos 2020, 153, 158–159.)

Hiilen pitoisuuksien seuranta on avainasemassa MIM-osien valmistuksessa. Hiiltä vaaditaan, kun valmistettava MIM-osa tullaan lämpökäsittämään. Jotkin materiaalit ovat myös alttiita haurastumiselle, kuten esimerkiksi titaani. Tästä syystä MIM-prosessissa seurataan hiilen pitoisuutta aktiivisesti lämpökäsittelyongelmien välttämiseksi. (Heaney 2012, 261.)

3.5.5 Jälkikäsittelyihin liittyvät ongelmat

Pinnanlaatu

MIM-osien pinnanlaatuun vaikuttaa raaka-aine, sintraus ja kaikki jälkikäsittelyt. Metallin ruiskuvalulla voidaan saavuttaa jopa Ra 0.8 pinnanlaatuvaatimus ilman jälkikäsittelyitä. Moni komponentti käy kuitenkin jonkinlaisen pintakäsittelyn, ennen kuin osaa voidaan kutsua valmiiksi. Kuulapuhallus aiheuttaa kappaleen pintaan pistekorroosiota (pitting), joka kasvattaa pinnankarheutta. Kappaleiden rummutuksella voidaan silottaa kappaleen pintaa, vähentäen pinnankarheutta. (Heaney 2012, 35.)

Pintakäsittelyt ja pinnoitteet

Viitaten kappaleeseen 2.3.6, jossa käsiteltiin mahdollisia pinnoituksia ja pintakäsittelyjä; jokainen pinnoitusmenetelmä on oma prosessinsa, joilla on omat haasteensa. MIM-valmistusmenetelmä ei ole näille immuuni. Mahdollisten pinnoitusten ja pintakäsittelyiden mahdollisiin haasteisiin on suositeltavaa perehtyä huolella, ennen kuin valmistettavalle kappaleelle valitaan pinnoitusmenetelmä.

Bulger (2018) varoittaa myös mahdollisista suunnittelumuutosten aiheuttamista ristiriidoista. Valmistettava kappale voi alun perin olla suunniteltu valmistettavaksi niukkaseosteisesta teräksestä, jolle on määritetty lämpökäsittelyiksi karkaisu ja päästö. Jatkokäsittelyiksi on voitu määrittää liukkaan, mustan pinnan tuottava ferriittinen hiilitypetys, jonka 500°C prosessilämpötilat ylittävät helposti minkä tahansa niukkaseosteisen teräksen päästölämpötilan. Prosessin korkea lämpötila ja 25 minuutin pitoaika riittää hehkuttamaan niukkaseosteisen teräksen takaisin pehmeään tilaan. Lopputuloksena on osa, joka oli kova, mutta ei ole enää. (Bulger 2018, 62.)

3.5.6 Kokoonpanot ja kokoonpano-ohjeet

Tuotteiden kokoonpanovaiheen yhteydessä on aina mahdollisuus virheisiin. Ongelmat eivät aina ole peräisin yhteensopimattomista osista, vaan virheet voivat johtua myös kokoonpanomenetelmien poikkeamista tai inhimillisistä virheistä.

”Inhimillinen virhe on hyvin yleinen virhe niin teollisuudessa kuin palveluissakin. Onnettomuuksista 80–90 % uskotaan tapahtuvan inhimillisestä virheestä. Sama uskomus voitaneen yleistää kaikkiin tuote- ja palveluvirheisiin. Sanotaanhan, että ”erehtyminen on inhimillistä”!” (Karjalainen 2024)

Kokoonpanon onnistumisen ja lopputuotteen toimivuuden varmistamiseksi on erityisen tärkeää, että kokoonpano suoritetaan aina samalla tavalla annettujen kokoonpano-ohjeiden mukaisesti.

3.5.7 Muut laatupoikkeamat

Mittausvirheet ja laadunvalvonta

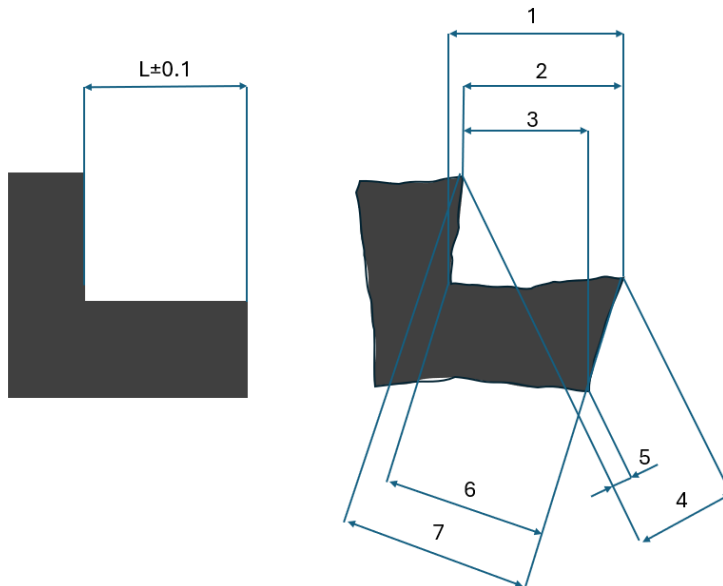
Laatupoikkeamia voi myös ilmetä mittausteknisistä syistä. Mittausvirhe voi olla systemaattinen, satunnainen tai karkeantyyppinen. Systemaattista virhettä ei pysty poistamaan, eikä se pienene, kun samaa mittausta toistetaan. Sen vaikutus voidaan kuitenkin ottaa huomioda laadunvalvonnassa laskemalla. Satunnaiset virheet käyttäytyvät nimensä veroisesti. Karkeat virheet johtuvat usein inhimillisistä virheistä ja vääristä mittausmenetelmistä. (Lehto 2011, 434, 436.)

