

Joona Koski

KOLMEN UUDEN MATERIAALIN KÄYTTÖKOHTEET MATERIAALIA LISÄÄVÄSSÄ VALMISTUKSESSA

Invar 36[®] / 1.3912, CuNi2SiCr -kupariseos ja
Osprey[®] 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs

Kandidaatintyö
Konetekniikka
Jorma Vihinen & Jari Tuominen
Vesa Kananen & Pekka Ketola
12/2020

TIIVISTELMÄ

Joona Koski: Kolmen uuden materiaalin käyttöönotto materiaalia lisäävässä valmistuksessa.
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Konetekniikka
12/2020

Tutkielmassa käsiteltiin materiaalia lisäävää valmistusta, jota kutsutaan myös metallin 3D-tulostamiseksi. Tässä tutkielmassa käytetään pääosin nimitystä metallin 3D-tulostus. Metallin 3D-tulostamisella on jatkuvasti lisää kysyntää markkinoilla ja se on laajasti käytössä teollisuudessa. Kaikkia mahdollisia sovelluskohteita metallin 3D-tulostamisessa ei vielä tiedetä ja niitä tutkitaan jatkuvasti.

Kandidaatintyön tavoitteena oli löytää kolmelle metalliseokselle käyttökohteita metallin 3D-tulostamisessa. Tutkielma tehtiin yhteistyössä 3DStep Oy:n kanssa. Metallin ja muovin 3D-tulostus ja -suunnittelu palveluita tarjoavan 3DStep Oy:n tarkoituksena on lisätä tuotantoon kolme uutta metalliseosta. Tutkittavat metalliseokset olivat Invar 36, CuNi2SiCr -kuperiseos ja Osprey 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs.

Metalliseoksista käsiteltiin kemialliset koostumukset, mekaaniset lujuusominaisuudet sekä muita erikoisominaisuuksia, joita seoksilla on. Invar 36-teräs koostuu 36 -painoprosentista (w%) nikkeliä (Ni) ja 64 -painoprosentista (w%) rautaa (Fe). Invar 36:n etu on siinä, että sen pituuden lämpölaajenemiskerroin on erittäin pieni. CuNi2SiCr-kuperiseos sisältää kuparia, nikkeliä, piitä, kromia, rautaa, mangaania ja lyijyä mutta suurimmalta osalta kuparia. Kyseisellä kuperiseoksella on hyvän korroosionkestävyyden, lämmön- sekä sähkönjohtavuuden lisäksi hyvät lujuusominaisuudet. Puhtaaseen kupariin nähden CuNi2SiCr-kuperiseoksella on parempi vetolujuus. Osprey 2507-AM super-duplex on duplex ruostumaton teräs, jonka hyviä ominaisuuksia on erittäin hyvä mekaaninen lujuus ja korkea korroosionkestävyys. Osprey koostuu pääosin raudasta, kromista, nikkelistä sekä molybdeenistä. Super-duplex ruostumattoman teräksen vetolujuus verrattuna 316L-ruostumattomaan teräkseen on paljon suurempi, myös myötöraja sekä kimmokerroin ovat hieman suurempi.

Invarteräksen käyttökohteita ovat pääosin mittatarkkuutta vaativissa laitteissa juuri seoksen hyvän mittapysyvyyden ansiosta. Invar-terästä käytetään myös paljon kryogeenisissä ympäristöissä kuten esimerkiksi nesteytetyn maakaasun sovelluksissa. Tarkkuutta vaativat komposiittimuotit ovat myös yksi invarteräksen käyttökohteista ja myös mahdollinen sovelluskohde metallin 3D-tulostimen käytölle.

CuNi2SiCr -kuperiseosta voidaan käyttää hyvin laajasti sovelluksissa, jotka vaativat hyvää sähkön- ja lämmönjohtavuutta mutta lisäksi seoksen hyvä mekaaninen lujuus sekä korroosionkestävyys laajentaa sovelluksia entisestään. Lämmönvaihtimet, induktiokarkaisun käämit ja hitsauksessa käytettävät elektrodit ovat sovelluskohteita, joissa yhdistyy lämmönjohtavuuden tarve sekä mekaaninen kestävyys. Näissä kolmessa sovelluskohteessa on jo käytetty osien valmistamiseen metallin 3D-tulostina.

Osprey 2507-AM super-duplex ruostumatonta terästä käytetään öljy- ja kaasuteollisuudessa sekä myös suurta korroosionkestävyyttä vaativissa olosuhteissa kuten esimerkiksi merivesisovelluksissa sekä prosessi- ja kemianteollisuudessa. Metallin 3D-tulostinta on super-duplexin osalta käytetty ainakin merivesipumpun siipipyörän valmistamiseen.

Avainsanat: AM, Materiaalia lisäävä valmistus, metallin 3D-tulostus, Invar36, CuNi2SiCr, Super-Duplex, sovellukset, käyttökohteet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Kiitos 3DStep Oy:lle yhteistyöstä sekä mielenkiintoisesta ja ajankohtaisesta aiheesta. Kiitos myös ohjaajille Jorma Vihiselle ja Jari Tuomiselle näkemyksistä ja auttamisesta työn aiheeseen liittyen

Tampereella, 13.12.2020

Joona Koski

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TUTKIMUSMENETELMÄT	3
3. MATERIAALIEN OMINAISUUDET JA KEMIAALLISET KOOSTUMUKSET	4
3.1.1 Invar 36® / 1.3912-Invarteräs	4
3.1.2 CuNi2SiCr-kupariseos	6
3.1.3 Osprey® 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs	7
4. KÄYTTÖKOHTTEET	10
4.1 Yleisesti	10
4.1.1 Invar 36® -ruostumatonteräs	11
4.1.2 CuNi2SiCr-kupariseos	13
4.1.3 Osprey® 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs	15
4.2 Sovellukset metallin 3D-tulostamiseen	17
4.2.1 Olemassa olevat sovellukset	17
4.2.2 Uudet mahdollisuudet	22
4.3 3D-tulostuksen tuoma lisäarvo	24
5. MATERIAALIEN KÄYTTÖ TULEVAISUUDESSA	26
6. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	29

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

<i>Kuva 1 Gen-El-Mecin Invarista valmistama kotelo (69,4 mm, 80,9 mm, 169,3 mm) puolijohdeteollisuuteen (Gen-El-Mecin).....</i>	<i>12</i>
<i>Kuva 2 Euroopan avaruusjärjestön ESA:n projektissa Invar-teräksestä 3D-tulostettu komponentti (ESA).....</i>	<i>17</i>
<i>Kuva 3 Kuperiseostetusta CuNi2SiCr 3D-tulostettu jäähdytyssiili. (Protolabs)</i>	<i>18</i>
<i>Kuva 4 EOS:in CuCrZr -kuperiseoksesta sekä tulostettu lämmönvaihdin. (Delva Oy).....</i>	<i>19</i>
<i>Kuva 5 GKN:n 3D-tulostama induktiokäämi induktiokarkaisuun (GNK).....</i>	<i>20</i>
<i>Kuva 6 Markforged yrityksen kuparista 3D-tulostama elektrodi hitsaukseen. (Markforged)</i>	<i>21</i>
<i>Kuva 7 Eureka Pumps AS:n suunnittelema pumpun siipipyörä. (Sandvik)</i>	<i>22</i>
<i>Kuva 8 Öljynlauhdutin, joka on rakennettu osista ja 3 eri materiaalista. (Groysman 2017 s. 191)</i>	<i>23</i>
<i>Kuva 9 Hiiliteräksestä valmistetun kaasuventtiilin syöpyminen. (Groysman 2017 s. 144).....</i>	<i>23</i>
<i>Taulukko 1 Jauhepetisulatuksella valmistetun invar 36:n lämpölaajenemiskertoimet eri lämpötiloissa. (SLM Solution Group, invar 36; Qui et al. s. 389–390)</i>	<i>4</i>
<i>Taulukko 2 Taulukon tiedot ovat 3D-tulostamalla valmistetulle Invar 36:lle ilman lämpökäsittelyä. (SLM Solution Group, Invar 36)</i>	<i>5</i>
<i>Taulukko 3 Taulukossa esitetyt luvut ovat massaprosentteja (Wt%). Cu on kupari, Ni on nikkeli, Si on pii, Cr on kromi, Fe on rauta, Mn on mangaani ja Pb on lyijy. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr).....</i>	<i>6</i>
<i>Taulukko 4 CuNi2SiCr -kuperiseoksen vetojännitys, myötöraja ja kimmomoduuli tulostuksen jälkeen mitattuna ja lämpökäsittelyn jälkeen. Tulostuksen kerrospaksuun 30 µm käytetyn laserin teho 400W. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr).....</i>	<i>7</i>
<i>Taulukko 5 Fe on rauta, Cr on kromi, Ni on nikkeli, Mo on molybdeeni, Mn on mangaani, Si on pii, N on typpi, Cu on kupari, C on hiili, P on fosfori, S on rikki. (Sandvik, Osprey)</i>	<i>8</i>
<i>Taulukko 6 Osprey 2507-AM super-duplex ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet lämpökäsittelyn jälkeen (Sandvik, Osprey).....</i>	<i>9</i>
<i>Taulukko 7 Super-duplexin sovelluskohteita teollisuusaloittain (Gunn, 2003, s. 176).</i>	<i>15</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM	<i>Additive Manufacturing, materiaalia lisäävä valmistus</i>
CTMP	<i>Chemi-thermomechanical pulping, Kemitermomekaaninen massanvalmistus</i>
DED	<i>Direct Energy Deposition, kohdennettu sulatus</i>
DSC	<i>Dispersion Strengthened Copper, Dispersiovahvistettu kupari</i>
E-PBF	<i>Electron Beam – Powder Bed Fusion, Elektronisuihku - jauhepetisulatus</i>
Fcc	<i>Face-centered cubic, Pintakeskinen kuutiollinen</i>
FGD	<i>Flue-gas desulfurization, Savukaasujen rikinpoisto</i>
IACS	<i>International annealed copper standard, kansainvälinen hehkutettu kuparistandardi</i>
LNG	<i>Liquefied natural gas, Nestetytetty maakaasu</i>
L-PBF	<i>Laser beam - Power Bed Fusion, Lasersäde - jauhepetisulatus</i>
MIC	<i>Microbiologically influenced corrosion, Mikrobiologisesti vaikuttava korroosio</i>
OFHC	<i>Oxygen-free copper, Haperon kupari</i>
PREN	<i>The pitting resistance equivalent, pistekorroosion vastustus</i>
SLM	<i>Selective laser melting, Jauhepetisulatus</i>
WEDM	<i>Wire-cut electrical discharged machine, lankakipinätyöskökone</i>
Wt%, m%	<i>Percentage by weight, Massaprosentti</i>
μm	<i>Mikrometri [$10^{-6} * \text{m}$]</i>
MS/m	<i>Megasiemenssiä metriä kohden [$10^6 * \text{S/m}$]</i>

1. JOHDANTO

Puhuttaessa materiaalia lisäävästä valmistuksesta, tarkoitetaan sillä yleisesti metallin 3D-tulostusta. Metallin 3D-tulostuksesta on tullut osa teollisuutta ja tällä hetkellä osia valmistetaan tulostamalla myös ilmailu- ja avaruusteollisuuteen. Tulostustarkkuuden ja -nopeuden ansiosta metallin 3D-tulostuksen kysyntä on kasvanut entisestään. On tärkeää tutkia 3D-tulostuksen mahdollisia uusia markkinoita, jotta 3D-tulostusta tarjoavat yritykset voivat jatkuvasti tarjota asiakkailleen parempia tuotteita.

