

Olli Lehtinen

**SUIHKUMOOTTORIN TURBIININ SIIVEK-
KEEN MATERIAALIN KORVAAMINEN
KORKEAN ENTROPIAN METALLISEOK-
SELLA**

Kandidaatintyö

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Ohjaaja: Juha Nykänen
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Olli Lehtinen: Suihkumoottorin turbiinin siivekkeen materiaalin korvaaminen korkean entropian metalliseoksella (Replacing jet engine turbine blade's material with high entropy alloy)

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Materiaalitekniikka
Joulukuu 2020

Maailmassa on jatkuvasti tarve nopeammille ja tehokkaammille henkilöiden ja rahdin kuljetusvälineille. Tämä koskee myös lentoteollisuutta. Jotta koneiden nopeutta saataisiin nostettua, tarvitaan ratkaisuja laitteiden rakenteissa tai materiaaleissa. Moottoreiden tuottama työntövoima voidaan verrata melko suoraan lämpötilan suuruuteen kyseisessä prosessissa. Koska lämpötilat nousevat nopeuden myötä, nykyiset turbiinin siivekkeen materiaalityökäiset eivät ole enää käytökelpoisia tässä tilanteessa, sillä niiden mekaaniset ominaisuudet laskevat liika lämpötilan kasvaessa. Eräs uusi materiaalien tutkimuskohde on korkean entropian metalliseokset, jotka voisivat olla varteen otettava vaihtoehto korvaamaan nykyisin käytettäviä supernikkeliseoksia. Materiaalin tulisi kestää korkeita lämpötiloja mutta samalla olla mahdollisimman kevyttä, jotta polttoaineen kulutus ei kasvaisi painon takia.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään turbiinin siivekkeeseen, joten siihen kohdistuvat rasitukset ovat tärkeä ymmärtää. Turbiini sijaitsee suihkumoottorissa polttokammion jälkeen, missä suurin lämpötila saavutetaan ja näin ollen rasitukset ovat merkittävimmät.

Nykyiset supernikkeliseokset ovat kestäviä ja laajalti käytettyjä turbiinin siivekkeiden valmistamiseen. Kuitenkin niiden sulamislämpötila on melko lähellä nykyisiä polttoaineen palamislämpötiloja. Tämän takia niiden pinnalle on kehitetty keraaminen pinta, jonka lämpöominaisuudet vähentävät metalliin kohdistuvaa termistä rasitusta, jolloin koko komponentti kestää moottorin käytämisen. Tämän lisäksi siivekkeeseen on valmistettu jäädytyskanavia, joiden kautta suhteellisesti viileämpi ilmavirta kulkee. Tärkeää siivekkeen rakenteelle on sen erilliskiteinen raetyyppi, joka vähentää virumisesta johtuvaa mekaanisten ominaisuuksien heikkenemistä korkeissa lämpötiloissa.

Korkean entropian seoksilla on havaittu hyviä mekaanisia ominaisuuksia, kuten suuret kovuudet, hyvä kulutuksenkestävyys sekä korkeat sulamislämpötilat. Nimensä mukaisesti näiden seosten entropiat ovat suuret verrattuna tyypillisiin metalliyhdisteisiin. Seosten valmistamiseen käytetään yleensä viittä tai useampaa metallista alkuainetta, joista saadaan erittäin hyvät ominaisuudet. Korkeaa lämpötilan kestävyyttä saadaan materiaaliin esimerkiksi käyttämällä refraktorimetalleja, kun taas hapettumisen estoa varten alkuaineita, jotka eivät reagoi ympäristön kanssa herkästi. Näin ollen korkean entropian seoksilla saadaan yhdistettyä moni eri ominaisuus. Näissä seoksissa vaikeuksia syntyy kuitenkin valmistamisessa. Etenkin hapettuminen ja seoksen komponenttien erkaantuminen ovat rakenteelle haitallisia valmistuksen aikana. Myös erilliskiteen valmistaminen on korkean entropian seoksilla melko vaikeaa.

Vaikka korkean entropian seoksista löytyy potentiaali korvaamaan nykyiset materiaalityökäiset, niiden tutkimusta täytyy lisätä, jotta päästäisiin haluttuihin lopputuloksiin.

Avainsanat: Korkean entropian metalliseokset, Suihkumoottori, Turbiinin siiveke.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

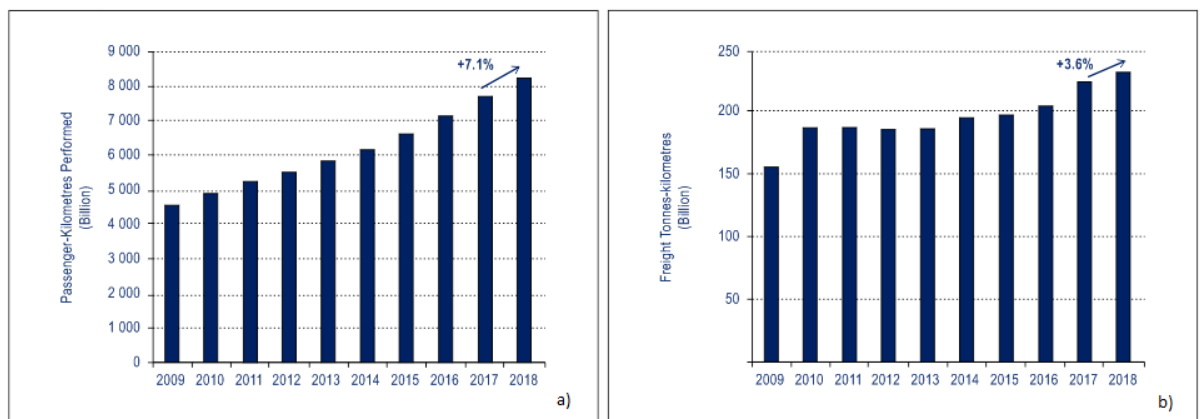
1. JOHDANTO	1
2. SUIHKUMOOTTORI	3
2.1 Toimintaperiaate ja tärkeimmät osat	3
2.2 Käyttöympäristön vaatimukset	5
3. SIIVEKKEEN MATERIAALIT	7
3.1 Nykyiset materiaalit	7
3.2 Tulevaisuuden haasteet	11
4. KORKEAN ENTROPIAN METALLISEOKSET	12
4.1 Rakenne	15
4.2 Ominaisuudet	16
4.3 Valmistaminen	18
4.4 Ongelmia	22
5. YHTEENVETO	23
LÄHTEET	24

LYHENTEET JA MERKINNÄT

EBSD	engl. Electron backscatter diffraction, pyyhkäisyelektronimikroskoopin kuvantamismetodi.
HEA	engl. High entropy alloy, korkean entropian metalliseos.
HEM	engl. High entropy material, korkean entropian materiaali.
Htp	engl. Hexagonal closest packed, heksagonaalinen tiivispakkaus kiderakenne.
LENS	engl. Laser engineered net shaping, 3d-tulostus metodi korkeansu- lamispisteen materiaaleille.
TBC	engl. Thermal barrier coating, lämpösuoja- pinnoite.
TGO	engl. Thermally grown Oxide, termisesti kasvava oksidikerros.
Tkk	engl. Body centered cubic, tilakeskinen kuutiollinen kiderakenne.
Pkk	engl. Face centered cubic, pintakeskinen kuutiollinen kiderakenne.
ΔG_{mix}	Sekoituksen Gibbsin vapaaenergian muutos
ΔH_{conf}	Sekoituksen entalpian muutos eli absorboitu lämpöenergia
N	Komponenttien määrä
R	Kaasuvakio
ΔS_{conf}	Entropian ero sekoitetun ja sekoittamattoman tilojen välillä
T	Lämpötila
X	Komponentin osuus koko seoksesta

1. JOHDANTO

Lentoteollisuuden merkitys on kasvanut suureksi viime vuosikymmenien aikana. Niin henkilöliikenne kuin rahtitavaran kuljetus ovat kasvaneet paljon eikä liikennöinnin hidastumista ole olettavissa tulevaisuudessa [1]. Kuvassa 1 on esitetty matkustajien ja rahdin määrä vuosina 2009-2018, mistä voidaan nähdä tilastojen olevan nousemassa. Näin ollen lentokoneiden suoritusasteen tarpeet ovat nousseet. Lentokoneen tulee päästä paikasta A paikkaan B mahdollisimman nopeasti. Teknologian kehittyessä myös nopeudet ovat kasvaneet. Tähän ovat vaikuttaneet niin aerodynaamiset ratkaisut kuin keventyneet rakenteet. Kuitenkin kehitys moottoreiden tehossa on ollut yksi merkittävimmistä syistä lentokoneiden nopeuden nousemiseen. Kuitenkin tästä syntyy ongelmia kuten, miten moottorissa käytettävät materiaalit kestävät nopeuden kasvamisen, sillä myös laitteiston käyttölämpötilat nousevat samalla. Korkea lämpötila aiheuttaa materiaalin mekaanisten ominaisuuksien laskemisen, jolloin moottoririkko on todennäköinen. Näin ollen materiaali ratkaisuita on tehtävä uudelleen. Vaikka nopeutta ei tarvitsisikaan kasvattaa, komponenttien eliniän kasvattaminen on lähes aina haluttavaa ja samalla vähennetään uuttavien osien määrää melko paljon.



Kuva 1. a) Matkustaja-kilometrit ja b) rahtitavara tonneissa kilometriä kohti vuosina 2009-2018. [1]

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena tutkia voiko korkean entropian seoksella (High entropy alloy, HEA) korvata nykyisin käytettävät materiaalit suihkumoottorin turbiinin siivikkeessä. Näitä materiaaleja alettiin tutkia jo vuonna 1963 vähäisissä määrin mutta tutkimusten määrä on noussut 2000-luvun aikana melko paljon, kun kiinnostus niiden muokattaviin ominaisuuksiin on noussut [2, s. 7].