MIM on markkinoitu valmistusmenetelmänä, jolla on mahdollista tuottaa tarkkoja kolmiulotteisesti monimutkaisia osia, ja vielä sarjatuotannollisesti. Tämä voi luoda mielikuvan, että osa voidaan suunnitella todella monimutkaiseksi ja osan kaikille piirteille voidaan määrittää toiminnan kannalta tarpeettoman tarkat vaatimukset. Tämä käytäntö voi johtaa MIM-osan kustannusten kasvuun, valmistettavien osien prototyyppien viivästyymiseen ja jopa muottien ja työkalujen uudelleentyöstöön. (Bulger 2018, 62.)

Liiallisen tarkat yleistoleranssivaatimukset voivat johtaa tilanteeseen, jossa osa ei ole valmistettavissa tarjotulla MIM-prosessilla. Tilanne on mahdollinen, jos piirustus läpäisee tarkastuksen ilman että kukaan huomaa piirustuksen ylitarkat vaatimukset. Liian tarkat vaatimukset piirustuksissa tuottavat myös epäsuoria seuraamuksia mahdollisten syyttelyn muodossa. Piirustusten muutospyynnöt voivat nostattaa tuotesuunnittelijoissa vastarintaa, jos he eivät näe kannustinta tehdä helpotusta osan vaatimuksiin. Mikäli suunnittelija päättää löysentää osan

vaatimuksia ja tämän takia tulee myöhemmin ongelmia, syyttävät sormet osoittavat usein kohti suunnittelijaa, joka myönsi helpotukset vaatimuksiin. Osan suunnittelija päätyy helposti asemaan, jossa hän ei voi voittaa. Paras keino välttää nämä ongelmat on käsitellä ne tuotesuunnittelun alkuvaiheessa. (Bulger 2018, 62–63)

Laatupoikkeamia voi tulla myös spesifikaatioepävarmuuden vuoksi. Valtanen (2022) kirjoittaa suunnittelussa \pm toleranssien epäselvyyksistä ja tulkinnanvaraisuudesta. \pm mitoitus mahdollistaa mitan tulkitsemisen usealla eri tavalla, KUVIO 25:ssä mahdollisia tapauksia on ainakin seitsemän. (Valtanen 2022, 173.) Toiminnallisten mittojen mitoitus \pm toleransseilla riskeeraa osan toiminnan ja yhteensopivuuden ympäröivien osien kanssa.



KUVIO 25. \pm toleroinnin epäselvyyksiä (Valtanen 2022, 173, muokattu).

3.6 Muutokset ja revisiot

Suunnitellut tuotteet kehittyvät ajan myötä. Myös MIM-osia voidaan joutua muuttamaan tai päivittämään. HAW, F+F ja Abulawi (n.d.) kuvailevat muutoksia aiemmin hyväksytyyn tai julkaistuun tuotteeseen tehtyinä parannuksina tai hienosäätönä (TAMK n.d., 7). Professori Lindemann (2009) sanoo, että 30–50 % tuotteen kehityskuluista muodostuu muutoksista. Tämän lisäksi muutokset aiheuttavat

suuria kustannuksia myöhemmissä työvaiheissa, kuten hankinnassa ja tuotannossa. (TAMK n.d., 9.)

Useissa tapauksissa muutos MIM-osaan tarkoittaa muutosta muotteihin tai valmistuksen työkaluihin. Muutoksen tyylistä riippuen muotista joko poistetaan, tai siihen lisätään materiaalia. Työläämpi ja kalliimpi vaihtoehto on materiaalin lisääminen muottiin. Materiaalia voidaan lisätä muotteihin hitsaamalla ja koneistamalla hitsattu lisämateriaali haluttuun muotoon. Pienien mittamuutosten kohdalla muotteja on mahdollista muokata pinnoittamalla. Suurempien muutosten kohdalla muotti tai muotit voidaan joutua tekemään kokonaan uusiksi. (Bulger 2018, 65.)