Tämä tutkimus tehdään yhteistyössä 3DStep Oy:n kanssa. 3DStep Oy tarjoaa metallin sekä muovin 3D-tulostus ja -suunnittelupalveluita. Metallin käyttöönotto on kasvattanut merkittävästi materiaalia lisäävän valmistuksen (Additive manufacturing, AM) käyttöpotentiaalia. Nykyään AM-menetelmää voidaan käyttää osana tuotantoa prototyyppien luomisen lisäksi. (Waurzyniak, 2018) AM-menetelmällä voidaan valmistaa kokoonpanon osien lisäksi valmiita osia loppukäyttäjille (Li Yang et. al. 2017, s. 2–3). Tällä hetkellä ei vielä tiedetä kaikkia sovellusalueita, joissa AM-menetelmää voisi käyttää hyödyksi, joten on tärkeää tutkia jatkuvasti uusia mahdollisuuksia. Markkinoille on tullut jatkuvasti uusia metalliseoksia, joita voidaan soveltaa AM-menetelmässä. Markkinoille on tullut myös yhä kykenevämpiä laitteita materiaalia lisäävään valmistukseen. Uusimpana esimerkkinä SLM Solutionin lanseeraama NXG XII 600 metallin 3D-tulostin, joka on entistä nopeampi, ja suunniteltu sarjatuotantovalmistukseen (SLM Solution AG, 14.11.2020). Li Yang:n et al. (2017, s. 162) mukaan materiaalia lisäävä tuotanto tarjoaa merkittäviä säästöjä esimerkiksi tilanteessa, jossa monta osaa sisältävä kokoonpano voidaan valmistaa vain yhdestä osasta. Osan paino voi keventyä merkittävästi ja siihen voidaan tehdä geometrisia ratkaisuja, joita perinteisillä menetelmillä ei voida tehdä.

Tässä työssä pyritään löytämään käyttökohteita kolmelle uudelle materiaalille, jotka 3DStep Oy:llä on tarkoitus lisätä tuotantoon. Tuotantoon on tarkoitus lisätä kolme uutta seosmetallia: Invar 36[®]/1.3912-invarteräs, CuNi2SiCr-kupariseos sekä Osprey[®] 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs. Käsittelen työssä perustiedot metalliseosten ominaisuuksista, jotta olisi helpompi ymmärtää niiden käyttö tietyissä sovelluskohteissa. Tutkielmassa ei ole käsitellyt työssä mainittuja AM-menetelmiä tarkemmin, jottei aihe laajenisi liikaa.

Työn alussa selvitetään materiaalien tekniset ominaisuudet. Materiaaleista selvitetään mekaaniset lujuusominaisuudet, kemialliset koostumukset sekä materiaaliominaisuudet.

Metalliseosten käyttökohteista pyritään aluksi löytämään kaikki alueet, joilla niitä käytetään yleisesti. Sovelluskohteet sijoittuvat maantieteellisesti pääosin Pohjoismaihin. Sovelluskohteista löydettiin myös Suomen markkinoille soveltuvia. Tutkielmaan on pyritty löytämään myös esimerkkejä 3D-tulostetuista kappaleista tutkittavien metalliseosten osalta. Sovelluskohteita on sen jälkeen analysoitu 3D-tulostuksen tuomien etujen näkökulmasta.

2. TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimus perustuu pääosin kirjallisuudesta löytyviin tutkimuksiin ja aineistoihin. Työssä on hyödynnetty myös muutaman yrityksen ajankohtaisia aineistoja. Yrityksien tiedoista olen käyttänyt heidän teknisiä tutkimuksiaan materiaaleihin liittyen. Työssä mainitut esimerkkitaipaukset ja niiden kuvat on haettu eri yritysten nettisivuilta. Olen myös käynyt keskustelua materiaalien ominaisuuksista ja sovelluskohteista Jari Tuomisen kanssa, jolla on hyvä tuntemus tutkittavista materiaaleista sekä metallin 3D-tulostamisesta ja Jorma Vihisen kanssa, jolla on hyvä tuntemus metallin 3D-tulostamisesta.

3. MATERIAALIEN OMINAISUUDET JA KEMIAL- LISET KOOSTUMUKSET

Kaikki tutkittavat materiaalit ovat kahden tai useamman alkuainemetallin seoksia. Tutkitavilla materiaaleilla on erikoisominaisuuksia, ja ne on suunniteltu haastaviin olosuhteisiin. Invar 36:n sekä CuNi2SiCr:n tekniset ominaisuudet perustuvat pääosin SLM Solution Group AG:n tekemiin tutkimuksiin materiaalia lisäävään valmistukseen soveltuvilla metallijauheilla. Osprey:n tulokset perustuvat pääosin Sandvik AB:n tekemiin tutkimuksiin. SLM Solution Group on yritys, joka toimittaa metallin 3D-tulostimia sekä niihin soveltuvia metallijauheita, ja Invar 36:n sekä CuNi2SiCr kuuluvat heidän tuoteperheeseensä. Sandvik AB valmistaa Osprey 2507-AM super duplex ruostumattoman teräksen metallijauhetta 3D-tulostukseen. Kaikkien näiden metalliseosten valmistamiseen käytetään jauhepetisulatusta sekä metallijauheet on valmistettu nimenomaan 3D-tulostamista varten.

3.1.1 Invar 36[®] / 1.3912-Invarteräs

Rautaseostettu Invar 36/1.3912 on metalliseos, jossa on 64 w% rautaa ja 36 w% nikkeliä. Invar 36 on tarkoitettu käytettäväksi nimenomaan jauhepetisulatuksella (Qiu et al. 2016). Édouard keksi Invar-materiaaliyhdistelmän ensimmäisenä jo vuonna 1896 (N/A. 2012). Quillaum sai löydöstään Nobelin palkinnon vuonna 1920 (The Nobel Prize 1.11.2020).

Taulukko 1 *Jauhepetisulatuksella valmistetun invar 36:n lämpölaajenemiskertoimet eri lämpötiloissa.* (SLM Solution Group, Invar 36; Qui et al. 2016, s. 389–390)

Lämpötila	Lämpölaajenemiskerroin (α), AM
22 °C – 100 °C	$0,55-1,20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
100 °C – 200 °C	$2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
200 °C – 300 °C	$> 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
0 °C – 300 °C	$3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (jos lineaarinen)

Taulukosta 1 voidaan nähdä, että Invar 36:n lämpölaajenemiskerroin hieman kasvaa lämpötilan noustessa. Erittäin pieni lämpölaajenemiskerroin (α) on Invar 36:n yksi hyödyllisimmistä ominaisuuksista, ja sen arvo vaihtelee hieman lämpötilan mukaan. Valamalla ja takomalla valmistetun Invar 36 -kappaleen lämpölaajenemiskerroin on $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ alle 300 °C :n lämpötiloissa, joten se on vain hieman pienempi kuin jauhepetisulatukella valmistetun kappaleen (Qui et al. s. 389–390). Invar 36:n Curien lämpötila on 230 °C . Rajaram M. (2007, s. 157) mukaan Curien lämpötila on piste, jossa ferromagneettiselta materiaalilta häviää ferromagneettiset ominaisuudet ja siitä tulee paramagneettinen. Wassermannin (2001) mukaan Invar-teräksellä, jossa on rautaa sekä nikkeliä, mikrorakenne on pintakeskinen kuutiollinen (face centered cubic, fcc).

Taulukko 2 Taulukon tiedot ovat 3D-tulostamalla valmistetulle Invar 36:lle ilman lämpökäsittelyä. (SLM Solution Group, Invar 36)

Vetojännitys σ_m (MPa)	0°	508
	45°	487
	90°	443
Myötöraja $\sigma_{0.2}$ (MPa)	0°	404
	45°	394
	90°	352
Kimmomoduuli E (GPa)	0°	153
	45°	125
	90°	131

Taulukossa 2 esiintyvät suunnat ovat kuormituksen suuntia suhteessa tulostettavaan tasoon. Lämpökäsittelyllä ei ole suurta vaikutusta taulukossa 2 mainittuihin lujuuksiin (SLM Solution Group, Invar 36).

Parkin et al. tekemän tutkimuksen mukaan Invar-teräksellä on erinomaiset mekaaniset ominaisuudet kryogeenisissä eli ympäristöissä, joissa on erittäin alhainen lämpötila. Invar-teräksen vetolujuus (yield stress) ja murtolujuus (ultimate tensile stress) kasvoivat lämpötilan laskiessa (Park et al. 2011).

3D-tulostamisesta on Invar36:n kohdalla paljon hyötyä, sillä materiaali on kovaa ja sitkeää sekä hehkutetussa tilassa pehmeää ja kumimaista ja sitä on vaikeaa ja kallista

koneistaa. Jauhepetisulatuksella Invar 36:n mekaaniset ominaisuudet voidaan parametrien säädöillä saada hyvin lähelle koneistamalla tehtyä kappaletta. Invar 36:n huokoisuus on 3D-tulostuksen jälkeen alle 0,5 % laser skannaus nopeuksien ollessa alle 3200 mm/s. Kappaleen tulostussuunnalla ja -nopeudella voidaan vaikuttaa sen vetolujuuteen sekä venyvyysprosenttiin. 3D-tulostetun Invar 36:n pituuden lämpölaajenemiskerroin pysyy lähes muuttumattomana verrattuna perinteiseen Invar 36:een. (Qiu et al. 2016)

3.1.2 CuNi2SiCr-kupariseos

CuNi2SiCr-kupariseoksen erikoisominaisuuksia ovat suuri sähkön- ja lämmönjohtamiskyky sekä suuri jäykkyys myös korkeissa lämpötiloissa. Alla olevassa taulukossa 3 on esitetty CuNi2SiCr-kupariseoksen sisältämät alkuaineet ja niiden määrä suhteessa koko materiaaliin.