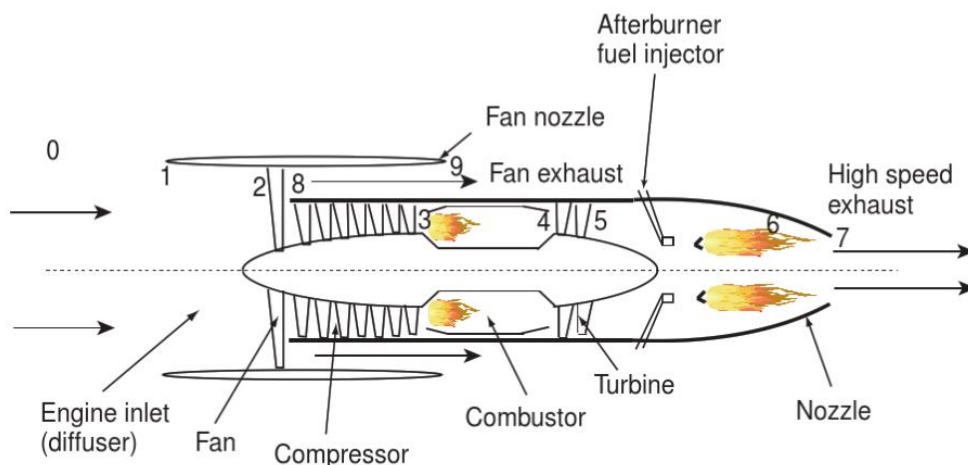
Jotta korkean entropian metalliseoksia voitaisiin ottaa käyttöön siivekkeessä, tulee niitä vertailla nykyisiin materiaaleihin, sekä moottorissa vallitseviin olosuhteisiin. Tässä opin-
näytetyössä käydään lyhyesti läpi perinteisen suihkumoottorin rakenne ja osat sekä nykyisiä materiaaliratkaisuja siivekkeessä. HEA:t koostuvat vähintään viidestä eri alkuai-
neesta, joita kaikkia on lähes tai yhtä suuri atomiprosentti mutta kuitenkin enemmän kuin viisi %. HEA materiaaleille ominaista ovat esimerkiksi suuret kovuudet, hyvä kulutuksen-
kestävyys sekä korkeat sulamislämpötilat. Näin ollen ne olisivat varteen otettava vaihto-
ehto siivekkeiden valmistamiseen. [3]

2. SUIHKUMOOTTORI

Kaasuturbiinimoottori, josta käytetään nimitystä suihkumoottori, on lentokoneiden pääasiallinen käytettävä voimanlähde. Se toimii lämpökoneena, joka käyttää polttoainetta liike-energian luomiseen. Liike syntyy, kun palava kaasua aiheuttaa työntävän voiman, joka luo lentokoneen liikkumisen eteenpäin. [4, s.10]. Ensimmäinen suihkumoottorilla varustettu lentokone oli saksalainen Heinkel 178, joka valmistettiin vuonna 1939. Sen huippulentonopeus oli 598 km/h [5]. Tämän koneen moottorin toimintaan perustuvat monet myöhemmin suunnitellut lentokoneet [6, s. 3]. Kun verrataan ensimmäisen suihkumoottorin ja modernin moottorin nopeuksia, voidaan todeta merkittävän kehityksen teknologiassa onnistuneen. Esimerkiksi amerikkalainen Lockheed SR-71 Blackbird on mittautunut huippunopeudekseen 3 529 km/h [7].

2.1 Toimintaperiaate ja tärkeimmät osat

Kuten aiemmin kerrottiin, suihkumoottori on lentokoneen liikevoiman tuottaja. Sen pääkomponentit on esitelty kuvassa 2. Eri moottoreissa voi olla eri määrä komponentteja pääosissa mutta perustoiminto on sama. Moottorin toiminta alkaa imuaukolla, joka nimensä mukaisesti imee suoraan edestään ja osittain muiltakin suunnilta ilmaa moottoriin.



Kuva 2. Suihkumoottorin osat [8, s. 41].

Aukon suulla on potkuri, jonka lavat on asennettu pyörimään sisäänpäin, mikä aiheuttaa ilman virtaamisen moottoriin. Tehokas imu voi tuottaa jopa tonnin ilmavirtaa sekunnissa,

tähän vaikuttaa tosin suuaukon pinta-ala. Pelkästään tämä tuottaa noin 75 % muodostuvasta työntövoimasta. [4, s. 122–125]

Tämän jälkeen moottorissa on aksiaalinen kompressorin, joka koostuu useasta vyöhykkeestä, joiden tarkoitus on puristaa ilmassa pienempään tilaan. Nämä vyöhykkeet koostuvat roottoreista, joihin on kiinnitetty erilaisia siivekkeitä, joiden läpi ilma virtaa ja puristuu vyöhykkeeltä toiselle. Tilavuus pienenee niin siivekkeiden muodon ja määrän takia kuin itse moottorin kaventumisen takia. Näin ollen ilman paine nousee ja samalla lämpötila kasvaa. Korkein paine saavutetaan kompressorin suuaukolla. Tämän jälkeen ilmapirta pakotetaan polttokammioon, jossa se sekoitetaan polttoaineen kanssa. Kammiossa on useita suuttimia, joista suihkutetaan polttoainetta. Sekoitus sytytetään, mikä aiheuttaa seoksen laajentumisen ja lämpenemisen, mikä taas johtaa ilmapirran energiamäärän kasvamiseen. Polttokammion lämpötilat nousevat erittäin suuriksi, jolloin osan materiaalit joutuvat koetukselle. Siksi kammion valmistamisessa suositetaan korkeaa lämpötilaa kestäviä keraameja. [4, s. 94–118; 8, s. 101–136]

Osa korkeaenergisestä ilmapirrasta käytetään kompressorin ja imupotkurin pyörittämiseen, sillä ne on kiinnitetty samaan akseliin turbiinin kanssa. Polttokammion tuleva virtaus pyörittää turbiinin siipiä erittäin nopeasti. Tässä opinnäytetyössä pääasiallisesti tarkastelun kohteena on turbiini ja vielä tarkemmin sen siiveke. Turbiini laajentaa ilmaseoksen alempaan paineeseen sen jälkeen, kun se on ensin puristettu kokoon, sekoitettu polttoaineen kanssa ja sytytetty. Paineen aleneminen tapahtuu kuluttamalla virtauksen energiaa, joka suuntautuu turbiinin pyörittämiseen ja aikaisemmin mainittuun akselijärjestelmän liikkeeseen. Ilmaseos on kuumimmillaan polttokammiossa, josta se liikkuu turbiiniin. Tämän takia turbiinin komponenttien tulee kestää erittäin korkeita lämpötiloja, vaikka kuumuus aleneekin jonkin verran turbiinin eri vaiheissa. [4, s.132–137] Kuvassa 3 on esitetty eräs suihkumoottorin turbiinin vaiheista. Näitä vaihteita voi olla useita peräkkäin erilaisilla puristussuhteilla, mikäli moottorin toiminta niin vaatii. Turbiiniin mahtuu useita siivekkeitä moottorin tyyppin mukaan.



Kuva 3. Suihkumoottorin turbiinin yksi vaihe [9].

Joissain moottorimalleissa turbiinin jälkeen sijaitsee jälkipoltin. Sitä käytetään pääasiassa sotilaallisessa käytössä. Sen tehtävä on lisätä polttoainetta palokaasuseokseen ennen moottorin suuaukkoa, mikä aiheuttaa vielä virtauksen laajentumisen ja lämpötilan nousun. Jälkipoltin kuitenkin käyttää erittäin paljon polttoainetta, joten sitä ei yleensä käytetä pitkäkestoisia aikoja. Sillä saadaan hetkellistä suorituskyvyn nostoa esimerkiksi, jos halutaan lentokone nousemaan nopeasti kentältä ilmaan tai kun lennetään yliäänennopeudella. [10]

Viimeisenä suihkumoottorissa on suihkuputki, josta lopullinen virtaus tulee ulos työntövoimana. Suuaukko on kapeneva, mikä määrää ulos tulevan massavirran. Aukon kokoa muuttamalla koneen nopeutta voidaan säädellä. Esimerkiksi lennettäessä yliäänennopeudella suuaukkoa laajennetaan verrattuna aliäänennopeudella lennettävään asetukseen.

2.2 Käyttöympäristön vaatimukset

On ymmärrettävää, että suihkumoottorilla on erityisiä vaatimuksia, jotta sen toiminta olisi suunnitellun mukaista. Suunnittelua ohjaa muutama tärkeä parametri, joita voidaan jakaa esimerkiksi mekaanisiin ja termisiin rasituksiin. Eräitä vaatimuksia ovat esimerkiksi jäätymisen esto, sillä imuaukolle muodostuva jää voi aiheuttaa ilman virtaukselle epäsuotuisia pyörteitä. Tässä opinnäytetyössä keskitytään parametreihin, jotka ovat oleellisia turbiinin toiminnan kannalta. Näihin kuuluvat muun muassa kaasun lämpötila turbiinin

sisääntulossa, kaasun virtauksen paine ja nopeus sekä koostumus, pyörivän liikkeen aiheuttamat rasitukset ja lämpötilat erot komponentin eri osissa. [11, s. 1]

Suihkumoottorin toiminnassa komponenteille aiheutuu mekaanista rasitusta. Näitä ovat muun muassa viruminen, väsyminen ja kaasun virtauksesta aiheutuva vääntövoima sekä tärinästä ja pyörivästä liikkeestä aiheutuvat rasitukset. Virumisessa turbiinin siivekkeet moottorin toiminnan aikana venyvät eli niiden pituus kasvaa. Tämä prosessi myös muuttuu nopeammaksi, kun lämpötilat kasvavat. Näin ollen materiaalin virumisen kesto on eräs siivekkeen käyttöiän määräävistä parametreista. Siiveke joko poistetaan tämän jälkeen kokonaan käytöstä tai uudistetaan, mikäli se on järkevää kyseisessä tilanteessa. Viruminen on ajasta riippuvaa dislokaatioliikettä, diffuusion aiheuttamaa tai raerajaliukumista. Siivekkeiden suunnittelussa on otettu huomioon nämä mekanismit ja suunniteltu komponentit kestäämään niitä mahdollisimman hyvin. [12] Tärinä aiheutuu monesti, kun moottoria käytetään taajuudella, joka on sama kuin jokin komponentin ominaistajuus. Näin ollen tapahtuu resonointia. Niin pyörivä liike kuin ilmapirran aiheuttama rasitus on suurimmillaan siivekkeiden kiinnityskohdan lähellä ja usein rikkoutumiset tapahtuvatkin näissä kohdissa. [13]