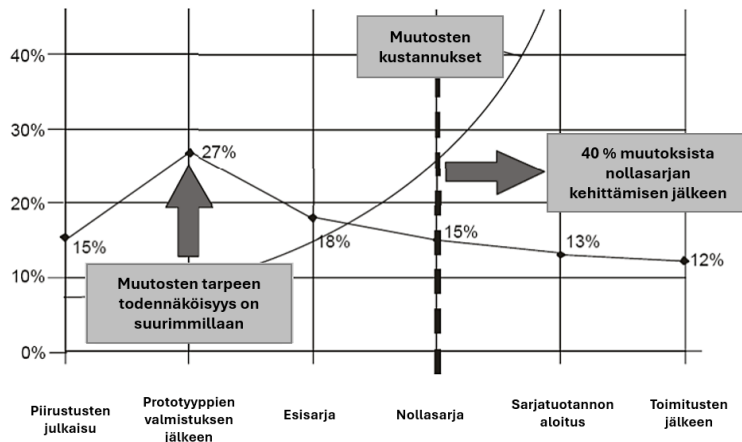
MIM-osissa voi olla myös koneistamalla täsmättyjä piirteitä. Usein tarkemmat piirteet viimeistellään MIM-osiin koneistamalla tai hiomalla. On myös mahdollista, että osan suunnittelumuutos on toteutettavissa muuttamalla vain jälkikäteen tehtävää täsmäystä.

Mahdolliset muutokset vaikuttavat myös valmistettävien osien laadunvalvontaan. Muutos voi vaikuttaa mittavälineisiin, joilla valmistettuja osia tarkastetaan. Koor dinaattimittakoneen mittaushjelmat, tulkit ja mittauksessa käytettävä mittaväline ovat kaikki tekijöitä, joihin muutos voi vaikuttaa.

Muutosten yhteydessä suunnittelijan on hyvä ymmärtää, miten osa on valmistettu ja kuinka laajasti yksinkertaiselta vaikuttava muutos voi vaikuttaa MIM-osan valmistukseen. Suunnittelijan on suhtauduttava kriittisesti mahdollisiin muutoksiin, arvioitava niiden todellinen tarpeellisuus ja punnittava muutoksen aiheuttamat mahdolliset seuraukset.

Lindemann (2009) on laatinut kuvaajan, jossa esitetään muutosten tarpeen todennäköisyys tuotteen eri vaiheissa (KUVIO 26). Korostettuna on prototyyppien valmistuksen jälkeinen vaihe, jolloin muutosten tarve on suurimmillaan (27 %). Kuvaajassa on myös eksponentiaalinen käyrä, joka kuvastaa muutosten kustannuksia tuotteen eri vaiheissa. Muutosten kustannuksien ja muutosten tarpeen kuvaajat risteävät esisarjan jälkeen, joka tarkoittaa muutosten olevan erityisen kal-

liita tästä vaiheesta eteenpäin. Tästä huolimatta 40 % muutosten tarpeista ilmenee vasta tämän hetken jälkeen, mikä korostaa muutosten tarpeellisuuden arviointia.



KUVIO 26. Muutosten tarpeellisuus (%) tuotannon eri vaiheissa. (TAMK n.d., 12, muokattu).

Lindemann (2009) on koontanut myös listan strategioita muutosten välttämiseksi:

- Selkeän tavoitteen asettaminen.
- Perusteellinen vaatimustenmäärittely tuotekehityksen alkuvaiheessa.
- Hyvä kommunikaatio ja informaation kulku.
- Aiemman kokemuksen hyödyntäminen toistuvien virheiden välttämiseksi.
- Toimivaksi todettujen ratkaisujen uudelleenkäyttäminen.
- Muutosten seurausten ennalta-arviointi.
- Muutosten priorisointi: "voidaan tehdä" ja "pitää tehdä"
- Muutosten tekninen ja taloudellinen arviointi.
- Muutostietoisien päätöksentekokanteen käyttöönotto.

(TAMK, n.d., 11.)

4 POHDINTA

Toiminnallisen opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä metallin ruiskuvaluun (MIM) valmistusmenetelmänä, sen vaiheisiin sekä sen tunnusomaisiin haasteisiin. Työssä selvitettiin, miten MIM-osien suunnittelua ja yhteistyötä MIM-alan toimijoiden kanssa on mahdollista kehittää, painopisteenä onnistunut ja perusteellinen MIM tuotesuunnittelu.