Taulukko 3 *Taulukossa esitetyt luvut ovat massaprosentteja (Wt%). Cu on kupari, Ni on nikkeli, Si on pii, Cr on kromi, Fe on rauta, Mn on mangaani ja Pb on lyijy. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr)*

Cu	Ni	Si	Cr	Fe	Mn	Pb	Muut
Loput	2,0–3,0	0,5–0,8	0,2–0,5	≤ 0,15	≤ 0,1	≤ 0,02	≤ 0,1

Nikkelin ja piin ansiosta seokseen on saatu suuri korroosionkestävyys (SLM Solution Group, CuNi2SiCr) Jauhepetisulatuksella tulostetun seoksen mekaaniset ominaisuudet riippuvat vain hieman kerrospaksuudesta sekä käytettävästä laserin tehosta. Taulukossa 4 olevat arvot ovat mitattu kappaleesta, joka on tulostettu 30 µm kerrospaksuudella ja 400W laserteholla. Toinen mittaus on tehty 60 µm kerrospaksuudella sekä 700W laserteholla, mutta sillä ei ollut oleellista merkitystä lujuusominaisuuksiin. Käyttämällä 700W lasertehoa ja 60 µm kerrospaksuutta materiaalin teoreettinen valmistusnopeus tuplaantui suhteessa pienempään lasertehoon ja kerrospaksuuteen. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr)

Taulukko 4 CuNi2SiCr -kuperiseoksen vetojännitys, myötöraja ja kimmomoduuli tulostuksen jälkeen mitattuna ja lämpökäsittelyn jälkeen. Tulostuksen kerrospaksuun 30 μm käytetyn laserin teho 400W. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr)

		Tulostuksen jälkeen	Lämpökäsittely
Vetojännitys σ_m (MPa)	0°	314	666
	90°	281	613
Myötöraja $\sigma_{0.2}$ (MPa)	0°	260	580
	90°	239	543
Kimmomoduuli E (GPa)	0°	98	114
	90°	95	105

Taulukosta 4 mainittu lämpökäsittely on toteutettu kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä lämpökäsittelyn vaiheessa kappale on pidetty 930 °C:ssa 15 minuutin ajan, jonka jälkeen kappale on jäädytetty vedellä. Toisessa vaiheessa kappale on pidetty 540 °C:ssa kahden tunnin ajan, jonka jälkeen se on jäädytetty ilmastossa. Taulukossa esitetyt lujuusarvot ovat verrattavissa 3D-tulostetun haponkestävän ruostumattoman teräksen 316L lujuusarvoihin ja esimerkiksi CuNi2SiCr-kuperiseoksen vetojännitys on lämpökäsittelyn jälkeen hieman 316L:n arvoa suurempi. (SLM Solution Group, CuNi2SiCr)

Montero-Garain et al. (2020) tutkimuksen mukaan tulostetun CuNi2SiCr:n todellinen sähkönjohtavuus eroaa merkittävästi teoreettisesta 23 MS/m:sta. Montero-Garain tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä tarkemmin tulostusmenetelmän parametreja eikä sitä, miten kappale on lämpökäsittely. Valmistusmenetelmällä ja prosessin parametreilla on suuri vaikutus lopulliseen sähkönjohtavuuteen. SLM Solutionin mukaan tulostuksen jälkeisellä lämpökäsittelyllä voidaan sähkönjohtavuudessa päästä arvoon 23 MS/m, joka suoraan tulostuksen jälkeen on 8 MS/m (SLM Solution, CuNi2SiCr). Sähkönjohtavuuden pienenemisen syynä voi olla esimerkiksi huokoinen rakenne, jota voidaan parantaa lämmitettävällä aluslevyllä tai kammiolla ja lämpökäsittelyllä.

3.1.3 Osprey[®] 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs

Duplex-ruostumaton teräs tarkoittaa metalliseosta, jossa on sekä austeniittinen että ferriittinen kiderakenne. Molemmat kiderakenteet sisältävät vähintään 11 w% kromia. Eri-tyyppisiä duplex-teräksiä on standard-, lean-, super- ja hyperduplex. Eri duplexien kemialliset koostumukset vaihtelevat mutta kaikissa pääsääntöisesti 17–30 w% kromia sekä 3–

13 w% nikkeliä. Uudempiin duplex-teräksiin on lisätty mangaania ja piitä 0.5–2.0 w%. (Shek 2012, s. 52; Hosseini et al. 2018)

Korkea lujuus ja sitkeys sekä korroosionkestävyys ovat ominaisuuksia, jotka erottavat Osprey:n esimerkiksi tulostettavasta haponkestävästä ruostumattomasta teräksestä (316 L / 1.4404 / A276). Duplex-ruostumattomilla teräksillä PREN-luku (The pitting resistance equivalent, pistekorroosion vastustus) kertoo seoksen kyvystä vastustaa kloridin aiheuttamaa pistekorroosiota (Mudali 2017). PREN-luku lasketaan kaavalla:

$$\text{PREN} = \text{Cr w\%} + 3.3 * \text{Mo w\%} + 16 * \text{N w\%}, \quad (1)$$

josta taulukon 4 arvoilla laskemalla saadaan Osprey:n arvoksi 43 (Shek 2012, s. 52). PREN-luvun ollessa suurempi kuin 38, seoksella on hyvät edellytykset vastustaa meriveden ja muiden kloridiyhdisteiden aiheuttamaa pistekorroosiota (Mudali 2017). PREN-luvun laskemiseen löytyy kirjallisuudesta muutamia eri variaatioita. Groysmanin mukaan 2507 duplex ruostumattomalla teräksellä, jonka kemiallinen koostumus on hyvin lähellä Osprey:n kemiallista koostumusta, on hyvä happaman veden korroosio verrattuna muihin happamissa nesteissä käytettyihin metalliseoksiin. Hapanta vettä syntyy esimerkiksi monissa jalostusprosesseissa. (Groysman 2017, s. 27)

Taulukko 5 *Fe on rauta, Cr on kromi, Ni on nikkeli, Mo on molybdeeni, Mn on mangaani, Si on pii, N on typpi, Cu on kupari, C on hiili, P on fosfori, S on rikki. (Sandvik, Osprey)*

Fe	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	N	Cu	C	P	S
Lo-put	25,0	7,0	4,0	<1,2	<0,8	0,3	<0,5	<0,03	<0,035	<0,015

Taulukossa 5 esitetyt luvut ovat alkuaineiden osuuksia massaprosentteina. Taulukosta 5 voidaan nähdä, että Osprey koostuu pääosin raudasta, kromista, nikkelistä sekä molybdeenistä. Yhteensä Osprey koostuu 11 eri alkuaineesta.

Taulukossa 6 esitetyt tulokset ovat Sandvik AB:n tekemästä tutkimuksesta, jossa koe-kappaleena käytettiin L-PBF-menetelmällä (Lase beam – Power Bed Fusion, jauhepeti-sulatus) valmistettua kappaletta. Koekappale on hehkutettu tulostamisen jälkeen 1040–1110 °C:een ja jäähdytetty vedellä tai ilmalla. (Sandviik, Osprey)

Taulukko 6 Osprey 2507-AM super-duplex ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet lämpökäsittelyn jälkeen (Sandvik, Osprey).

Vetojäännitys σ_m (MPa)	Horizontaalinen	956
	Vertikaalinen	926
Myötöraja $\sigma_{0.2}$ (MPa)	Horizontaalinen	627
	Vertikaalinen	626
Kimmomoduuli E (GPa)	Horizontaalinen	207
	Vertikaalinen	202

Sandvik AB:n valmistamaa Osprey metalliseosta on kaupallisesti saatavilla monelle metallin 3D-tulostusmenetelmälle tarvittavan raekoon mukaan. Metallijauhetta on saatavilla mm. seuraaville menetelmille: metallin ruiskuvalu, sideainesuihku, L-PFB (Laser beam - Power Bed Fusion), E-PFB (Electron Beam – Powder Bed Fusion) ja DED (Direct Energy Deposition). (Sandvik, Osprey) Shekin et al. (2012) mukaa lämpökäsittelyllä on suuri vaikutus ferriitti- ja austeniittirakenteiden osuuteen kiderakenteessa (Shek et al. 2012, s. 52). Jari Tuomisen mukaan 3D-tulostettuna super-duplexin kiderakenteesta tulee ferriitti valtainen ja seos voi menettää korroosionkestävyyttä.

4. KÄYTTÖKOHTEET

4.1 Yleisesti

Metallin 3D-tulostaminen on kasvava tuotantomenetelmä, jolla on mahdollisuus tulla perinteisten esimerkiksi koneistus- sekä valumenetelmien rinnalle. Yksi suuri tekijä metallin 3D-tulostamisen yleistymiselle on patenttien raukeaminen ja koneiden hintojen lasku. (Waurzyniak 2017) Koneiden hintojen lasku mahdollistaa yhä useamman toimijan lähtemisen markkinoille, joka taas lisää uusia innovaatioita. Monimutkaisen geometrian ja suunnitteluvapauden lisäksi metallin 3D-tulostamisessa on hyötynä se, ettei materiaalia mene hukkaan niin paljon kuin perinteisillä menetelmillä tehdyissä kappaleissa. Joissakin tapauksissa lopputuotteessa olevien osien määrää pystytään merkittävästi vähentämään 3D-tulostamisen avulla. (Wong et al. 2017, s. 3)

Vapaamman suunnittelun ansiosta 3D-tulostetuissa kappaleissa kokonaispainoa saadaan pienennettyä. Kappaleen massalla on merkitystä erityisesti auto-, ilmailu- sekä avaruusteollisuudessa, jossa 3D-tulostamisella on paljon sovelluskohteita. (Wong et al. 2017, s. 10–13) Verrattuna työstökoneella valmistettavien kappaleiden suunnitteluun, 3D-tulostus tarjoaa merkittävästi enemmän geometrisia vapauksia. 3D-tulostettujen kappaleiden mekaaniset ominaisuudet riippuvat usein tarkasteltavasta suunnasta, joten suunnittelijan on otettava kappaleen muoto ja kestävyysvaatimukset huomioon piirittäessä kappaletta. Suunnittelijalla pitää olla tieto siitä, miten materiaalit käyttäytyvät tulostaessa niitä. (Gibson et al. 2017, s. 49) Vapaan geometriasuunnittelun ansiosta voidaan rakentaa hyvinkin monimutkaisia muotoja mutta on otettava huomioon tulostussuunta, jotta kappaleesta saadaan valmistettua optimaalisen kestävä.