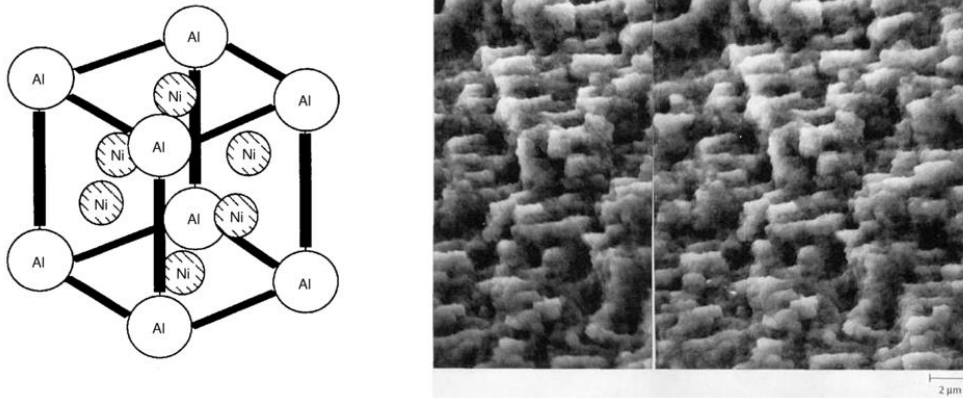
Termisen rasituksen vaikutus kasvaa nopeutta nostaessa, sillä palavan kaasun lämpötilalla on suora vaikutus poistuvan virtauksen nopeuteen. Muutaman viime vuosikymmenen aikana kaasun lämpötilat ovat nousseet 1400:stä jopa 2000 celsius asteeseen. On siis melko yksinkertaista arvioida materiaali ratkaisuiden muuttuneen melko paljon. Jos esimerkiksi vanhat komponentit oli suunniteltu 1500 °C:een 20 vuotta sitten, ne eivät enää suoriutuisi nykyisten koneiden vaatimuksista. Lämmön nousuun vaikuttavat myös kompressorien puristussuhteet. Tällä hetkellä moottoreista saataisiin huomattavasti enemmän tehoa, mutta nykyiset materiaalit/rakenteet eivät kestä suuria lämpötiloja, joita tällainen toiminta vaatisi. Vaarana turbiinille on myös lämpöshokki, minkä takia moottoreita esilämmitetään ennen kuin ne lähtevät lennolle. Korkeat lämpötilat lisäävät komponenttien riskiä hapettua, joka taas voi laskea materiaalin ominaisuuksia vaaditun toiminta tason alle, jolloin laitteen käyttäminen ei ole suotavaa. [13]

3. SIIVEKKEEN MATERIAALIT

Vaikka nykyiset suihkumoottorit toimivatkin samoilla periaatteilla kuin ensimmäiset valmistettu kaasuturbiinimoottorit, on niiden teknologia kehittynyt erittäin paljon, sillä niistä saadaan huomattavasti enemmän tehoa kuin aikaisemmin. Myös päästöjen määrää yritetään samalla vähentämään. Tähän pyritään komponenttien rakenteiden ja materiaalien kehittämisellä sekä käyttämällä puhtaampia polttoaineita. Siivekkeitä suunniteltaessa otetaan myös huomioon toiminnan lisäksi valmistuksen hinta ja tuotteen paino. Etenkin paino on tärkeässä osassa, koska kevyemmät rakenteet korreloivat pienemmän materiaalin ja polttoaineen kulutuksen kanssa. [4]

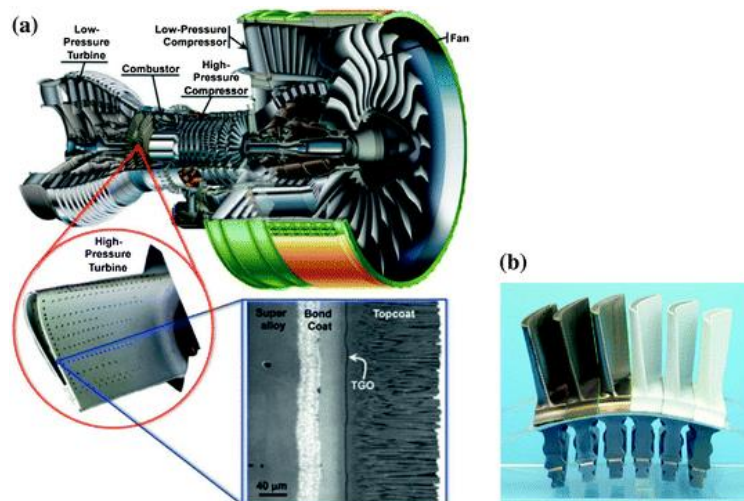
3.1 Nykyiset materiaalit

Nykyisissä siivekkeissä suositaan päämateriaalina nikkelseoksia, mikä johtuu nikkelin hyvistä ominaisuuksista, joihin kuuluvat esimerkiksi korkea sulamispiste (1 455°C) sekä hyvä hapettumisenkesto. Erityisesti nikkelistä hyödytään, kun siihen yhdistetään sopivia seosaineita. Kun nikkeliin seostetaan alumiinia tai titaania, muodostuu gamma-prime faasi (Ni_3Al tai Ni_3Ti), jonka avulla seos säilyttää mekaanisia ominaisuuksiaan pitkään lämpötilan noustessa. [14] Tämän faasin kiderakenne on pintakeskinen kuutiollinen ja se muodostaa virumista vastustavan rakenteen matriisimateriaalin kanssa. Materiaaliin muodostuu dendriittinen rakenne, jossa gamma-prime faasi muodostaa kuutioita, jotka vähentävät dislokaatioliikettä virumisen aikana. Kuvassa 4 on esitetty gamma-primen hilarakenne, jossa kopin kulmissa on tässä tapauksessa alumiini atomit. Kuvassa on myös stereokuva dendriittisestä rakenteesta murtopinnalla, josta voidaan nähdä kuutiomainen rakenne. [15, s. 399–425; 16, s. 854–868]



Kuva 4. Gamma-prime pintakeskinenkuutiollinen yksikkökoppi ja stereokuva dendriittisestä rakenteesta murtopinnalla [16, s. 855, 861].

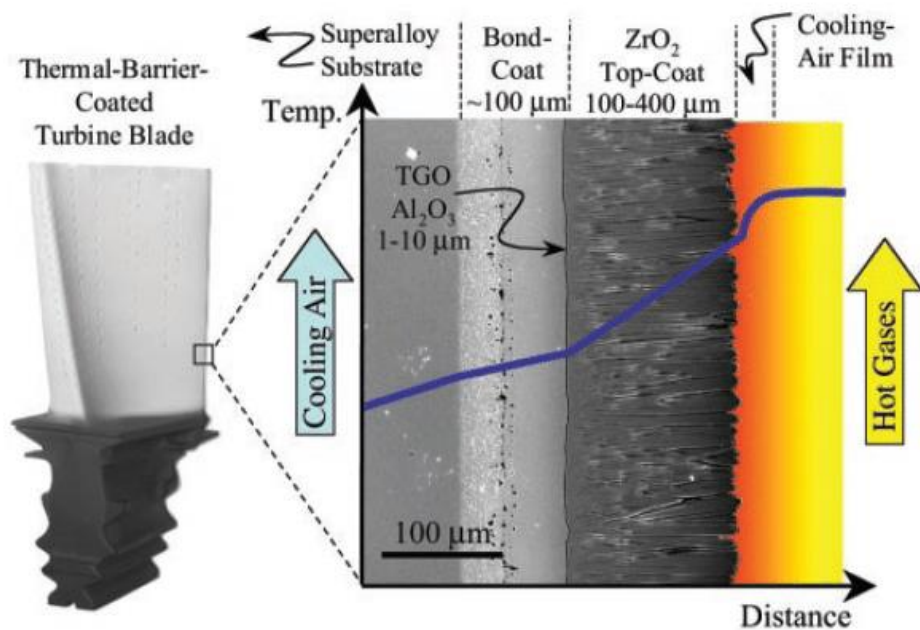
Ongelmaksi siivekkeessä kuitenkin muodostuu, että polttokammiosta tuleva kaasu on jopa satoja asteita kuumempaa kuin seoksen sulamislämpötila. Ongelma saatiin ratkaistua valmistamalla siivekkeen pintaan kuumuudelta suojaava kerros (Thermal barrier coating, TBC). Päälyste on matalan lämmönjohtavuuden omaavaa keraamia, jonka avulla superseos pysyy suhteellisesti viileämpänä. Kuvassa 5 on esitetty poikkileikkaus siivekkeestä materiaalien rajapinnalta sekä siivekkeitä, jotka ovat ja eivät ole päällystetty. Päälystetyillä siivekkeillä on jopa 2–5 kertaa pidemmät käyttöiät kuin päällystämättömillä. Tämä kuitenkin riippuu siitä, onko päälyste valittu oikein ja sopivaksi kyseiseen käyttökohteeseen [11, s. 1].



Kuva 5. a) Suihkumoottori ja siivekkeen poikkileikkaus. b) Turbiinin siivekkeitä päällysteen kanssa sekä ilman [17, s. 2].