Työssä perehdyttiin perusteellisesti MIM-valmistusteknologian prosessiin, sen vaiheisiin, yksityiskohtiin ja haasteisiin. Laajan lähdekirjaston sekaan mahtui moninaista tietoa eri tahoilta ja MIM-alan toimijoilta. Perehdyttäessä MIM-valmistusteknologian teoriaan ja sen eri osa-alueisiin, huomioni kiinnittyi lähdeviitteissä useasti toistuviin samoihin tekijöihin. Metallin ruiskuvalun piirit vaikuttavat tiiviiltä ja sisältävät rajallisen määrän ammattilaisia. Lähdeviitteissä toistuvat nimet motivoivat laajentamaan tiedon etsintää eri lähdeformaatteihin, kuten ammattilehtien artikkeleihin ja tietoon suoraan valmistajilta. Tieteellisten artikkeleiden kautta saatiin tietoa MIM-teknologian nykytilanteesta ja uusista kehitysaskelista.

Pääsääntöisesti MIM-teknologialle suositeltavat menetelmät osoittautuivat yhte-neviksi metallin ruiskuvalun toimijoiden keskuudessa. Opinnäytetyö onnistui tarjoamaan hyvän kokonaiskuvan MIM valmistusmenetelmän teoriasta ja käytännöistä. MIM-valmistusmenetelmän teoriasta saatiin luotua kattava kuvaus, joka tarjoaa opinnäytetyön toimeksiantajalle ja lukijalle hyvät perusteet ja tiedot metallin ruiskuvalusta valmistusmenetelmänä. Yhdistämällä tietoja useista luotettavista lähteistä saatiin koottua lukuisia keinoja ja ohjeita, joiden avulla MIM-osien suunnittelua on mahdollista kehittää tulevaisuudessa.

Teknisen piirtämisen rooli on tärkeä aihealue MIM valmistuksessa. Teknisestä piirtämisestä olisi pystynyt kirjoittamaan huomattavasti enemmän, mutta opinnäytetyön raamit ja aikataululliset tavoitteet asettivat rajoitteita työn laajuuden suhteen. Tämän vuoksi tiettyjä aihealueita ja niiden sisältöä jouduttiin rajaamaan perusasioihin ja avainkohtiin. Piirustusten yksiselitteisyyden merkitys MIM-osien geometrioiden määrittämisessä olisi ansainnut enemmän huomiota. Teknisen piirtämisen ja geometrisen tuotemäärittelyn aihealueisiin voi syventyä halutesaan tarkemmin alan kirjallisuuden ja standardien avulla.

Korostuneena havaintona useampi tietolähde painotti huolellisen suunnittelun merkitystä MIM-tuotteiden valmistuksessa. Perusteellinen ja hyvä suunnittelu auttaa tunnistamaan ja välttämään mahdolliset haasteet ja ongelmakohdat jo tuotekehityksen varhaisessa vaiheessa, vähentäen tuotekehityskustannuksia merkittävästi ja nopeuttaen tuotteiden saattamista markkinoille. Tämä korostaa MIM-tekniikan etuja ja hyötyjä silloin, kun suunnittelutyö on tehty huolellisesti.

Opinnäytetyössä selvisi, että metallin ruiskuvalu tarjoaa mahdollisuuksia useille teollisuuden aloille, mukaan lukien aseteollisuudelle. Metallin ruiskuvalu on monimutkainen valmistusmenetelmä, jonka hyödyntäminen edellyttää syvällistä teknistä osaamista ja sujuvaa yhteistyötä sidosryhmien välillä. Tulevaisuudessa MIM-tekniikkaan liittyvä osaaminen ja sen kehittäminen tarjoavat mahdollisuuksia parantaa tuotannon tehokkuutta ja optimoida valmistuskustannuksia.

LÄHTEET

Alpha Precision Group. 2024a. Metal Injection Molding: Producing Complex Geometries & Unique Components. Verkkosivu. Viitattu 8.11.2024.

<https://www.alphaprecisionpm.com/metal-injection-molding-division>

Alpha Precision Group. 2024b. Metal Injection Molding: A Beginner's Guide for Engineers. Verkkosivu. Viitattu 8.11.2024. <https://www.alphaprecisionpm.com/metal-injection-molding-a-beginners-guide-for-engineers>

Banerjee, S. & Joens, C. J. 2012. Debinding and sintering of metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 133–180.

Benson, J & Chikwanda, H. n.d. The Challenges of Titanium Metal Injection Moulding. CSIR –Materials Science and Manufacturing. Viitattu 14.11.2024.

<https://researchspace.csir.co.za/server/api/core/bitstreams/0b96e22a-7c0c-4fd8-9d0b-7c267bf48474/content>

Bose, A. 2024. Industry insight from the 2024 International Conference on Injection Molding Metals, Ceramics and Carbides. PIM International Vol. 18 no. 2 summer 2024. 91–111. Viitattu 13.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/PIM-Summer-2024.pdf>

<https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/PIM-Summer-2024.pdf>

Bulger, M. 2018 Design for Metal Injection Moulding: Ten rules to save time, reduce costs and improve quality. PIM International. Vol. 12 No. 3. September 2018. 61–68. Viitattu 20.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2018/09/PIM-Vol-12-No-3-sp.pdf>

<https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2018/09/PIM-Vol-12-No-3-sp.pdf>

Coyle, D. 2024. A tooling expert's 'primer' on Metal Injection Moulding: What technology newcomers need to know. PIM International. Vol. 18 no. 2 summer 2024. 77–83. Viitattu 14.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/PIM-Summer-2024.pdf>

<https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/PIM-Summer-2024.pdf>

Enneti, R. K., Onbattuvelli, V. P. & Atre, S. V. 2012. Powder binder formulation and compound manufacture metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 64–92.