Sovelluskohteista täytyy tutkia materiaalivaatimuksia ja etsiä vaatimukset, jotka tutkittavat materiaalit täyttävät. Tutkittavat materiaalit ovat pääosin tarkoitettu erilaisiin olosuhteisiin mutta esimerkiksi CuNi2SiCr-kupariseosta ja 2507-Super-Duplex ruostumatonta terästä voidaan molempia käyttää lämmönvaihtimissa, sillä molemmilla seoksilla on hyvä korroosionkestävyys. Metallin 3D-tulostimen käyttöä tietyissä sovelluskohteissa voidaan arvioida esimerkiksi toteutettavan kappaleen geometrian monimutkaisuuden, painon vähentämistarpeen, varaosan nopeusvaatimusten. Käyttöä voidaan arvioida myös 3D-tulostamisen valmistusnopeuden kannalta verrattuna perinteisiin menetelmiin.

4.1.1 Invar 36[®] -ruostumatoneräs

Erittäin pieni lämpölaajenemiskerroin mahdollistaa Invarin käytön erityisen tarkkoissa sovelluksissa. Invar 36:n sovelluskohteiksi sopivat monet erittäin suurta mittatarkkuutta vaativat kappaleet ja erityisesti suurta mittatarkkuutta muuttuvissa, korkeissa ja matalissa lämpötiloissa. Mekaanisten ominaisuuksien kuten vetolujuuden ja murtolujuuden muuttumattomuus tai jopa parantuminen alhaisissakin lämpötiloissa mahdollistavat Invarin käytön esimerkiksi nesteytetyn maakaasun (LNG) varastoinnissa ja kuljetuksessa. Sovelluskohteita löytyy myös esimerkiksi auto-, ilmailu-, avaruus-, terveys-, sekä elektroniikkateollisuudesta.

Invar 36:n käyttö on yleistynyt mittatarkkuutta vaativien komposiittimuottien valmistus materiaalina. Komposiittimateriaaleja käytetään avaruus- ja ilmailuteollisuuden lisäksi kuljetusalalla ja rakentamisessa. Komposiitin mahdollisia sovelluskohteita ovat kaikki, jossa vaaditaan suurta jäykkyyttä, lujuutta tai lopputuotteen massalla on suuri merkitys. Komposiiteilla on myös hyvä väsymiskestävyys, joka tuo lisäarvoa monelle sovelluskohteelle. Komposiittimateriaaleilla on suuri korroosionkestävyys, minkä vuoksi niitä käytetään vene- ja laivateollisuudessa, jossa korrosio on suuri ongelma. Sovelluskohteita löytyy myös öljy- ja kaasuteollisuudesta, joissa voidaan rakentaa esimerkiksi joustavia mutta kestäviä putkia komposiitista. (Campbell 2010, s. 18–29)

Komposiittimuottien valmistamisessa käytetään Invar-metalliseosta sen pienen lämpölaajenemiskertoimen takia. Valmistus vaiheessa komposiitin sidosaineen kovettamiseksi se jälkilämmitetään ja muotin lämpötila kohoaa tyypillisesti 175 C[°]:seen. Suurten lämpötilan vaihteluiden ja sen myötä muotin laajentumisen tai kutistumisen takia komposiittimateriaali saattaa halkeilla lämmitys tai jäähdytysvaiheessa. (Campbell 2010, s. 104–112) Halkeilun välttämiseksi, mittatarkkuuden pysyvyydeksi ja muotin uudelleen käytettävyyden ansiosta Invar on hyvä muottimateriaali komposiittiteollisuudessa.

Nesteytetyn maakaasun varastointi ja kuljetuslämpötila on alle -163 C[°], joten on selvää, että kaikki materiaalit eivät sovellu siihen käyttötarkoitukseen. Nesteytetyn maakaasun sovelluksissa käytettäviä materiaaleja ovat muun muassa austeniittinen ruostumaton teräs, alumiiniseokset sekä Invar 36. Kaikilla näillä materiaaleilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet alhaisissa lämpötiloissa, mutta Invar 36:n lämpölaajenemiskerroin on näistä materiaaleista alhaisin. LNG-sovelluksissa näitä materiaaleja käytetään putkistoissa ja varastointitankeissa. (Park et al. 2011) Nesteytettynä maakaasua voidaan kuljettaa merkittävästi enemmän pienemmällä tilavuudella verrattuna maakaasuun, joka on kaasumaisessa olomuodossa. Nesteytettyä maakaasua kuljetetaan meriteitse tankkereilla,

jotka on suunniteltu nimenomaan nesteytetyn maakaasun kuljetukseen. Maitse nesteytettyä maakaasua kuljetetaan kuorma-autoilla. Tankkerista nesteytetty maakaasu siirretään nestemäisenä joko suoraan lämpökäsittelyyn tai kuorma-autoihin, joilla maakaasu kuljetetaan jatkokäsittelyyn. (Mokhatab et al. 2014, s. 12–23) Tankkerin ja terminaalivaraston välillä nesteytettyä maakaasua siirretään usein putkilla, joita ohjataan nosturin tavoin. Terminaalien varastosta nesteytettyä maakaasua voidaan siirtää eteenpäin esimerkiksi LNG pumpun avulla. (Mokhatab et al. 2014, s. 31–35) Invar 36:n käytöstä maakaasun sovelluksissa voi olla hyötyä erityisesti sovelluskohteissa, joissa maakaasu on nesteytettyä. Kaikissa edellä mainituissa sovelluksissa maakaasu on nesteytettyä.

Invar 36 ruostumatonta terästä käytetään mittatarkkuutta vaativissa sovelluksissa kuten esimerkiksi korkeusmittareissa ja ajanottolaitteissa (Harrison et al. 2017). Invarin tarkkuussovelluksia ovat myös moottorien venttiilit, antimagneettiset kellot sekä elektronikan komponenteissa (Sproule 1990; Yan 2013). Näiden tarkkuussovellusten lisäksi Invaria käytetään tarkkuuslasereissa, optisissa mittalaitteissa, mikroskoopeissa sekä teleskooppien tukijärjestelmissä (Wassermann 1991; Yan 2013). Invaria voidaan käyttää myös tarkoissa lasin ja metallin välisissä sovituksissa.

Yhdysvaltalainen yritys Gen-El-Mec on valmistanut Invar-ruostumattomasta teräksestä kotelon puolijohdeteollisuuteen. Kotelo on valmistettu CNC- sekä lankakipinätyöskoneella (wire-cut electrical discharged machine, WEDM). Tässä tapauksessa Invar oli valittu materiaaliksi hyvän mittapysyvyyden ansiosta muuttuvissa lämpötiloissa. Kotelon toimitusaika on ollut 10 viikkoa. (Gen-El-Mec)



Kuva 1 Gen-El-Mecin Invarista valmistama kotelo (69,4 mm, 80,9 mm, 169,3 mm) puolijohdeteollisuuteen (Gen-El-Mecin).

4.1.2 CuNi2SiCr-kupariseos

CuNi2SiCr-kupariseoksella on puhtaaseen kupariin nähden korkeampi lujuus sekä sitkeys, joten sitä käytetään kuparin kaltaisissa sovelluksissa. CuNi2SiCr:a käytetään sovelluksiin, jotka vastaavat kuparin sovelluksia mutta vaativat suurempaa jäykkyyttä ja korroosionkestävyyttä tai kohteissa, joissa tarvitaan hyvää sähkön- ja lämmönjohtavuutta. Kirjallisuudesta löytyy hyvin vähän sovelluskohteita suoraan CuNi2SiCr:lle, mutta työssä selvitetään sovelluskohteita kuparille sekä muille kupariseoksille. Kupari-nikkeli-seoksia käytetään merivesi sovelluksissa esimerkiksi putkistoissa, lämmönvaihtimissa sekä lauhduttimissa ja hydrauliputkissa.

Induktiokarkaisulla tarkoitetaan työstettävän kappaleen lämpökäsittelyä sen mekaanisten ominaisuuksien parantamiseksi. Tyypillisesti induktiokarkaisua tehdään esimerkiksi hammaspyörien laakereille tai akseleille. Induktiokarkaisun avulla työstettävästä kappaleesta voidaan käsitellä ainoastaan pinta, joka mahdollistaa erilaiset ominaisuudet kappaleen pinnalle ja sisäosalle. Kappaleen pinnalle saadaan lämpökäsittelyn avulla parempi kulumisenkesto ja silloin kappaleen sisäosan mekaaniset ominaisuudet pysyvät samoina. Induktiokarkaisulla voidaan säästää myös energiaa tilanteissa, joissa koko työstettävän kappaleen lämpökäsittely ei ole tarpeellista. (Haimbaugh 2015, s. 6–7) Induktiokarkaisussa materiaalina käytetään kuparia hyvän sähkönjohtavuuden ja kohtuullisen halvan hinnan ansiosta. Pieni- ja keskitehoiset induktiokäämit ovat valmistettu kaupallisesta kuparista ja suuritehoisissa käytetään suurjohtokuparia, jota kutsutaan myös hapettomaksi kupariksi (Oxygen-free copper, OFHC). Induktiokarkaisussa käämin jäähdytys on tärkeää tehohäviöiden minimoimisen ja ylikuumenemisen kannalta. Induktiokäämejä jäähdytetään virtaavalla vedellä ja se on tuonut haasteita käämien suunnitteluun. Sisäisten virtauskanavien suunnittelu siten, että virtaus olisi mahdollisimman tehokasta, voi olla haastavaa. Kelan sisällä virtaavan jäähdytysveden ollessa liian vähäistä, niin silloin itse käämi voi alkaa sulaa tai liitokset voivat rikkoutua liian suuren lämpötilan takia. Kelan suunnittelussa tärkeää on, että sen muoto vastaa lämmitettävän kappaleen muotoa mahdollisimman tarkasti ja kela pyritään saamaan mahdollisimman lähelle kappaletta. Käämin hyötysuhde on sitä suurempi mitä, lähemmäs se on kytketty työstettävään kappaleeseen. (Haimbaugh 2015, s. 317–319)