Vielä tarkemmin päällysteen rakenne tulee selväksi kuvassa 6, jossa on esitettyä poikkileikkaus siivekkeen pinta materiaaleista sekä lämpötilan muutos etäisyyden suhteen

siivekkeessä. Superseoksen päälle on tehty lämpösulkupinnoite sekä keraamiset kerrokset. Sidospinnoitteen tarkoitus on kasvattaa keraamisen materiaalin adheesiota metalliseokseen. Jos materiaalit eivät tartu toisiinsa lujasti, pinnoite voi pinta säröillä helpommin, mikä vähentää käyttöikää huomattavasti. Sidospinnoite suojaa myös metalliseosta pääpinnoituksen läpi tulevilta happiatomeilta ja muilta haitallisilta korroosiota aiheuttavilta aineilta. Termisesti kasvava oksidi kerros (Thermally grown Oxide, TGO) syntyy pääpinnoitteen hapettumisesta ja sen muodostamista on vaikea estää. Tämän takia pinnoitteet suunnitellaan sellaisiksi, että TGO muodostuu tasaisesti rakenteeseen, sillä jos rakenteessa on epätasaisuuksia, pinta rikkoontuu helpommin. [18;19]

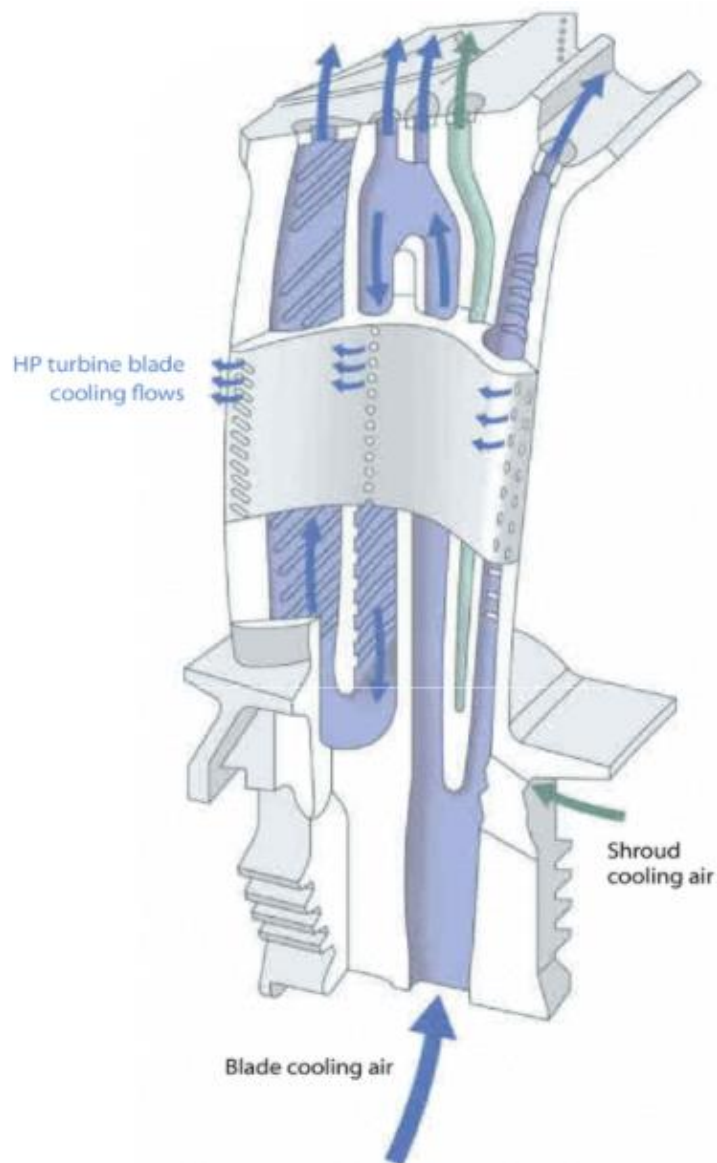


Kuva 6. Poikkileikkaus siivekkeen pinnasta ja lämpötilan muutos matkan suhteen komponentissa [20].

Keraamin pintakerroksen tulee olla eri paksuinen siivekkeellä, sillä sen vetolujuus ei ole korkea, joten suurimmat pyörimisestä aiheutuvat rasitukset ohjataan varsinaisen siivekkeen kestäväksi, muuten rakenne ei kestäisi. Paksuimmat kerrokset pinnoitetta täytyy laittaa siivekkeen kohtiin, joissa on intensiivisimmät termiset vuot. Nämä kohdat myös kantavat mekaanisen rasituksen kuormaa, minkä takia pintasäröily on todennäköistä. Pinnoitteen paksuus voi vaihdella 120 ja 250 mikrometrin välillä. Kuitenkin ohuempi pinnoite kuluu helpommin ja myös adheesio pinnoitteen ja pinnan välillä on heikompi, mikä johtuu muun muassa keraamin ja sidospinnoitteen rajalla tapahtuvasta nopeasta hapettumisesta. [11]

Tämän lisäksi siivekkeen lämpötilaa saadaan laskettua käyttämällä hyväksi ilman ohivirtausta, joka johdetaan turbiinille polttokammion ohi suoraan imuaukolta tai kompressorilta (riippuu rakenteesta). Kuvassa 7 on esitetty esimerkki turbiinin siivekkeen ontosta

rakenteesta, josta voidaan nähdä, miten ilmajäädytys toimii ja kuinka monimutkainen rakenne on. Tällainen rakenne saadaan valmistettua jättämällä valumuottiin onttoa muotoa vastaava keerna. Tämä materiaali saadaan jäädytetystä valukappaleesta pois esimerkiksi käyttämällä sopivia emäksiä [14], jotka eivät reagoi valun kanssa vaan poistavat ylimääräisen materiaalin jäädytyskanavista ulos. Koska lentokoneiden tulee olla mahdollisimman kevyitä, hyödytään jäädytyskanavista myös painon osalta. Tällä tavalla saadaan myös raaka-aineita riittämään pidempään.



Kuva 7. Siivekkeen jäädytys rakenne [4, s. 138].

Myös siivekkeen kiderakenteella on paljon vaikutusta komponentin käytettävyyteen. Siivekkeestä tehdään yksittäiskiteinen, jotta se säilyttää lujuutensa korkeissa lämpötiloissa.

Tämä johtuu siitä, että monikiteisissä rakenteissa on paljon raerajoja, jotka mahdollistavat materiaalin pehmenemisen lämpötilan noustessa. Materiaali on vähemmän herkkä virumiselle, jos se on yksittäiskiteinen (single crystal), koska tällöin ei tapahdu raerajaliukumista. Tämä tarkoittaa, että yksi virumistyypeistä ei ole käytettävissä turbiinin siivekkeen kohdalla. Näin ollen diffuusio ja dislokaatioliike ovat todennäköisempiä virumisen syitä [12].

3.2 Tulevaisuuden haasteet

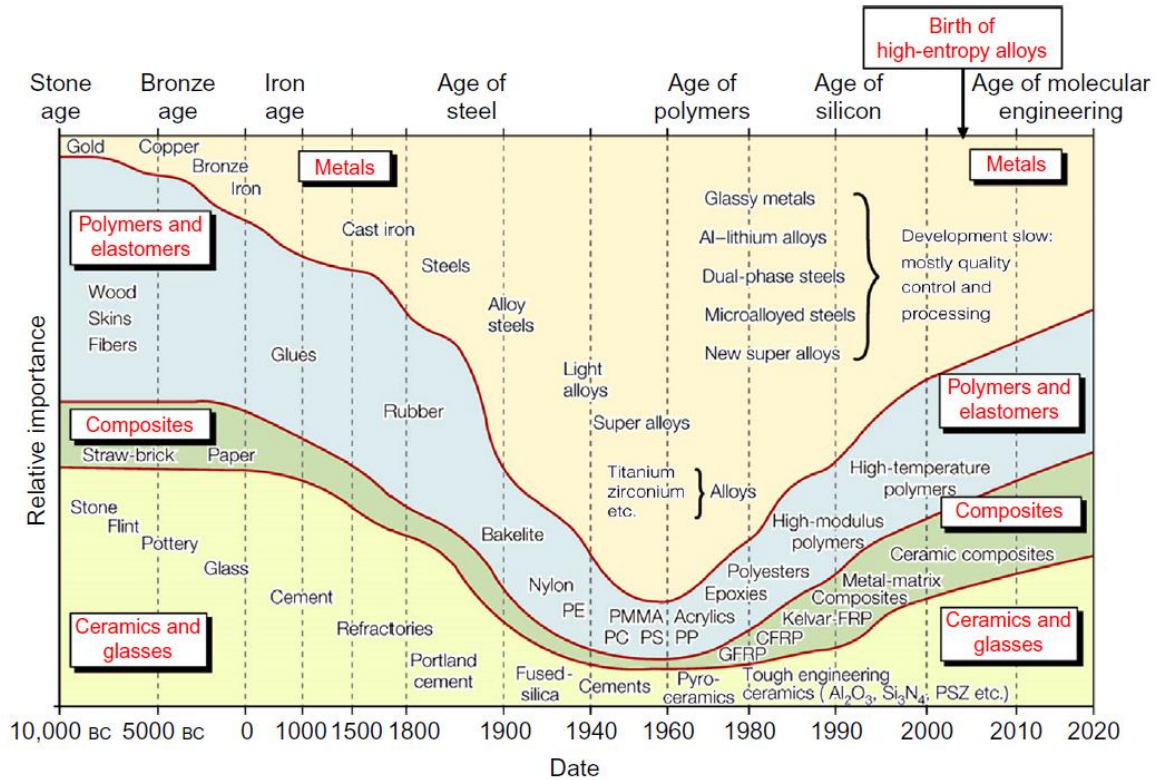
Niin kuin lähes kaikilla teollisuuden aloilla, tuotteiden suorituskykyä pyritään parantamaan niin taloudellisista syistä kuin käytännöllisistäkin. Etenkin lentoteollisuudessa halutaan jatkuvasti parantaa koneiden tuottavuutta. Tähän voidaan vaikuttaa esimerkiksi valmistamalla komponentteja kevyemmistä materiaaleista/rakenteista, mikä vaikuttaa suoraan lentokoneiden polttoaineen kulutukseen.

Koneiden halutaan olevan mahdollisimman paljon ilmassa, sillä siellä ne tuottavat rahaa kuljettamalla ihmisiä tai rahtia. Näin ollen moottorin komponenttien tulee kestää jaksoittaista ja jatkuvaa käyttöä. Siivekkeillä on usein rajattu käyttöikä, jolloin ne on vaihdettava uusiin. Kestävien materiaalivalintojen käyttämisen tulisi lisätä komponenttien ikää huomattavasti ja hyvässä tilanteessa huoltamistoimenpiteiden määrä vähentyisi, mikä taas johtaisi tehokkaampaan lentokoneen käyttöaikaan.