German, R. M. 2012. Metal powder injection molding (MIM): key trends and markets. Teoksessa Heaney, D. F (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 1–25.

<https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/06/PIM-Summer-2024.pdf>

German, R. M. 2015. Designing for Metal powder injection Molding. Teoksessa Samal, P. (toim.) & Newkirk, J (toim.). ASM Handbook. Volume 7, Powder metallurgy. E-kirja. Materials Park, OH: ASM International, 848–854.

Hannula, S-P., Haimi, E. & Lindroos, V. 2020. Uudistettu Miek-Ojan Metallioppi. Helsinki: Teknologainfo Teknova Oy

Heaney, D. F. 2012. Designing for metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 29–49.

Heaney, D. F. & Greene, C. D. 2012. Molding of components in metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 109–132.

Heaney, D. F. 2012. Qualification of metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 254–264.

Hwang, K. S. 2012. Common defects in metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 235–253.

INDO-MIM. 2024. Custom Metal Injection Molding Solutions for Consumer Product Applications. Verkkosivu. Viitattu 2.11.2024. <https://www.indo-mim.com/mim-consumer/>

INDO-MIM n.d. AR15 and 1911 components. Sähköpostiviesti. 18.11.2024

Järvelä, P., Syrjälä K & Vastela, M. 2000. Ruiskuvalu. 3. painos. Tampere: Plastdata Oy

Karjalainen, E. 2024. Inhimillinen virhe ja sen ehkäiseminen. Quality Knowhow Karjalainen Oy (QKK). 14.3.2024. Viitattu 17.11.2024. <https://gkk.fi/inhimillinen-virhe/>

Kang, T. G., Ahn, S., Chung, S. H, Chung S. T, Kwon, Y. S., Park, S. J. & German, R.M. 2012. Modeling and simulation of metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 197–234.

Kivivuori, S. 2016. Lämpökäsittelyoppi 2. Lämpökäsittelytietoa suunnittelijoille. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy

Lehto, H. 2011. Mittaaminen. Teoksessa Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy, 433–453.

McClements, D & Schadeegg, J. 2024. All About Metal Injection Molding (MIM). Xometry. Verkkosivu. Viitattu 9.11.2024. <https://www.xometry.com/resources/injection-molding/metal-injection-molding/>

Metal Injection Molding MIM Materials. 2024. INDO-MIM. Verkkosivu. Viitattu 16.11.2024. <https://www.indo-mim.com/metal-injection-molding-material/>

Metal Injection Molding (MIM) Process. 2024. INDO-MIM. Verkkosivu. Viitattu 28.10.2024. <https://www.indo-mim.com/metal-injection-molding-process/>

Metal Injection Molding Revolutionizing the Defence Industry. 2024. INDO-MIM. Verkkosivu. Viitattu 28.10.2024. <https://www.indo-mim.com/metal-injection-molding-mim-defence/>

Metal Powder Industries Federation (MPIF). 2018. Award winning parts showcase the capability of Metal Injection Moulding technology. PIM International Vol. 12 No. 3 SEPTEMBER 2018. 44–50. Viitattu 14.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2018/09/PIM-Vol-12-No-3-sp.pdf>

Metal Powder Industries Federation (MPIF). 2024. MPIF Design Excellence Awards: New MIM and sinter-based Additive Manufacturing applications in the spotlight. PIM International Vol. 18 no. 3 autumn 2024, 101–108. Viitattu 14.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2024/09/PIM-International-Autumn-2024.pdf>

MIM Design Guidelines – Reference Document. n.d. INDO-MIM. Viitattu 19.11.2024. <https://www.indo-mim.com/wp-content/uploads/2024/04/MIM-Envelope-INDO-MIM.pdf>

MIM Material Properties. 2014. INDO-MIM. Viitattu 24.11.2024. https://www.indo-mim.com/wp-content/uploads/2020/01/mim_materials_leaflet-1.pdf

MIM – METALLIRUISKUVALU. n.d. PLASTOCO OY AB. Verkkosivu. Viitattu 3.11.2024. [https://www.plastoco.fi/fi/mim-metalliruiskuvalu/\\$](https://www.plastoco.fi/fi/mim-metalliruiskuvalu/$)

Pere, A. 2021. Koneenpiirustus 1 & 2. 13. Painos. Espoo: Kirpe Oy

Ramsay, F. 2019. Multi Cavity Injection Molds vs. Family Injection Molds. The Rodon Group. Verkkosivu. Viitattu 16.11.2024. <https://www.rodongroup.com/blog/multi-cavity-vs-family-injection-molds>

Schlieper, G. 2012. Tooling for metal injection molding (MIM). Teoksessa Heaney, D (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 93–108.