Lämmönvaihtimet ovat elementtejä, jotka siirtävät lämpöenergiaa kahden materiaalin välillä. Lämmönvaihtimilla voidaan siirtää lämpöä fluidien avulla pois nesteistä, kiinteistä materiaaleista tai kaasuista. Virtaavia aineita eli fluideja ovat nesteet, kaasut ja plasmät. Lämmönvaihtimessa ideaalitalanteessa fluidit eivät sekoitu keskenään vaan lämpöener-

giat siirtyvät lämmönvaihtimen rakenteen välityksellä materiaalista toiseen. Lämmönvaihtimia käytetään laajasti teollisuudessa ja niiden sovelluskohteita löytyy ainakin prosessi-, sähkö-, öljy-, kuljetus-, ilmastointi-, jäähdytys-, kryogeniikka-, lämmöntalteenotto- ja vaihtoehtoisten polttoaineiden teollisuudesta. Lämmönvaihtimet jaetaan karkeasti neljään osa-alueeseen: putki-, levy-, laajennetun pinnan lämmönvaihtimiin ja regeneraattoreihin. Regeneraattorissa lämpöenergiaa siirretään fluidista sykleittäin varastointiväliaineeseen, jossa lämpöä voidaan ottaa talteen. (Thulukkanam 2013) Lämmönvaihtimen suunnittelussa pitää ottaa huomioon massavirta, nestevirtojen tulolämpötilat ja -paineet, vaadittu lämmönsiirtoteho, suurimmat sallitut paine-erot (tuloputken ja lähtöputken välillä), korroosion-/eroosiokestävyys, koko, paino, materiaali ja hinta. Suunnittelussa joudutaan usein tekemään kompromisseja vaatimusten ja toteutuksen välillä. (Shah et al. 2003, s. 78–83) Materiaalin valinta on olennainen osa lämmönvaihtimen rakennusprosessia ja se valitaan aina vaatimusten mukaan. Kuperiseoksia käytetään lämmönvaihtimissa, jotka ovat kosketuksissa makean-, meri- tai murtoveden kanssa. (Shah et al. 2003, s. 678) Lämmönvaihtimissa käytetään paljon muitakin metalliseoksia kuten esimerkiksi super-duplex-ruostumatonta terästä suolan, kaasun tai öljyn kanssa kosketuksissa olevissa lämmönvaihtimissa.

Vastushitsauksella tarkoitetaan prosessia, jossa sähkövirtaa johdetaan hitsausvarsia (elektrodeja) pitkin metalliin, jonka seurauksena hitsattava metalli sulaa. Suurin vastushitsauksen muoto on pistehitsaus (Resistance spot welding, RSW), jossa on kaksi suoraa elektrodia ja joiden väliin syntyy pistemäinen hitsaussauma. Elektrodeja voidaan joissain tapauksissa jäähdyttää vedellä sisäisten kanavien avulla. Vastushitsausta käytetään paljon auto- ja ilmailuteollisuudessa ja niiden lisäksi myös muualla teollisuudessa. (American Welding Society) Vastushitsauksessa elektrodeissa käytetään usein kupariseoksia, sillä niillä on puhtaaseen kupariin nähden korkeampi mekaaninen lujuus, jota tarvitaan elektrodeissa. Elektrodien tärkeimpiä tehtäviä ovat sähköjohtaminen, lämmön siirtäminen työstettävästä kappaleesta ja paineen kohdistaminen hitsausliitokseen. Vastushitsauksen käytetyimmät elektrodin materiaalit ovat CuCr-, CuCrZr-, CuZr-kupariseoksia sekä dispersiovahvistettua kuparia (Dispersion Strengthened Copper, DSC). (Zhang 2011, s. 27–28)

Kupariseoksia voidaan käyttää antibakteerisena pintana viruksia ja bakteereja vastaan. Michelsin mukaan kupariseoksella (C21000), jossa on 95 % kuparia, on hyvät ominaisuudet viruksia ja bakteereja vastaan. C21000-kupariseoksella kuparipitoisuus on samaa luokkaa kuin CuNi2SiCr-kupariseoksella, joten ainakin kuparipitoisuuden ansiosta CuiNi2SiCr-seos voisi sopia antibakteeriseksi aineeksi. Antibakteerisia kupariseoksia

käytetään esimerkiksi julkisissa tiloissa, joissa liikkuu paljon ihmisiä. Antibakteerisia kupariseoksia voidaan käyttää esimerkiksi hanoissa, ovenkahvoissa, hissien painikkeissa tai kaiteissa. Kupariseosten käyttö antibakteerisina pintoina ei rajoitu ainoastaan Covid-19-virukseen, vaan niitä voidaan käyttää myös esimerkiksi norovirusta tai monia muita viruksia ja bakteereja vastaan. (Michels 2020)

4.1.3 Osprey[®] 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs

Osprey 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs kuuluu kirjallisuudessa yleisesti esiintyvään super-duplex ruostumattomaan teräs ryhmään ja on kemialliselta koostumukseltaan verrattavissa esimerkiksi SAF 2507 super-duplex ruostumattomaan teräkseen, joka on myös Sandvikin valmistama mutta suunniteltu putkimateriaaliksi. Erilaisilla duplex ruostumattomilla teräksillä erityisesti korroosiokestävyys vaihtelee, joten se määrittää materiaalin soveltuvuuden korroosionkestävyyttä vaativiin käyttökohteisiin. Super-duplex:illa on muihin duplex-teräksiin nähden parempi korroosionkestävyys. Tässä osiossa olen tutkinut sovelluskohteita yleisesti duplex ruostumattomille teräksille sekä myös tarkemmin super-duplex ruostumattomille teräksille.

Duplex ruostumattomat teräkset sopivat korroosio kestävyydeltään syövyttävien yhdisteiden kanssa tekemisissä oleviin komponentteihin kuten esimerkiksi happojen, suolaveden, meriveden ja murtoveden. Duplex ruostumattomia teräksiä voidaan käyttää myös kemian, kaasu ja öljyteollisuudessa. Näissä käyttökohteissa duplex ruostumaton teräs soveltuu erityisen putkistoihin sekä varastosäiliöihin. Suuren mekaanisen lujuuden ansiosta rakenteita voidaan tehdä kevyempiä verrattuna austeniittiseen ruostumattomaan teräkseen. (Olsson et al. 2007) Myös betonirakenteiden raudoituksessa käytetään duplex ruostumattomia teräksiä (Charles 2008) ja erityisesti betonirakenteissa, jotka ovat alttiita korroosiolle kuten esimerkiksi silloissa ja rannikko-olosuhteissa (Gunn 2003, s. 184).

Taulukko 7 Super-duplexin sovelluskohteita teollisuusaloittain (Gunn 2003, s. 176).

Kemianteollisuus	Suolan haihtumisputket, pumpput, amiinilaitteet ja merivesi jäähdytysjärjestelmät
Petrokemia-teollisuus	Letkut ja putket, jotka kosketuksissa kloridin (Cl ⁻) ja vetykloridin (HCl) kanssa.
Sellu- ja paperiteollisuus	Valkaisulaitteet

Sähköntuotanto	Lämmönvaihtimet, järjestelmät maalämpökaivoissa, merivesi jäähdytysjärjestelmät
Öljy- ja kaasuteollisuus	Lämmönvaihtimet, geotermiset järjestelmät, merivesi jäähdytysjärjestelmät, palonsammutusjärjestelmät, pumput, paineastiat, venttiilit, öljynporaus letkut sekä prosessiputkistot ja -astiat.

Taulukossa 7 mainitut amiinit ovat yhdisteitä, jotka ovat ammoniakkin (NH_3) johdannaisia ja, joita käytetään paljon kemianteollisuudessa (Shi et al. 2018). Taulukosta 7 voidaan myös nähdä super-duplex-teräksen monipuolisuus ja käyttö monenlaisilla teollisuudenaloilla.

Sellu- ja paperiteollisuudessa on taulukon 7 lisäksi paljon muitakin sovelluskohteita kuten kemitermomekaaninen massanvalmistus (Chemi-thermomechanical pulping. CTMP), massan varastosäiliöt ja paperikoneiden osat. Sähköntuotannossa duplex-teräksiä on käytetty FGD-järjestelmissä (flue-gas desulfurization, savukaasujen rikinpoisto), joissa poistetaan rikki (SO_2) kaasusta, joka sisältää kalkkia ja vedestä, joka sisältää kalkkikiveä. Öljy- ja kaasuteollisuudessa duplex-teräksiä on käytetty pumpuissa, kompressoreissa, pumppujen osissa, venttiileissä ja kaikissa suurta mekaanista lujuutta vaativissa kohteissa kuten korkeapaineistetut järjestelmät. Meriliikenteessä kemiallisia aineita kuljettavien säiliöalusten rakennusmateriaalina on aikaisemmin käytetty austeniittisia ruostumattomia teräksiä mutta 1980-luvun alussa duplex ruostumattomista teräksistä tuli austeniittisten ruostumattomien terästen korvaaja. Tämän seurauksena säiliöjärjestelmän painossa säästettiin 10 %. Meriteollisuudessa duplex-teräksiä käytetään myös potkuriakseleissa, ohjauspotkureissa sekä vesisuihkuturbiineissa, sillä näihin osiin kohdistuu suuri mekaaninen kuormitus. Super-duplex ruostumattomia teräksiä on käytetty myös pumpuissa, jotka käsittelevät $80\text{ }^\circ\text{C}$:sta kaliumkarbonaattia sekä Bayerin-prosessissa, jossa käsitellään kuumaa bauksiittia sekä titaanioksidijalostamon putkistoissa, joissa kulkee vetykloridia (HCl). Bayer-prosessi on osa alumiinijalostus prosessia. Matalaseosteisempia duplex-teräksiä on käytetty elintarviketeollisuudessa vedenlämmittimissä, lämpölaitteissa sekä kuumavesitankeissa. Duplex-teräkset soveltuvat myös esimerkiksi jalostamoiden lämmönvaihtimiin, joissa kulkee hapetonta vettä tai öljyn ja veden sekoitusta. (Gunn 2003, s. 175–184)

Öljy- ja kaasuteollisuudessa super-duplex ruostumattomia teräksiä käytetään esimerkiksi putkilinjoissa sekä jakotukeissa. Merellä sovelluksia ovat esimerkiksi merivettä

käyttävät palontorjuntajärjestelmät. (Olsson 2007) Lisäksi sovelluskohteita löytyy suolanpoistolaitoksista. Super-duplexia voidaan käyttää esimerkiksi pumppujen siipipyörissä tai akseleissa. Se on myös parempi vaihtoehto austeniittiselle ruostumattomalle teräkselle, sillä kustannuksissa säästetään tinkimättä kuitenkaan materiaalin lujuudessa. (Vinoth Jebaraj 2017)

4.2 Sovellukset metallin 3D-tulostamiseen

Kaikkien tutkittavien metalliseosten osalta kirjallisuudesta löytyy 3D-tulostettuja sovelluksia. Kaikissa löydettyissä sovelluskohteissa on jollakin tavalla pystytty hyödyntämään metallin 3D-tulostamisen etuja. Metalliseokset ovat kohtuullisen uusia 3D-tulostusmarkkinoilla, joten ainakaan Invar-teräksen ja super-duplexin osalta 3D-tulostettuja osia ei kauheasti löydy. Kuparista tulostettuja tuotteita taas löytyy reilusti enemmän ja myös muutamalta eri sovellusalueelta. Tällä hetkellä on siis tärkeää pyrkiä löytämään mahdollisimman hyvin 3D-tulostamiseen soveltuvia kohteita.