4. KORKEAN ENTROPIAN METALLISEOKSET

Korkean entropian metalliseokset (high entropy alloy, HEA) ovat melko uusi seosryhmä. Niiden kehitys aloitettiin noin 2000-luvun alussa, joten tutkimuksessa on vielä paljon uutta asiaa. Jos verrataan HEA materiaaleja esimerkiksi superseoksiin, joita on kehitetty ja tutkittu jo 1950-luvulta alkaen, voidaan todeta HEA:n potentiaalin olevan vielä melko tuntematon. Kuvassa 8 on esitettynä materiaalien kehitys ja suhteellinen käyttömäärä historian aikana. Metallien suhteellinen käyttö on ollut suurta jo pitkän aikaa mutta myös muiden materiaalityyppien käyttö on lisääntynyt erittäin paljon. Kun materiaaleja on tutkittu, on eri ryhmien aineet korvanneet toisien materiaalien käyttökohteita. Esimerkiksi elektroniikkalaitteissa on nykyään enemmän polymeerejä kuin aikaisemmin. HEA:t voivat samalla tavalla korvata mahdollisesti refraktori keraameja tulevaisuudessa.

Perinteiset metalliseokset ovat yleensä perustuneet yhteen päämetalliin, johon on seostettu muutamia seosaineita. Tästä hyvänä esimerkkinä toimii perinteiset teräkset, jossa rautaan on lisätty pääasiassa hiiltä ja vaikkapa kromia. Muita yleisiä esimerkkejä ovat alumiini-, kupari-, magnesium- ja nikkelpohjaiset seokset. Kuten aikaisemmin mainittiin, korkean entropian seokset koostuvat vähintään viidestä eri metallisesta alkuaineesta, joita kaikkia on lähes tai yhtä suuri atomiprosentti mutta kuitenkin enemmän kuin viisi %. Jos alkuainetta on vähemmän kuin viisi %, sen vaikutus entropiaan on liian pieni, eikä sitä lasketa mukaan tähän ryhmään. Kuitenkin uusien tutkimusten mukaan kaikkia alkuaineita ei välttämättä tarvitse olla yhtä suurta osaa, vaan seos voi olla vakaa myös, jos yksittäistä komponenttia onkin eri määrä kuin muita. [21]



Kuva 8. Materiaalien historia [22, s. 2].

Korkean entropian seokset voivat sisältää lähes mitä vain metallisista alkuaineista. Kuitenkin materiaalit täytyy valita käyttökohteen mukaan. Esimerkiksi jos käyttökohde tarvitsee hyvää sähkönjohtavuutta, tulee seoksen sisältää kyseisen ominaisuuden omaavaa alkuainetta. Toisaalta osa metallisista alkuaineista ei ole järkeviä käyttää tuotteiden valmistamiseen. Muutamilla metallisilla alkuaineilla kuten Tc (Teknetium) ja Fr (Frankium) esiintyy radioaktiivisuutta, joka ei yleensä ole teollisuudessa haluttavaa, eikä ainaakaan siivekkeiden kannalta [23]. Näin ollen niiden käyttäminen ei ole todennäköistä. Jos taas halutaan tuotteelle vähäinen hapettuminen, voisi kromin käyttäminen yhtenä seoksen osana olla järkevää [24]. Kuvassa 9 on esitetty jaksollinen järjestelmä. HEA yhdisteissä käytetään niin alkali-, maa-alkalimetalleja kuin sivuryhmien alkuaineitakin.

Periodic table of the elements

group	1*	2											13	14	15	16	17	18
period 1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
lanthanoid series 6	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
actinoid series 7	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr				

*Numbering system adopted by the International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). © Encyclopædia Britannica, Inc.

Kuva 9. Jaksollinen järjestelmä [25].

Korkean entropian seokset eivät rajoitu vain metallisiin materiaaleihin, vaikka ne ovatkin tämän opinnäytteen tutkimiskohde, vaan nykyisten tutkimusten kohteena ovat myös niin sanotut High Entropy Materials (HEM). Nämä korkean entropian materiaalit voivat olla keraameja polymeerejä tai vaikkapa komposiitteja. Näitä materiaaleja voidaan käyttää esimerkiksi kulutusta kestävien käyttökohteiden valmistuksessa. [26]

Korkean entropian seoksen nimi tulee sen suuresta entropian määrästä verrattuna perinteiseenpiin metalliseoksiin. Tämä tulee esille termodynaamisissa entropian yhtälöissä:

$$\Delta S_{mix} = -R (X_A \ln X_A + X_B \ln X_B + \dots X_n \ln X_n), \quad (1)$$

missä ΔS_{mix} on sekoituksen entropia, R on kaasuvakio ja X on seoksessa olevan komponentin osuus koko seoksesta. Yhtälö voidaan yksinkertaistaa, jos komponentteja on yhtä suuret osuudet koko seoksesta kuten HEA:ssa. Tällöin saadaan:

$$\Delta S_{mix,max} = R \ln N, \quad (2)$$

missä N osallistuvien alkuaineiden määrä. Entropian arvo kasvaa mitä enemmän komponentteja seokseen otetaan mukaan. Näin ollen päästään yhtälöön:

$$\Delta G_{mix} = \Delta H_{mix} - T \Delta S_{mix}, \quad (3)$$

missä ΔG_{mix} on sekoituksen Gibbsin vapaaenergian muutos, ΔH_{mix} sekoituksen entalpiian muutos eli absorboitu lämpöenergia, T lämpötila kelvineissä ja ΔS_{mix} entropian ero sekoitetun ja sekoittamattoman tilojen välillä. [27, s. 13] Korkea entropia ja samoin lämpötila ajavat vapaaenergian muutosta negatiivisempaan suuntaan, jolloin seos tasapainottuu paremmin. Entalpialla kuvataan yleensä seoksen kemiallisia muutoksia sekä tilanmuutoksia [28, s. 1] mutta kiinteiden seosten kohdalla kyseessä on enemmänkin sisäenergian muutokset erilaisissa reaktioissa. Taulukossa 1 on laskettu kaavoja 1 ja 2 käyttämällä sekoitus entropian arvoja eräille korkean entropian seoksille ja perinteisille metalliseoksille.

Taulukko 1. *Eräiden seosten entropian arvoja.*

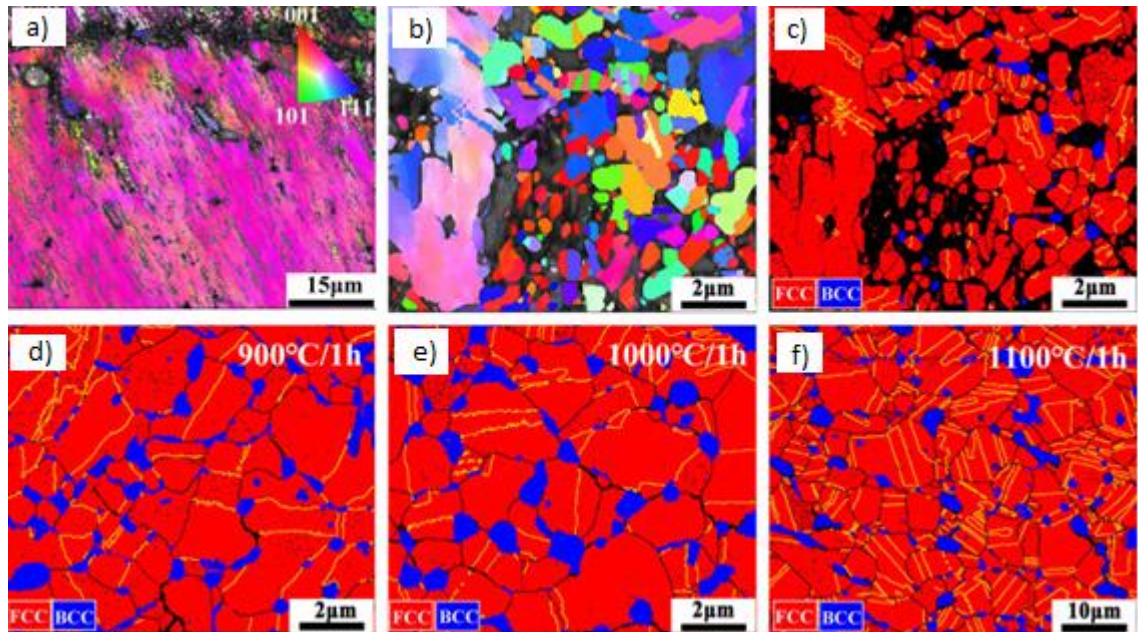
Seos	Sekoitus entropia ΔS_{conf} (J/K)
CuTiVFeNiZr (N=6)	14,90
CoCrFeMnNi (N=5)	13,40
Matalahiilinen teräs	0,56
Ruostumatonteräs 304	6,95
Inconel 718 Nikkeliseos	10,93

Perinteisillä seoksilla on huomattavasti pienemät entropian arvot. Nikkeliseoksen arvon suuruus johtuu sen komponenttien suhteellisen suuresta osuudesta (esimerkiksi titaani ja alumiini) verrattuna pääaineeseen. Matalahiilisessä teräksessä taas on monta osallistuvaa alkuainetta, joita on erittäin pieniä määriä, minkä takia entropia ei nouse kovin suureksi.

4.1 Rakenne

Korkean entropian seokset muodostavat useimmiten pintakeskisiä kuutiollisia (pkk), tilakeskisiä kuutiollisia (tkk) tai heksagonaalaisia tiivispakkauksellisia (htp) rakenteita. Riippuen miten seos valmistetaan ja miten sitä jatko käsitellään, voi rakenteeseen muodostua monta yhtäaikaista yksikkökoppityyppiä. Esimerkiksi pkk ja tkk tyypit ovat yleisiä rakenteita, joita löytyy HEA yhdisteistä. [22, s. 91] Muitakin kiderakenteita voi muodostua mutta ne ovat usein mekaanisesti heikkoja, ja sen takia ne eivät ole tärkeässä osassa tässä opinnäytetyössä. Kuvassa 10 on esitetty erään korkean entropian seoksen mikro rakenne EBSD-metodilla (electron backscatter diffraction). Kuten kuvasta nähdään pkk

ja tkk esiintyvät rakenteessa yhtä aikaa. Faasiin suhteeseen seoksessa vaikuttaa lämpökäsittelyssä erityisesti lämpötila ja prosessointi aika. Kuvassa 10 on esitetty myös kiderakenteen orientaatiota seoksessa.