Schloder, M. 2023. The Advantages & Disadvantages of Metal Injection Molding. Alpha Precision Group. Verkkosivu. Viitattu 8.11.2024. <https://www.alphaprecisionpm.com/blog/advantages-and-disadvantages-of-mim>

Sunrise Metal. 2023. Blister. Verkkosivu. Viitattu 3.11.2024. <https://www.sunrise-metal.com/blister/>

Suri, P. 2012. Two-material/two-color metal injection molding (2C-MIM). Teoksessa Heaney, D. F. (toim.). Handbook of Metal Injection Molding. E-kirja. Cambridge, U.K.; Philadelphia, Pa.: Woodhead Publishing Limited, 338–348

TAMK. n.d. 08 Release and change management. Vaatimusten- ja muutostenhallinta. Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 18.11.2024. Vaatii käyttöi-keuden. <https://moodle.tuni.fi/mod/resource/view.php?id=2782536>

Tip-Top Molds. 2022. Consider the Advantages of the 2-Step Slider Mold Injection. Verkkosivu. Viitattu 1.12.2024. <https://www.tiptopmolds.com/consider-the-advantages-of-a-2-step-slider-mold-injection/>

Toll, S. 2019. THREAD INSPECTION 101 PART IV – THREAD DESIGNATIONS (METRIC). Fox Valley Metrology. Verkkosivu. Viitattu 3.11.2024. <https://www.foxvalleymetrology.com/blog/posts/2019/july/thread-inspection-101-part-iv-thread-designations-metric/>

Valtanen, E. 2022. Tekniikan taulukkokirja. 23. Painos. Jyväskylä: Genesis-kirjat Oy

Vierimaa, K. 2011. Jauhemetallurgiset valmistusmenetelmät. Teoksessa Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy, 103–138.

Vuorinen, J. 2011. Valutekniikka. Teoksessa Ihalainen, E., Aaltonen, K., Aromäki, M. & Sihvonen, P. Valmistustekniikka. Helsinki: Hakapaino Oy, 65–102.

Whittaker, D. 2017. MIM in the aerospace industry: Fresh perspectives and new opportunities. PIM International Vol. 11 no. 4 December 2017. 48–58. Viitattu 18.11.2024. <https://www.pim-international.com/wp-content/uploads/sites/2/2017/12/PIM-International-December-2017-SP.pdf>

LIITTEET

Liite 1. INDO-MIM:n materiaaleja puolustusteollisuuden tuotteille.

Material Category	Material Name	Properties	Application
Martensitic Stainless Steel	INDO-MIM SS 420	Corrosion resistance, high strength, and hardness. Hardness: 42 HRC typ UTS: 1450 MPa YS: 1150 MPa	Slide stop, Thumb Safety, Ejector, Sear
Martensitic Stainless Steel	INDO-MIM SS 17-4 PH	Corrosion resistance, high strength, and hardness. Hardness: 35 – 43 HRC UTS: 1220 MPa YS: 1100 MPa	Module blank, Levers, Housing gripper
Medium Carbon Low Alloy Steel	INDO-MIM 4340	Strength, toughness, and wear resistance Hardness: 32 – 50 HRC UTS: 1500 MPa YS: 1350 MPa	Guide rails, Slide catch, Bolt carrier, Sight
Medium Carbon Low Alloy Steel	INDO-MIM 4140	Strength, toughness, and wear resistance Hardness: 32 – 50 HRC UTS: 1550 MPa YS: 1400 MPa	Mount bracket, Blocking pin
Medium Carbon Low Alloy Steel	INDO-MIM 4605	Strength, toughness, and wear resistance Hardness: 32 – 50 HRC UTS: 1550 MPa YS: 1400 MPa	Trigger, Barrel bush, Safety Lever
Low Carbon Low Alloy Steel	INDO-MIM 9310	Enhanced strength and toughness Hardness: 375 HV1 (Can be case hardened to 600 – 750 HV1 at surface) UTS: 540 MPa YS: 350 MPa	Hammer, Trigger, Sear
Low Carbon Low Alloy Steel	INDO-MIM 8620	Enhanced strength and toughness Hardness: 50 HRB (Can be case hardened to 600 – 750 HV1 at surface) UTS: 320 MPa YS: 130 MPa	Cane
Tool Steel	INDO-MIM S7	Shock-resistant tool steel. Exceptional toughness and wear resistance. Hardness: 45 – 53 HRC UTS: 1750 MPa YS: 1530 MPa	Locking insert, Firing pin, Hammer
Higher Nickel Steel	INDO-MIM 4630 Modified	Nickel-rich steels for high-temperature strength and thermal stability. Hardness: 35 – 50 HRC UTS: 1500 MPa YS: 1200 MPa	Bolt catch, Extractor, Retainer
Higher Nickel Steel	INDO-MIM 4600 Modified	Nickel-rich steels for high-temperature strength and thermal stability. Hardness: 300 HV1 (can be case hardened to 500 – 600 HV1 at surface) UTS: 425 MPa YS: 300 MPa	Sear housing, Magazine catch, Trigger