4.2.1 Olemassa olevat sovellukset

Tällä hetkellä 3DStep Oy:n hankkeen lisäksi Suomessa muilla metallin 3D-tulostus palveluita tarjoavilla yrityksillä ei ole materiaalivalikoimassaan Invar-terästä. Invar-teräksen soveltuvuutta metallin 3D-tulostamiseen on kuitenkin tutkittu jo jonkin verran.



Kuva 2 Euroopan avaruusjärjestön ESA:n projektissa Invar-teräksestä 3D-tulostettu komponentti (ESA).

Invar -teräksellä on hyvä mekaaninen lujuus sekä mittapysyvyys matalissakin lämpötiloissa, joten sen takia sitä käytetään avarusteollisuudessa. Kuvan 2 esimerkissä 3D-tulostamalla on kappaleesta pystytty valmistamaan yksi yhtenäinen kokonaisuus ilman

hitsausaumoja. Avaruusteollisuudessa myös kappaleiden painoa voidaan vähentää käyttämällä 3D-tulostinta.

Erilaisten kupariseosten osalta kirjallisuudesta löytyy ainakin 3D-tulostettuja lämmönvaihtimia, induktiokarkaisuun käämejä sekä hitsaukseen tarkoitettuja elektrodeja. Tällä hetkellä CuNi2SiCr-kupariseoksen lisäksi on mahdollista tulostaa muitakin kupariseoksia esimerkiksi EOS:in toimittamaa CuCrZr-kupariseosta.



Kuva 3 Kupariseostetusta CuNi2SiCr 3D-tulostettu jäähdytysriipi. (Protolabs)

Protolabs on ottanut Ruotsin tuotantolaitoksella materiaalivalikoimaansa kupariseostetun CuNi2SiCr:n ja he ovat valmistaneet jäähdytysriipiin kyseisestä materiaalista. Tämän jäähdytysriipiin muoto niinkään ole kovin monimutkainen mutta se on haastava koneistettava ainakin ripojen päissä olevien reikien takia.



Kuva 4 EOS:in CuCrZr -kupariseoksesta sekä tulostettu lämmönvaihdin. (Delva Oy)

Suomalaisen Delva Oy:n CuCrZr -kupariseoksesta 3D-tulostamalla valmistettu lämmönvaihdin. Delva Oy käyttää eurooppalaisen EOS:in valmistamia laitteita ja materiaaleja. Tässä tapauksessa käytetyllä kupariseoksella on korkeampi sähkönjohtavuus mutta matalampi vetolujuus sekä myötöraja kuin CuNi2SiCr -kupariseoksella. Tämä esimerkki tuo hyvin esille metallin 3D-tulostamisen suunnittelun vapauden, sillä siitä löytyy monenlaisia sisäisiä kanavia. Sisäiset kanavat ovat kierteellä suhteessa kappaleen keskukseen, joten tämän kaltaiseen lopputulokseen pääseminen CNC-jyrsimellä valmistettaessa olisi mahdotonta.



Kuva 5 GKN:n 3D-tulostama induktiokäämi induktiokarkaisuun (GNK).

GKN on valmistanut induktiokäämin induktiokarkaisuun. Käämi on tulostettu CuCr1Zr-kupariseosta, jolla sähkönjohtavuus on 90 % IACS (International Annealed Copper Standard). Tässä työssä tutkittavan CuNi2SiCr-kupariseoksen sähkönjohtavuus lämpökäsiteltynä on 40 % IACS, joka on jonkin verran vähemmän kuin GKN:n käyttämällä kupariseoksella. Tulostetussa kappaleessa on haastava geometria erityisesti sisäisten jäähdytyskanavien takia. Tässä tapauksessa koneistamalla käämi olisi valmistettu kymmenestä eri osasta, jotka olisi lopuksi juotettu yhteen. 3D-tulostettu käämi häiritsee magneettikenttää vähemmän koska siinä ei ole hitsausaumoja. (GKN)



Kuva 6 Markforged yrityksen kuparista 3D-tulostama elektrodi hitsaukseen. (Markforged)

Markforgedin käyttämä kupari on 99.8 % puhdasta kuparia, joten sen sähkön- ja lämmönjohtokyky on parempi kuin CuNi2SiCr -kupariseoksella. CuNi2SiCr -kupariseoksella on toisaalta merkittävästi suurempi vetolujuus ja myötöraja. Markforgedin metallin 3D-tulostusjärjestelmä on myös hyvin erilainen mitä esimerkiksi 3DStep käyttää. CuNi2SiCr -kupariseoksella voisi olla käyttöä tämän kaltaisissa sovelluksissa, sillä hitauselektrodeissa käytetään puhtaan kuparin lisäksi myös kupariseoksia.



Kuva 7 Eureka Pumps AS:n suunnittelema pumpun siipipyörä. (Sandvik 13.11.2020)

Eureka Pumps AS on yritys, joka valmistaa pumppuja ja generaattoreita öljy-, kaasu, ja meriteollisuuteen. Eureka Pumps AS:n tarpeisiin suunniteltiin uusi siipipyörä, joka valmistettiin metallin 3D-tulostimella käyttäen Osprey® 2507 Super-duplex ruostumatonta terästä. Tämän siipipyörän kohdalla 3D-tulostuksen tuoma etu on ollut se, että siipipyörän sisälle on pystytty tekemään onttoja siipipyörää keventäviä rakenteita. Siipipyörästä, jonka avulla järjestelmään luodaan painetta, saatiin materiaalivalinnan ja 3D-tulostamisen avulla nopeampi, kevyempi ja kustannustehokkaampi. (Sandvik 13.11.2020) Mitä kevyemmin siipipyörää saadaan pyöritettyä, sitä enemmän se säästää energiaa.

4.2.2 Uudet mahdollisuudet

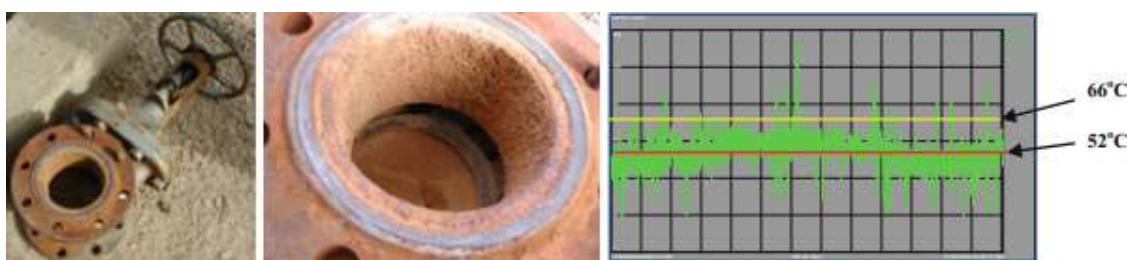
Turbiinigeneraattorin öljyn lauhduttimessa öljyä, jonka lämpötila on 50–70 °C, lauhdutaan vedellä, jonka lämpötilan on 30–35 °C. Lauhduttimen putket olivat aikaisemmin valmistettu kupari ja nikkeli seostetusta CuNi10Fe1Mn:stä, putkilevyt kupari seostetusta CuZn38Sn1:stä ja kannet, jäähdytysosat sekä vedenottoaukko alumiini seostetusta AlSi9Mg:stä.

Tämän öljylauhduttimen tapauksessa korroosio on johtunut MIC:stä (Microbiologically influenced corrosion, mikrobiologisesti vaikuttava korroosio) ja alumiiniosien galvaanisesta korroosiosta. Groysmanin mukaan tähän ongelmaan ratkaisu voisi olla putki- ja putkitukimateriaalin vaihtaminen kuparinikkeli seokseen CDA 706 tai Admiralty messinkiin CDA 443. (Groysman 2017, s.190–191) Tämänkaltaisiin sovelluksiin vaihtoehtoiseksi materiaaliksi voisi sopia kupariseostettu Cu2Ni2SiCr tai Osprey® 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs. Molemmilla korroosionkestävyys on hyvä. Tämänkaltaisissa sovelluksissa metallin 3D-tulostamisesta voisi olla hyötyä esimerkiksi virtauksien optimoinnissa, painon pienentämisessä tai kokoonpanon osien määrän vähentämisessä.



Kuva 8 Öljynlauhdutin, joka on rakennettu osista ja 3 eri materiaalista. (Groysman 2017 s. 191)

Seuraavan esimerkin venttiilin läpi on virrannut vetykaasua, johon on ollut sekoittuneena typpeä, hiilivetyjä ja hiukan vetykloridia. Venttiilin rakennusmateriaali on aikaisemmin ollut hiiliteräs, jonka syöpyminen voidaan nähdä alla olevasta kuvasta. (Goysman 2017, s. 143–144)



Kuva 9 Hiiliteräksestä valmistetun kaasuventtiilin syöpyminen. (Groysman 2017, s. 144)

Kuvan 9 käyrä tarkoittaa venttiilin kulkeneen kaasun lämpötilaa ja siinä punainen viiva on keskilämpötila 44–58 °C. Keltainen viiva tarkoittaa vaadittua minimilämpötilaa, joka on 66 °C. Groysmanin mukaan tähän tapaukseen korjaustoimenpiteeksi tulisi vaihtaa hiiliteräksestä valmistettu venttiili SAF 2205 duplex ruostumattomasta teräksestä valmistettuun venttiiliin. (Goysman 2017, s. 143–144) Myös 2507 super-duplex ruostumaton voisi sopia tämän kaltaiseen sovellukseen. 2507 super-duplexin PREN-luku on suurempi kuin SAF 2205:n ja lujuusominaisuudet lähes samansuuruiset. Edellä mainitun esimerkin

osalta metallin 3D-tulostus ei välttämättä ole paras mahdollinen valmistusmenetelmä. Tämä oli lähinnä esimerkki mahdollisesta käyttöalueesta 2507 super-duplex ruostumattomalle teräkselle.