Kuva 10. HEA materiaalin EBSD kuva [21, s. 4].

Useimmiten paremmat mekaaniset ominaisuudet on havaittu rakenteilla, jotka ovat yksifaasisia. Pkk rakenteellinen seos kestää paremmin korkeita lämpötiloja, koska sillä on tiiviisti pakattu suunta (close-packed), jonka takia diffuusio on hitaampaa. Sillä on myös taipumusta olla sitkeämpää kuin tkk [22, s. 97–98]. Näin ollen se voisi olla hyvä valinta siivekkeen valmistamiseen. Useilla tkk rakenteilla taas on havaittu paljon korkeammat kovuuden arvot, jolloin kulutuksen kestoja tarvitsevat käyttökohteet voisivat olla sopivampia. Niillä on huomattu olevan myös parempi reaktio liuoslujuutumiseen (solution hardening) [22, s. 31].

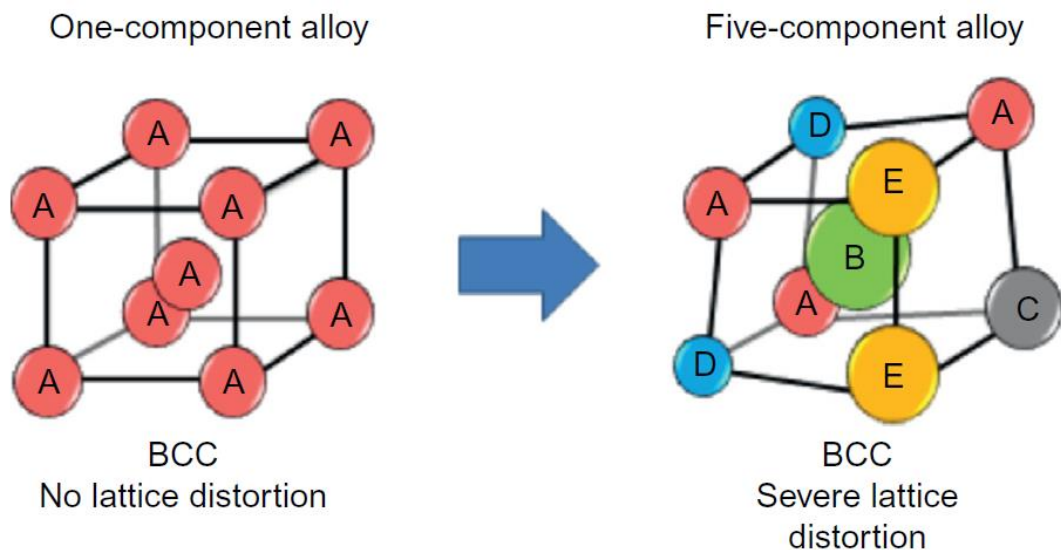
4.2 Ominaisuudet

HEA materiaalien ominaisuuksiin vaikuttavat monet asiat mutta yksinkertaisimmat ovat neljä ydin efektiä, jotka ovat korkea entropia, suuri hilarakenteen vääristymä, hidas diffuusio sekä yhteisvaikutus (cocktail effect). [22].

Korkea entropia on tärkein yksittäinen tekijä, joka auttaa seoksen hyvin ominaisuuksien muodostumisessa. Tämä johtuu siitä, että korkea entropia lisää kiinteiden liuosten muodostumista seoksessa, mikä taas yksinkertaistaa mikrorakennetta [29]. Kun rakenteessa on vähemmän faaseja, sen ominaisuudet ovat usein parempia, esimerkiksi yksifaasiset

HEA:t ovat osoittaneet huomattavasti parempaa murtositkeyttä kuin monifaasiset samoista alkuaineista valmistetut seokset [30, s. 3025-3026].

Hilarakenteen vääristyminen johtuu eri alkuaineiden koon eroavuudesta toisiinsa nähden. Koska atomit yksikkökopissa ovat eri suuria, joutuu hilarakenne venymään, jotta atomit mahtuvat kyseiseen hilarakenteeseen. Kuvassa 11 on esitetty tilakeskeinen hilarakenne yksi- sekä viisikomponenttisena. Hilan muotoon vaikuttaa myös atomien välillä olevat sidosvoimat, jotka voivat vaihdella eri alkuaineatomiparien välillä suuresti, mikä taas vaikuttaa suoraan atomien etäisyyteen toisistaan. Hila vääristymä vaikuttaa moniin HEA:n ominaisuuksiin, kuten kovuuteen ja kestävyuteen. Se myös vähentää lämpötilan vaikutusta mekaanisiin ominaisuuksiin, minkä takia korkean entropian seoksia tutkitaan korkean lämpötilan sovelluksia varten. Lämpötilan pieni vaikutus tässä tilanteessa johtuu atomien termisen värähtelyn suhteellisen vähäisestä vaikutuksesta hilan vääristymään verrattuna jo seoksessa olevaan vääristymään. [22, s. 30–32]



Kuva 11. Hilarakenteet yksi- ja viisikomponenttisena [22, s. 31].

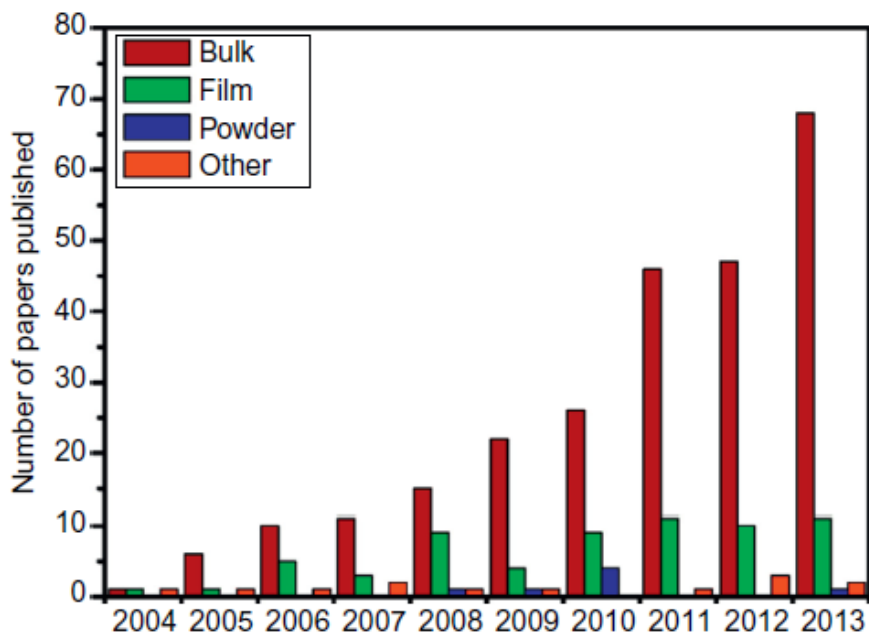
Hidas diffuusio vaikuttaa myös seoksen ominaisuuksiin. Jos seoksen diffuusion nopeutta verrataan puhtaisiin alkuaineisiin tai esimerkiksi ruostumattomaan teräkseen, huomataan korkean entropian seoksen omaavan huomattavasti hitaamman prosessin. Tämän avulla seos pystyy pitämään ominaisuutensa tasaisena korkeassa lämpötilassa, jossa esimerkiksi perinteisissä metalliseoksissa seosaineet alkaisivat diffundoitua pois ideaalisista paikoista (riippuu materiaalista), jolloin materiaalin ominaisuudet heikkenevät. Tästä hyvänä esimerkkinä on teräksen pehmeneminen korotetussa lämpötilassa. HEA

materiaalissa diffuusion kulkema reitti vaikeutuu huomattavasti. Hitaan diffuusion nähdään parantavan monia korkean entropian seoksen ominaisuuksia kuten virumiskäyttämistä. [22, s.32–33]

Yhteisvaikutus saattaa aiheuttaa valmistettavaan seokseen ominaisuuksia, jotka eivät olisi mahdollisia, mikäli se valmistettaisiin vain yksittäisistä alkuaineista. Näin ollen ominaisuudet ovat kombinaatio kaikkien seokseen osallistuvien materiaalien ominaisuuksista. Yhdistelemällä sopivia alkuaineita voidaan saavuttaa huomattavasti parempia ominaisuuksia kuin esimerkiksi nykyisillä superseoksilla. [22, s. 34–35]