(Metal Injection Molding Revolutionizing the Defence Industry 2024)

Liite 2. INDO-MIM:n materiaalien fyysiset ominaisuudet

1(3)

Material Designation	Alloy Composition (wt %)	Condition	UTS (MPa)	YS (0.2%) (MPa)	Elongation (%)	Hardness	Density g/cm ³ (min)	Remarks
CASE HARDENED STEELS								
MIM 4600 (MIM 2200)	Ni 1.5-2.5% Mo 0.50% max C 0.15% max Fe Balance	Sintered	300	170	22	100 HRB max	7.50	Can be case hardened to surface hardness of 600 - 750 HV1
MIM 4600 (Modified) (MIM 2700)	Ni 6-8% Mo 0.5% max C 0.15% max Fe Balance	Sintered	425	300	13	350 HV1 max	7.55	Can be case hardened to surface hardness of 500 - 600 HV1
MIM 8620	Cr 0.5-1% Ni 0.5-1% Mo 0.1-0.25% C 0.2% max Fe Balance	Sintered	320	130	25	100 HRB max	7.50	Can be case hardened to surface hardness of 600 - 750 HV1
MIM 9310	Cr 0.3-0.8% Ni 2.5-3.5% Mo 0.1-0.25% C 0.2% max Fe Balance	Sintered	540	350	15	375 HV1 max	7.50	Can be case hardened to surface hardness of 600 - 750 HV1
HARDENED & TEMPERED STEELS								
MIM 4605 (MIM 4605)	Ni 1.5-2.5% Mo 0.50% max C 0.3-0.6% Fe Balance	Sintered	600	235	10	100 HRB max	7.50	Can be heat treated to 32 - 50 HRC
		Heat Treated	1200	1100	5	32 - 38 HRC		
			1550	1400	3	42 - 48 HRC		
MIM 4630 - modified	Ni 6-8% Mo 0.5% max C 0.2-0.5% Fe Balance	Sintered	700	430	7	45 HRC max	7.50	Can be heat treated to 35 - 50 HRC
		Heat Treated	1200	1000	6	32 - 38 HRC		
			1500	1200	4	42 - 48 HRC		
MIM 4340	Ni 1.5-2.5% Cr 0.75-1.25% Mo 0.50% max C 0.3-0.6% Fe Balance	Sintered	750	300	9	100 HRB max	7.50	Can be heat treated to 32 - 50 HRC
		Heat Treated	1200	1100	6	32 - 38 HRC		
			1500	1350	4	42 - 48 HRC		
MIM 4140	Ni 0.75-1.25% Cr 0.75-1.25% Mo 0.50% max C 0.3-0.6% Fe Balance	Sintered	750	300	9	100 HRB max	7.50	Can be heat treated to 32 - 50 HRC
		Heat Treated	1200	1100	7	32 - 38 HRC		
			1550	1400	4	42 - 48 HRC		
MIM 52100	Ni 0.25% max Cr 1.3-1.8% Mo 0.5% max C 0.8-1.2% Fe Balance	Sintered	1000	650	5	35 HRC max	7.50	Can be heat treated to 55 - 66 HRC
		Heat Treated	1500	1100	2	60 - 65 HRC		
STAINLESS STEELS								
MIM SS 316 (MIM SS 316L)	C 0.08% max Ni 10-14% Mo 2-3% Cr 16-18% Fe Balance	Sintered	480	150	45	100 HRB max	7.65	-
MIM SS 304	C 0.08% max Ni 8-11% Cr 17.5-20% Si-1% max Mn-2% max Fe Balance	Sintered	450	160	25	100 HRB max	7.55	-
MIM SS 316 Duplex	C 0.08% max Ni 4.5-7.0% Cr 21-23% Mo 2.5-3.5% Fe Balance	Sintered	732	447	24	100 HRB max	7.65	-
MIM SS 440C	C 0.9-1.2% Cr 16-18% Ni 0.75% max Mo 0.5% max Fe Balance	Hipped	725	600	4	40 HRC max	7.50	Can be heat treated to 52 - 63 HRC
		Hipped & Heat Treated	1700	1550	<1	55-63 HRC		
MIM SS 420 (MIM 420)	C 0.15-0.4% Cr 12-14% Fe balance	Heat Treated	1450	1150	5	39-46 HRC	7.24	Can be heat treated to 39 - 46 HRC