4.3 3D-tulostuksen tuoma lisäarvo

Tässä kappaleessa pohditaan yleisesti metallin 3D-tulostamisen tuotteille tuomaa lisäarvoa sekä pyritään löytämään tutkittavien metalliseosten sovelluskohteista mahdollisia metallin 3D-tulostamiseen soveltuvia käyttökohteita. Kappaleessa 4 sovelluskohteet on käyty läpi yleisesti ottamatta sen enempää kantaa metallin 3D-tulostamisen soveltuvuuteen mainituissa sovelluskohteissa. 3D-tulostamisen tuomaa lisäarvoa voidaan pohtia esimerkiksi vertailemalla 3D-tulostamista CNC-koneeseen. Jotta tuote kannattaa valmistaa metallin 3D-tulostimella, eikä esimerkiksi CNC-koneella, pitää ottaa huomioon monenlaisia asioita, ja tuotteen valmistusta pitää miettiä kokonaisuutena tuotteen suunnittelusta valmiiseen tuotteeseen. CNC-koneen työstönopeus voi olla metallin 3D-tulostina nopeampi, mutta toisaalta CNC-koneella valmistettavan osan suunnittelu voi viedä merkittävästi enemmän aikaa kuin 3D-tulostimella valmistettavan. Osia ei myöskään välttämättä saada valmiiksi vain pelkkää CNC-työstökoneita käyttämällä, jolloin valmistettavaa osaa joudutaan kuljettamaan koneelta toiselle. Jos CNC-koneella valmistetaan tuote, joka koostuu useammasta osasta, niin silloin osat joudutaan tekemään omina kokonaisuuksinaan, jonka jälkeen osat pitää vielä yhdistää. Metallin 3D-tulostimella valmistettu tuote voidaan parhaimmillaan valmistaa vain yhdestä osasta, joka taas säästää aikaa verrattuna CNC-koneeseen. 3D-tulostuksen hyöty on yleensä sitä suurempi mitä monimutkaisempi geometria osalla on. (Gibson et al. 2015, s.10–12)

Invar 36:n osalta 3D-tulostettavia sovelluskohteita voisi olla ainakin geometrisesti monimutkaiset ja suurta tarkkuutta vaativat komposiittimuotit, jotka voidaan 3D-tulostimella valmistaa nopeammin. Nesteytetyn maakaasun osalta metallin 3D-tulostimella voisi valmistaa esimerkiksi monimutkaisia putkihaaroja, venttiilejä, venttiilien osia tai pumppujen osia.

Geometrialtaan monimutkaiset ja tiettyä tarkoitusta valmistetut lämmönvaihtimet ovat CuNi2SiCr-kupariseoksen suuri sovelluskohde, joihin 3D-tulostinta voisi käyttää ja siitä voisi olla paljon hyötyä. 3D-tulostimen avulla lämmönvaihtimissa voidaan optimoida lämmönsiirto sekä virtaukset. Induktiokarkaisussa tärkeää on käämin jäähdytys karkaisun aikana ja se toteutetaan hyvin usein vedellä. Jäähdytyskanavien valmistaminen optimoidulla virtauksella on huomattavasti helpompaa metallin 3D-tulostimella. Myös vas-tushitsauksessa käytettäviä elektrodeja joudutaan jäähdyttämään hitsauksen aikana ja usein se toteutetaan induktiokäämin tavoin sisäisillä kanavilla, jossa virtaa esimerkiksi

vettä. CuNi2SiCr:n suuren lujuuden ansiosta monista valmistettavista tuotteista voidaan valmistaa entistä kevyempiä verrattuna puhtaaseen kupariin tai kupariseoksiin, joilla on alhaisempi mekaaninen lujuus ja suorituskykyä voidaan parantaa 3D-tulostimen avulla. Metallin 3D-tulostimen avulla osaan ei tule hitausaumoja, mikä on hyvä asia esimerkiksi sovelluskohteissa, joissa vaaditaan hyvää sähkö- ja lämmönjohtamiskykyä.

Super-duplexia käyttämällä voidaan valmistaa austeniittiseen ruostumattomaan teräkseen verrattuna kevyempiä rakenteita, jossa voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi topologista optimointia, jossa tietokone laskee vaadittavan rakenteen geometrian. Topologisesti optimoidut rakenteet ovat usein geometrialtaan hyvin monimutkaisia, joten ne täytyy valmistaa metallin 3D-tulostimella. Tämän kaltaisia sovelluskohteita metallin 3D-tulostimen käytölle voisi löytyä paljon. Super-duplex-terästä käytetään myös lämmönvaihtimissa, joten myös niiden valmistuksessa 3D-tulostamisesta on hyötyä. Siipipyöriä käytetään laajasti monilla teollisuudenaloilla, joten kuvan 7 esimerkin lisäksi mahdollisia kohteita voisi löytyä paljonkin. Suomessa esimerkiksi Oy Grundfos Pumput Ab rakentaa pumppuja sekä putkistoja hyvin monenlaisille teollisuudenaloille.

5. MATERIAALIEN KÄYTTÖ TULEVAISUUDESSA

Metallin 3D-tulostamisen tulevaisuudessa ei pelkästään keksitä uusia 3D-tulostamiseen soveltuvia käyttökohteita vaan myös jo olemassa olevia sovelluskohteita voidaan suunnitella uusiksi. Tuotetta ei tarvitse suunnitella sen mukaa, miten se tulisi valmistaa vaan voidaan enemmän keskittyä osien toiminnallisuuksien parantamiseen. Valmistettavia tuotteita voidaan räätälöidä yhä helpommin yritysten tarpeisiin. (Gibson et al. 2015, s.40)

Tällä hetkellä tutkittaville metalliseoksille löytyy jo hyvin monenlaisia sovelluskohteita. Sovelluskohteista on analysoitava ne käyttöalueet ja yksittäiset osat, joissa 3D-tulostimen käytöstä on hyötyä. Jatkuvan tutkimuksen myötä 3D-tulostukseen soveltuvia kohteita löytyy lisää ja sitä mukaa myös tässä työssä tutkittavien metalliseosten kysyntä kasvaa 3D-tulostusmarkkinoilla.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli löytää metallin 3D-tulostamiseen soveltuvia käyttökohteita Invar 36-teräkselle, CuNi2SiCr-kupariseokselle sekä Osprey 2507-AM super-duplex ruostumattomalle teräkselle. Työn alussa on käsitelty metalliseosten kemialliset koostumukset sekä niiden ominaisuudet. Invar 36 on raudasta ja nikkelistä koostuva seos, jossa on 64 w% rautaa ja 36 w% nikkeliä. Invar 36:n hyvä ominaisuus on sen erittäin pieni lämpölaajenemiskerroin, joka on 0 ja 300 °C välillä vain noin $3,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. (Qui et al. 2016 s. 389–390) CuNi2SiCr-kupariseos koostuu pääosin kuparista, nikkelistä, piistä ja kromista. Seoksessa on kuparia yhteensä noin 95–97 w%. CuNi2SiCr-kupariseoksen ominaisuus hyvän lämmön- ja sähkönjohtavuuden lisäksi on hyvät mekaaniset lujuusominaisuudet sekä hyvä korroosionkestävyys. Lujuus ominaisuudet ovat lämpökäsiteltynä verrattavissa tulostettavaan 316L haponkestävään ruostumattomaan teräkseen. (SLM Solution, 316L ruostumaton teräs) Osprey 2507-AM super-duplex ruostumaton teräs koostuu pääosin raudasta, kromista 25 w%, nikkelistä 7 w% sekä molybdeenistä 4 w% (Sandvik, Osprey) Super-duplexillä on hyvä korroosionkestävyys erityisesti kloridin aiheuttamaa pistekorroosiota vastaa (Mudali, 2017). Super-duplexilla on myös hyvät mekaaniset lujuus ominaisuudet, jotka ovat paremmat kuin austeniittisellä ruostumattomalla teräksellä.

Kaikille metalliseoksille löytyi hyvin yleisiä sovelluskohteita. Invar-teräksen sovelluskohteita ovat tarkkuusinstrumentit kuten esimerkiksi optiikka- ja laserjärjestelmät, komposiittimuotit sekä nesteytetyn maakaasun kanssa kosketuksissa olevat putkistot, venttiilit ja astiat. (Campbell 2010, s. 18–29; Park et al. 2011; Wassermann 1991; Yan 2013) CuNi2SiCr-kupariseoksen osalta tutkittiin yleisesti kuparin sovelluksia ja sovelluksia, joissa on käytössä erilaisia kupariseoksia. Kuparin osalta sovelluskohteita ovat lämmönvaihtimet, käämit induktiokarkaisuun, vastushitsauksen elektrodit sekä käyttö antibakteerisena pintana (Haimbaugh 2015, s. 317–319; Shah et al., 2003, s. 678; Michels 2020; Zhang 2011, s. 27–28). Super-duplexin sovelluskohteista tutkittiin sovelluskohteita, jotka soveltuvat super-duplex ruostumattomalle teräkselle ja sen lisäksi tutkittiin sovelluskohteita duplex ruostumattomalle teräkselle. Duplex ruostumattoman teräksen sovelluskohteita löytyi laajasti monelta teollisuudenalalta. Super-duplex-teräksiä käytetään ainakin kemian-, petrokemian-, sellu-, paperi-, öljy-, ja kaasuteollisuudessa sekä sähköntuotannon prosesseissa. Näissä sovelluksissa duplex-teräksestä on tyypillisesti valmistettu putkistoja, venttiilejä ja pumppujen osia (Gunn 2003, s. 176). Super-duplex teräksiä käytetään myös meriolosuhteissa sekä suolanpoistolaitoksissa, joissa super-duplexista voidaan valmistaa esimerkiksi pumppujen siipipyöriä (Olsson et al., 2007).