4.3 Valmistaminen

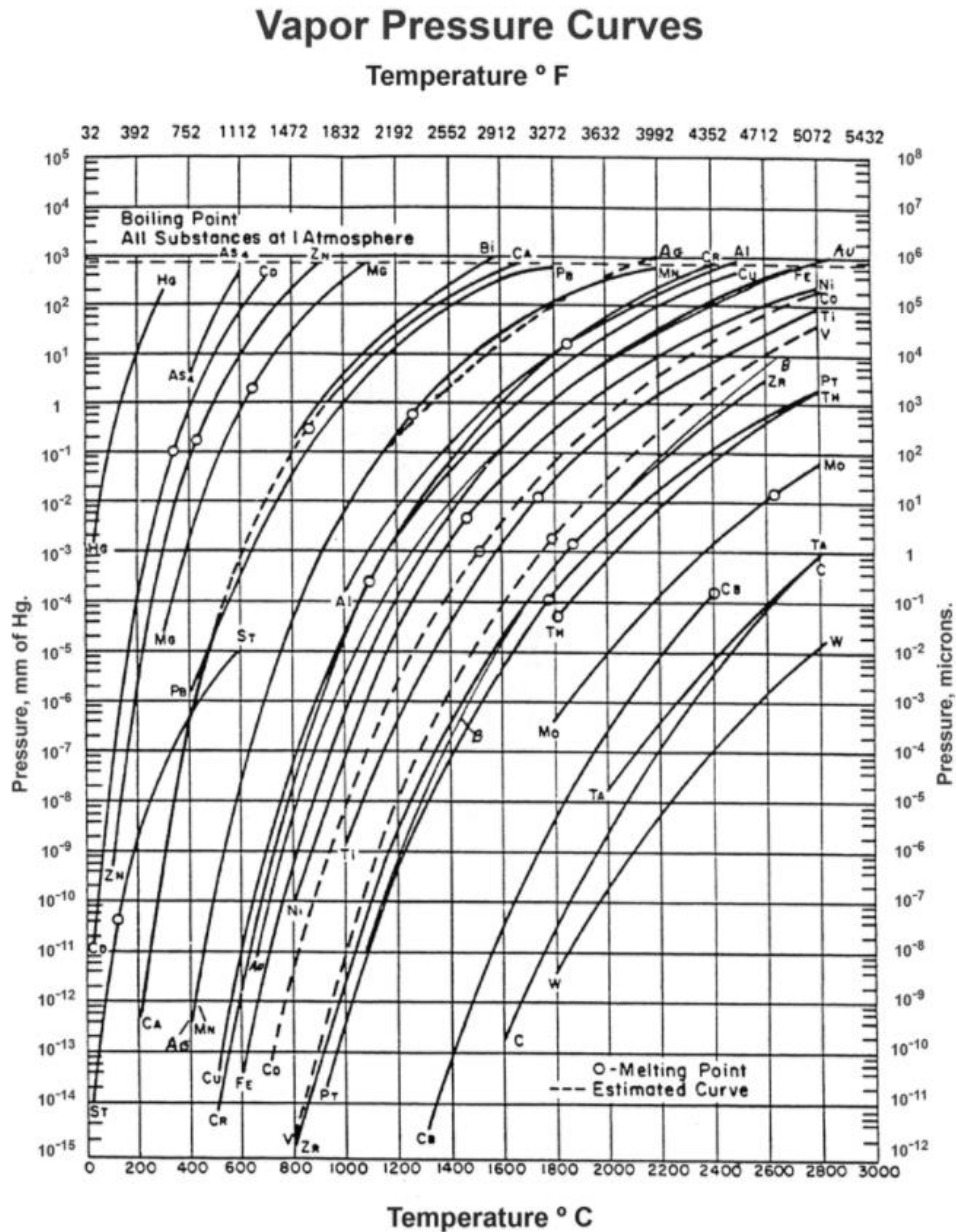
Korkean entropian seoksia ei vielä ole juurikaan laajamittaisessa käytössä. Niiden valmistamisessa tulee ottaa huomioon useita asioita, jotta tuotteesta saadaan halutunlainen. Kuvassa 12 on esitetty HEA-tutkimusten koekappaleiden valmistustapoja vuosina 2004–2013. Valaminen on selkeästi käytetyin tapa. Pinnoitteet (Lämpösuojat) eivät ole siivekkeiden kannalta tärkeässä asemassa tässä opinnäytetyössä, mutta ne saattavat olla tulevaisuudessa tutkittava aihe lämpösulkupinnoitteen korvaamiseen. Jauhemenetelmissä taas sintraus on eräs potentiaalisista valmistusmenetelmistä.



Kuva 12. Julkaistujen HEA-tutkimusten koekappaleiden valmistustavat [22, s. 78].

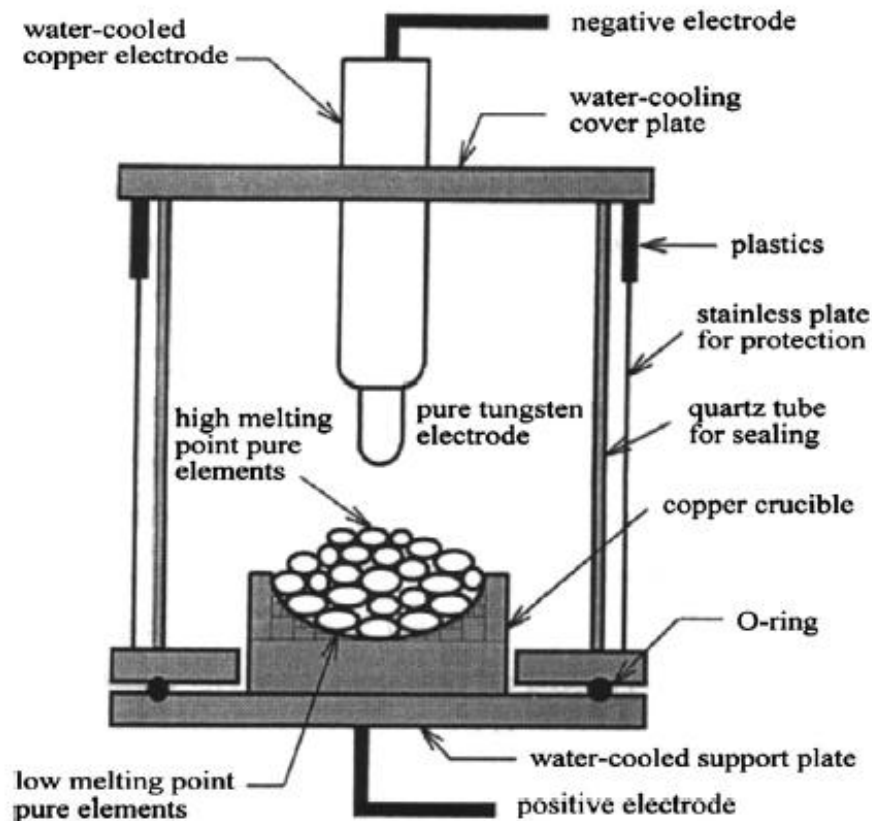
Yleisin tuotantomenetelmä on sulattaa materiaalit, esimerkiksi tyhjiövalokaarisulatuksella tai induktiosulatusta käyttämällä, jonka jälkeen kappale voidaan valaa. Etenkin valokaarimenetelmällä päästään erittäin korkeisiin lämpötiloihin (melkein 3 000 °C), jolloin

kaikki seokseen kuuluvat alkuaineet sulavat todennäköisimmin. Haittana tosin korkeissa lämpötiloissa on, että osa matalan kiehumislämpötilan omaavista alkuaineista saattavat höyrystyä. Kuvassa 13 on esitettyinä eräiden alkuaineiden höyrönpaineikäyriä. Kun käyriä seurataan tietyssä paineessa, nähdään näiden materiaalien sulamispisteet. Esimerkiksi titaanilla ja nikkellillä on erittäin korkeat sulamispisteet. Höyrystymiselle alttiita alkuaineita taas ovat esimerkiksi Mg, Mn ja Zn. Materiaalien höyrystyminen vaikeuttaa seoksen koostumuksen yhdenmukaista muodostumista. [29]



Kuva 13. Höyrönpaineikäyriä metalleille [31].

Kuvassa 14 on esitettyä valokaarisulatuslaitteisto. Prosessissa sulatettava materiaali laitetaan korkeaa lämpötilaa kestäväan astiaan, joka sijoitetaan kammioon, jonne ime-tään tyhjiö ja lisätään esimerkiksi kaasumaista argonia [21]. Näin vältetään hapettumi-selta yms. epäpuhtauksien joutumiselta seokseen. Tyhjiö voi joillakin materiaaleilla vai-kuttaa sulamislämpötilaan, jolloin yleensä se laskee matalammaksi. Laitteistossa on ne-gatiivinen ja positiivinen elektrodi, joiden välille muodostetaan suuri sähkövirta, joka il-menee valokaarena. Laitteiston tehoa säätelämällä voidaan nostaa tai laskea sulatuksen aiheuttavaa lämpötilaa.

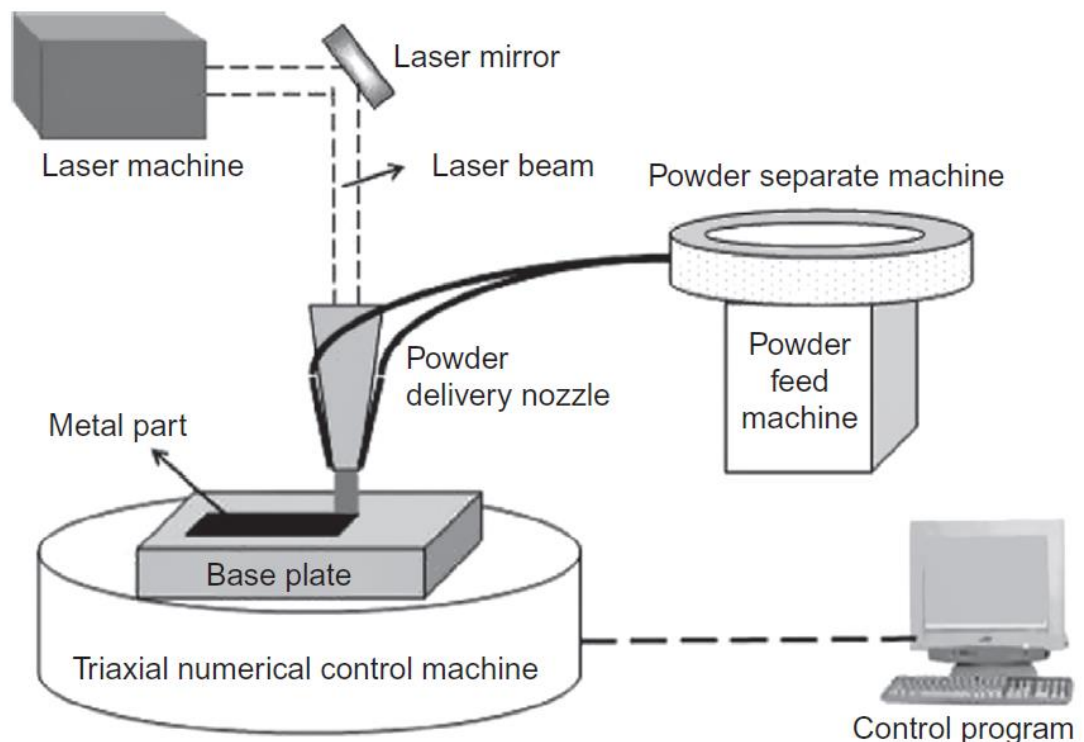


Kuva 14. Esimerkki Valokaarisulatuslaitteistosta [32, s. 2260].