(Jatkuu)

Material Designation	Alloy Composition (wt %)	Condition	UTS (MPa)	YS (0.2%) (MPa)	Elongation (%)	Hardness	Density g/cm ³ (min)	Remarks
MIM 17-4 PH (MIM 17-4 PH)	C 0.07% max, Cr 15-18%, Cu 3-5%, Ni 3-5%, Nb 0.15-0.45%, Fe Balance	Sintered	900	730	7	35 HRC max	7.50	Can be heat treated to H900, H1050, H1100 Conditions
		Heat Treated (H900)	1220	1100	7	35 - 40 HRC		
MIM HK 30	C 0.2-0.5% Cr 23-27% Ni 19-22% Nb 1.2-1.5% Fe Balance	Sintered	550	200	30	325 HV1 max	7.40	-
Nickel Free SS	C 0.2% max Ni 0.25% max Cr 16.5-17.5% Mo 3.0-3.5% Mn 10-12% Si 1% max Fe Balance	Sintered	790	550	20	50-60 HR 15N	7.70	-
TOOL STEELS								
MIM S7	C 0.45-0.7% Cr 2.5-3.5% Si 0.2-1.0% Mo 1.0-1.8% Ni 0.30% max Fe Balance	Heat Treated	1750	1530	2	46 - 53 HRC	7.30	Can be heat treated to 45 - 53 HRC
MIM M2	C 0.8-1.1% Cr 3.5-4.5% Mo 4.5-5.5% W 5.5-6.5% V 1.5-2.2% Fe Balance	Sintered	700	400	1	55 - 63 HRC	7.90	Can be heat treated to 55 - 66 HRC
		Heat Treated	900	700	1	60 - 65 HRC		
MAGNETIC MATERIALS								
MIM Fe-3Si (MIM -FE-3%Si Grade 1)	C 0.08% max, Si 2.5-3.5%, Fe Balance	Sintered	525	372	23	90 HRB max	7.55	-
MIM Fe-49Co-2V (MIM - FE-50% Co)	C 0.08% max, Co 47-50% V 2.5% max Fe Balance	Sintered	201	132	<1	100 HRB max	7.85	-
MIM SS 430 (MIM SS 430L)	C 0.08% max, Cr 16-18%, Fe Balance	Sintered	438	242	25	100 HRB max	7.32	-
MIM Fe-50Ni (MIM -Fe50Ni)	C 0.05% max Ni 49-51% Si 1% max Fe Balance	Sintered	455	160	30	100 HRB max	7.85	-
TUNGSTEN HEAVY ALLOYS								
MIM WHA1	Ni 2.5-3.5% Fe 0.5-1.0% W Balance	Sintered	-	-	-	-	17.50	WHA are characterised by the density values. Indo-MIM can produce WHA with density ranging from 17 to 18.25 g/cc.
MIM WHA2	Ni 3-4% Cu/Fe 1% max W Balance	Sintered	-	-	-	-	17.50	
TITANIUM & TITANIUM ALLOYS								
CP-Ti Grade 2	C 0.08% max O 0.25% max H 0.015% max N 0.03% max Fe 0.3% max Ti Balance	Sintered	420 min	360 min	17 min	100 HRB max	4.30	-
Ti-6Al-4V Grade 5	C 0.08% max O 0.20% max H 0.015% max N 0.05% max Fe 0.3% max Al 5.5-6.75% V 3.5-4.5% Ti Balance	Sintered	780 min	680 min	10 min	30 HRC max	4.20	-

Material Designation	Alloy Composition (wt %)	Condition	UTS (MPa)	YS (0.2%) (MPa)	Elongation (%)	Hardness	Density g/cm ³ (min)	Remarks
SUPER ALLOYS & OTHERS								
MIM NIM 90	C 0.13% max, Fe 5% max, Ti 2-3%, Al 1-2%, Co 15-21%, Cr 17-21%, Ni Balance	Hipped & Heat treated	1162	782	12	300-450 HV1	7.70	Can be heat treated to 300 - 450 HV1
MIM XEV	C 0.35-0.65% Ni 3.5-5.5% Mn 8-10% Cr 20-22% Nb 1.3-2.5% W 0.8-1.5% N 0.4-0.7% Fe Balance	Heat treated	950	580	10	275-400 HV1	7.80	Can be heat treated to 275 - 400 HV1
MIM MoCrSi2882	C 0.08% max Ni 1.5% max Mo 25-30% Si 1.8-3% Cr 7-10% Co Balance	Hipped	-	625 min	-	52 - 60 HRC	8.60	-
MIM F15	C 0.04% Ni 28.5-29.5% Co 16.75-17.25% Fe Balance	Sintered	460	300	25	90 HRB max	7.75	-
		Hipped	470	330	30	90 HRB max	8.18	

(MIM Material Properties 2014)