Metallin 3D-tulostamiseen soveltuvia käyttökohteita löytyi kohtuullisesti. Soveltuvuutta 3D-tulostamiseen pyrittiin arvioimaan esimerkiksi geometrian monimutkaisuuden ja tuotteen painon vähentämistarpeen avulla. Invar-teräksen tarkemmin analysoituja 3D-tulostukseen soveltuvia käyttökohteita ei juurikaan löytynyt. Käyttökohteita voivat mahdollisesti olla nesteytetyn maakaasun kuljetukseen ja varastointiin valmistettavat monimutkaiset putkistot ja venttiilit. Eniten mahdollisia 3D-tulostuksen sovelluskohteita löytyi kuparille. 3D-tulostamisesta on hyötyä ainakin kuparista valmistettavissa lämmönvaihtimissa (kuva 4), induktiokarkaisun käämeissä (kuva 5) sekä vastushitsauksen elektrodeissa (kuva 6), joissa kaikissa on sisäisiä jäähdytyskanavia. Super-duplex-teräkselle löytyi paljon sovelluskohteita mutta ei kauheasti metallin 3D-tulostamiseen suoraan soveltuvia. Sovelluskohteiksi löytyi 3D-tulostamalla valmistettu siipipyörä (kuva 7), jossa onnistuttiin säästämään painoa 3D-tulostamisen avulla. Muita mahdollisia 3D-tulostamiseen soveltuvia kohteita voisi löytyä austeniittisestä teräksestä valmistetuista osista, joissa voitaisiin vähentää painoa käyttämällä 3D-tulostinta ja materiaalina super-duplexia, kuitenkin vähentämättä lujuutta (Vinoth Jebaraj 2017).

Tässä työssä saatiin selville perustiedot tutkittavien kolmen metalliseoksen käyttökohteista ja jonkin verran 3D-tulostamiseen soveltuvia. Yleiset sovelluskohteet ovat pääosin teollisuuden aloilta, joita löytyy Pohjoismaista. Alkuperäinen tavoite oli tutkia mahdollisia markkinoita Suomessa ja mahdollisesti Ruotsissa ja Norjassa. Työssä ei käsitelty tarkemmin selville saatujen 3D-sovelluskohteiden markkina-alueita. Löydetyistä 3D-tulostamiseen soveltuvista kohteista voidaan kuitenkin löytää markkinoita myös Suomesta.

LÄHTEET

American Welding Society, American Welding Society sponsorina, Verkkosivu, Saatavana (Viitattu 29.11.2020) <https://www.aws.org/rwma/page/resistance-welding#:~:text=Resistance%20welding%20is%20the%20joining,this%20process%20extremely%20cost%20effective.>

Andrea Malambri, Sandvik e BEAMIT: nuovi orizzonti della produzione additive, Meccanica news, <https://www.meccanicanews.com/2020/01/14/sandvik-e-beamit-produzione-additiva-con-polveri-e-componenti-metallici-rivoluzionari/> (Viitattu 12.11.2020)

Campbell, F.C., 2010. Structural Composite Materials. Materials Park, Ohio: ASM International., <https://web-a-ebSCOhost-com.lib-proxy.tuni.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fMzk1OTlwX19BTg2?sid=bddb2994-95fe-40b9-a1ca-b604e89c0c7b@sdc-v-sessmgr01&vid=0&format=EB&rid=1> (Viitattu, 5.11.2020)

David L. Grimmer et al, 1993. A Comparison of DC and Pulsed Fe-Ni Alloy Deposits. The Electrochemical Society, **140** 973, <https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2056238>

EOS, EOS Gmdh sponsorina, verkkosivu. Saatavissa (Viitattu 10.12.2020): https://www.eos.info/03_system-related-assets/material-related-contents/metal-materials-and-examples/metal-material-datasheet/copper/material_datasheet_eos_copper_cucr_zr_core_en.pdf

Gen-El-Mec, Gen-El-Mec Associates Inc. sponsorina, Verkkosivu, Saatavana (Viitattu 25.11.2020) <https://www.gen-el-mec.com/cnc-machining-project-showcase/manufacturing-of-invar-housing-for-the-semiconductor-industry/>

GNK Additive, 2019, Repeatable hardening results in volume production, GNK Powder Metallurgy, Saatavissa: <https://www.gknpm.com/globalassets/downloads/additive-manufacturing/brochures/e-brochure---inductors-and-3d-printing-a-perfect-production-fit.pdf/>, (Viitattu 13.12.2020)

Gunn, R.N., 2003. Duplex stainless steel: Microstructure, properties and applications, Abington publishing, Cambridge England, pp. 172

Gysman, A., (2017. Corrosion problems and solutions in oil refining and petrochemical industry. 1 edn. Cham, Switzerland: Springer., <https://link-springer-com.lib-proxy.tuni.fi/book/10.1007%2F978-3-319-45256-2> (Viitattu 12.11.2020)

Kamachi Mudali, U., 2017. Chapter 3 - Materials for Hostile Corrosive Environments. In: A.K. TYAGI and S. BANERJEE, eds, Materials Under Extreme Conditions. Amsterdam: Elsevier, pp. 91–128.

Markforged, Material Datasheet Copper, <http://static.markforged.com/downloads/copper-data-sheet.pdf>

Markforged, Markforged sponsorina, verkkosivu. Saatavissa (Viitattu 9.12.2020): <https://markforged.com/resources/blog/3d-printed-copper>

Mokhatab, S., Mak, J.Y., Valappil, J.V. and Wood, D.A., 2014. Handbook of Liquefied Natural Gas. Amsterdam: Gulf Professional Publishing., <https://web-b-ebSCOhost-com.lib-proxy.tuni.fi/ehost/ebookviewer/ebook/ZTAwMHh3d19fNDQ1Mjk5X19BTg2?sid=07c5f305-d3ad-4dd0-a9b7-23f7a3194250@pdc-v-sessmgr06&vid=0&format=EB&rid=1>, (Viitattu, 9.11.2020)

Montejo-Garai, J. R., J. A. Ruiz-Cruz and Rebollar, J. M., 2020. Evaluation of Additive Manufacturing Techniques Applied to a Waveguide Mode Transducer. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/9044763/references#references>

Michels, C.A., 2020, Can copper help fight Covid-19, Advanced Materials & Processes

N/A, 2012, ionic bond. Dictionary of Metals. ASM International, pp. 5, saatavissa (Viitattu 19.11.2020): <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt00B0J7E4/dictionary-of-metals/ionic-bond>

“Nickel and its uses.” American Journal of Numismatics, and Bulletin of the American Numismatic and Archaeological Society 27.3 (1893): 60–61. Print

Park, W.S., Chun, M.S., Han, M.S., Kim, M.H. and Lee, J.M., 2011. Comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and offshore structures: Part I—Experimental investigations. Materials Science and Engineering: A, 528(18), pp. 5790–5803., <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092150931100459X>

Qiu, C., Adkins, N.J.E. and Attallah, M.M., 2016. Selective laser melting of Invar 36: Microstructure and properties. Acta Materialia, 103, pp. 382–395. <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1359645415300203?via%3Dihub>

Rajaram M. (2007) Depth To Curie Temperature. In: Gubbins D., Herrero-Bervera E. (eds) Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism. Springer, Dordrecht. https://doi-org.libproxy.tuni.fi/10.1007/978-1-4020-4423-6_66

Sandvik AB, Osprey® 2507-AM Super-duplex for additive manufacturing, <https://www.additive.sandvik/contentassets/648d3e0461d942d08940dcd9fce03795/os-prey-2507-am-super-duplex.pdf>, (Viitattu 1.11.2020)

Shah, Ramesh K. Sekulić, Dušan P., (2003). Fundamentals of Heat Exchanger Design. John Wiley & Sons. Retrieved from, <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpF-HED0004/fundamentals-heat-exchanger/fundamentals-heat-exchanger>

Shek, C.H., Lo, K.H. and Lai, J.K.L., 2012. Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments. Dubai, United Arab Emirates]: Bentham Science Publishers., pp. 52

Shi, F. and Cui, X., 2018. Chapter 4 - N-Alkyl Amine Synthesis by Hydroaminomethylation. In: F. SHI and X. CUI, eds, Catalytic Amination for N-Alkyl Amine Synthesis. Academic Press, pp. 117–138.

SLM Solution Group AG, Materialdatenblatt Cu-Alloy CuNi2SiCr, https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Cu-Alloy_CuNi2SiCr_1909.pdf, (viitattu 1.11.2020)

SLM Solution Group AG, Materialdatenblatt Fe-Alloy Invar 36® / 1.3912, https://www.slm-solutions.com/fileadmin/user_upload/MDS_Fe-Alloy_Invar36_0219.pdf, (Viitattu 1.11.2020)

SLM Solution, SLM Solution Group AG sponsorina, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.11.2020): <https://www.slm-pushing-the-limits.com/>

The Nobel Prize, The Nobel Prize sponsorina, verkkosivu. Saatavissa (viitattu: 1.11.2020): <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1920/summary/>

Yan, L., 2013. Wire and Arc Additive Manufacture (WAAM) reusable tooling investigation, Cranfield University, pp. 22–23

Yang, L., Hsu, K., Baughman, B., Godfrey, D., Medina, F., Menon, M., and Wiener, S., 2017. Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production. Springer, Cham., <https://link-springer-com.lib-proxy.tuni.fi/book/10.1007%2F978-3-319-55128-9#authorsandaffiliationsbook>

Vinogradov, A., Hashimoto, S. and Kopylov, V.I., 2003. Enhanced strength and fatigue life of ultra-fine grain Fe–36Ni Invar alloy. Materials Science and Engineering: A, 355(1), pp. 277–285., <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S0921509303000820>

Vinoth Jebaraj, A., Ajaykumar, L., Deepak, C.R. and Aditya, K.V.V., 2017. Weldability, machinability and surfacing of commercial duplex stainless steel AISI2205 for marine applications – A recent review. Journal of Advanced Research, 8(3), pp. 183–199.

Waurzyniak, P., 2017. All in with additive. Manufacturing Engineering, **159**(3), pp. 85–93.

Wassermann, E.F., 1991. The Invar problem. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 100(1), pp. 346–362., <https://www.sciencedirect-com/science/article/abs/pii/030488539190828X>

Wassermann, E.F., 2001. Invar Materials: Phenomena. In: K.H.J. Buschow, R.W. Cahn, M.C. Flemings, B. Ilshner, E.J. Kramer, S. Mahajan and P. Veyssi re, eds, Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford: Elsevier, pp. 4268–4271. <https://www.sciencedirect-com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/B0080431526007476>

Wong, C.H., Yeong, W.Y. and Chua, C.K., 2017. Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing. San Diego: Elsevier Science & Technology. pp. 3–13, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=4871409>