Sulattamisessa ja valamisessa vaikeuksia syntyy etenkin hitaan jäähtymisnopeuden ta-kia, sillä sen aikana voi tapahtua erilaisia erottelumekanismia. Seoksen rakenteesta voi näin ollen tulla helposti heterogeeninen ainakin osittain, mikä taas vaikeuttaa yhtenevien ominaisuuksien saavuttamista. Valun jäähtymisnopeutta säätelämällä voidaan vaikuttaa seoksen faasien muodostumiseen. Nopeampi jäähtyminen vähentää mahdollisten li-säfaasien muodostumista, mikä taas helpottaa materiaalin ominaisuuksien arvioimi-nessä. Yksifaasirakenteet ovat näin ollen helpommin saavutettavissa. On kuitenkin hyvä ottaa huomioon, että riippuen mitä alkuaineita seoksen valmistamiseen käytetään, myös haluttava faasirakenne voi olla hyvin erilainen. Pelkän faasirakenteen perusteella ei voi

tehdä johtopäätöksiä HEA materiaalin ominaisuuksista. Valaminen on siivekkeiden kannalta tärkein valmistusmenetelmä, sillä nykyisissä materiaali ratkaisuisissa käytetään sitä. Näin ollen tuottajilla on jo tarvittu osaaminen kappaleen valmistamisesta. Näin ollen muodonanto on jo käytännössä valmis ja prosessiin tarvittavia muutoksia tehdään esimerkiksi jäähtymisnopeudessa. [33, s. 78]

Eräs toinen hyväksi havaittu valmistusmenetelmä on Laser-engineered net shaping (LENS), jota käytetään erityisesti nopean mallikappaleen valmistamiseen. Prosessissa liikkuvalla pohjalevyllä injektoidaan ja sulatetaan hyvin hienoa metallijauhetta suurtehoisella laserilla. Pohjalevy liikkuu x-y-tasossa ja injektointisuutin pystyy nousemaan ja laskemaan. Laitteisto ohjelmoidaan valmistamaan kappale yksi taso kerrallaan. Näin voidaan valmistaa melko monimutkaisia kappaleita. Prosessin komponentit ovat esitelty kuvassa 15. Laitteistossa käytetään myös hapettumiselta suojaavaa kaasua, jotta jauhe tai sulassa tilassa oleva materiaali säilyttäisi mahdollisimman hyvät ominaisuudet. Tämä on kuitenkin melko hidaskäyttöinen valmistusmenetelmä verrattuna valamiseen samoin kuin tuotantomäärät ovat huomattavasti pienempiä. Näin ollen tämä metodi ei olisi turbiinin siivekkeiden valmistamiseen ideaalisin vaihtoehto. [34]



Kuva 15. LENS 3-D valmistus laitteisto [35, s. 25].

HEA kappaleiden valmistus onnistuu myös sintraamalla. Tässä prosessissa raaka-aineet seostetaan mekaanisesti käyttämällä laitetta, johon laitetaan kuulia raaka-aineen sekaan. Kun konetta pyöritetään, kuulat jauhavat materiaalin suunnitellun kokoiseksi.

Jauhatus tehdään inertissä ympäristössä, jotta seokseen ei pääse haitallisia aineita kuten happea. Kun materiaali on riittävän karkeaa/hieno ja tasaisesti sekoitettua, se voidaan siirtää sintraamista varten muottiin. [36; 37, s. 1–4]

4.4 Ongelmia

Kuten aikaisemmin todettiin korkean entropian seoksissa voi esiintyä monia faaseja tai jopa vain yksi. Tämä riippuu siitä, miten seos valmistetaan ja millainen koostumus materiaalilla on. Materiaalista ei voi tehdä suuria johtopäätöksiä pelkän faasirakenteen perusteella, sillä nämä seokset ovat osoittaneet, ettei niillä aina ole johdon mukaisuutta vaikkakin yleistyksenä monifaasiset rakenteet ovatkin useimmin heikompia kuin yksifaasiset. [33, s. 469–471]

Eräs ongelma HEA:n valmistamisessa on jo aikaisemmin mainittu hapettuminen tai muiden rakenteelle haitallisten aineiden pääseminen seokseen valmistuksen aikana. Näin ollen useat valmistusprosessit tehdään suojakaasun alaisina ja/tai tyhjiössä. Vaikeaa on myös yksittäiskide rakenteen muodostaminen, sillä kiteen muodostuminen vaatii paljon aikaa korkeassa lämpötilassa, jolloin materiaaliin alkaa myös muodostua useampia faaseja. Yksittäiskide onkin siivekkeen rakenteelle tärkeä ominaisuus, jotta sen virumisen vastustaminen olisi tosi hyvä.

Kun alkuaineet eivät ole riittävän tasaisesti jakautuneet komponentissa, seoksen ominaisuudetkaan eivät silloin jakaannu tasaisesti (alkuaineiden erkaantuminen). Tällöin syntyy helposti lokaaleja jännityskertymiä, kun komponentti on kuormituksen alaisena. Jos materiaalista löytyy selkeästi heikompia kohtia, se todennäköisesti myös rikkoutuu sieltä ensimmäisenä.

5. YHTEENVETO

Lentoteollisuus on kasvanut erittäin paljon viime vuosikymmenten aikana. Kehityksen mukana komponenttien materiaalit ovat myös muuttuneet. Paremmilla materiaali valinnoilla saadaan lentokoneisiin lisää nopeutta ja komponentteihin elinikää.

Tavallinen suihkumoottori koostuu imuaukosta, potkurista, aksiaalisesta kompressorista, polttokammioista, turbiinista ja suihkuputkesta. Rakenne vaihtelee eri moottori tyyppien välillä mutta nämä osat löytyvät käytännössä kaikista malleista.

Nykyisinä materiaaleina turbiinin siivekkeessä käytetään supernikkeliseoksia, jotka on päällystetty lämpösuojakeraamilla. Keraami suojaa metallia ja kasvattaa käyttöikää jopa 2-5 kertaiseksi. Nikkeli valetaan ja lämpökäsitellään yksittäiskiteiseksi, koska tällainen rakenne on virumista vastustava ja se on vallitseva muokkautumisprosessi korkeissa lämpötiloissa.

Korkean entropian metalliseoksilla on potentiaali korvata nykyiset supernikkeliseokset siivekkeiden valmistamisessa mutta niiden tutkimusta täytyy lisätä, jotta päästäisiin vastaaviin tuloksiin massatuotannossa. Yksittäiskiteisen rakenteen valmistaminen HEA:aan saattaa aiheuttaa vaikeuksia, sillä kiderakenteen kasvattaminen vaatii tuotteen pitämistä korkeassa lämpötilassa pitkään. Tämä taas kasvattaa uusien faasien muodostumisen todennäköisyyttä, mikä vaikeuttaa yksittäiskiteen valmistamista.

Valaminen on nykyisten siivekkeiden valmistusmetodi ja näin ollen myös HEA komponentti tulisi valmistaa tällä tavalla, jotta tuotanto määrät ovat riittävän suuret. Esimerkiksi LENS ei ole vielä riittävän tehokas tapa tuottaa siivekkeitä. HEA:n valmistaminen on vielä vaikeaa, sillä ne ovat herkkiä haitta-aineille valmistusvaiheessa (esimerkiksi hapettuminen).

LÄHTEET

- [1] ICAO. The World of Air Transport in 2018, saatavissa (viitattu: 5.3.2020): <https://www.icao.int/annual-report-2018/Pages/the-world-of-air-transport-in-2018.aspx>
- [2] M. C. Gao, J-W. Yeh, P. K. Liaw, Y. Zhang, High-Entropy Alloys Fundamentals and Applications, 1st ed. 2016, Cham: Springer International Publishing, 2016.
- [3] Z. Zhang, Microstructures and properties of high-entropy alloys, Progress in materials science, 2014 Apr; 61:1–93.
- [4] Jet Engine (5th Edition), John Wiley & Sons; 2015.
- [5] L. Dwyer, The Aviation History On-Line Museum, The Heinkel He 178, 2012, saatavissa (viitattu: 10.3.2020): <http://www.aviation-history.com/heinkel/he178.html>
- [6] S. Farokhi, Aircraft propulsion, 2nd ed. Chichester, England: Wiley; 2014.
- [7] B. Moore, PLANES, TRAINS AND AUTOMOBILES, Aftermarket Business World, 2013, 05;122(1):10.
- [8] T. W. Lee, Aerospace Propulsion, John Wiley & Sons, Incorporated, 2013. ProQuest Ebook Central, saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=1471796>
- [9] Aircraft jet engine parts, Aerocontact, verkkosivu, saatavissa (viitattu: 3.4.2020): <https://www.aerocontact.com/en/virtual-aviation-exhibition/product/381-aircraft-jet-engine-parts>
- [10] Afterburner, Purdue School of Aeronautics and Astronautics, verkkosivu, saatavissa (viitattu: 3.4.2020): <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/basics/afterburner.html>
- [11] Y. Tamarin, Choosing Optimum Coatings for Modern Aircraft Engine Turbine Blades. In: Protective Coatings for Turbine Blades. ASM International; 2002.
- [12] Viruminen, Tampereen teknillinen yliopisto, saatavissa (viitattu: 3.4.2020): http://www.tut.fi/vmv/2005/vmv_2_1_4.php
- [13] J. Seitzman, Axial Turbines, Blade and Disk Stresses and Vibrations, Georgia Tech College of engineering, verkkosivu, saatavissa (viitattu: 20.4. 2020): http://www.seitzman.gatech.edu/classes/ae4803/turbine_stresses.pdf
- [14] S. Nathan, Jewel in the crown: Rolls-Royce's single-crystal turbine blade casting foundry, The Engineer, verkkosivu, <https://www.theengineer.co.uk/rolls-royce-single-crystal-turbine-blade/>
- [15] I. Dempster, R. Wallis, Heat Treatment Metallurgy of Nickel-Base Alloys, Heat Treating of Nonferrous Alloys, Vol 4E, ASM Handbook, Edited By George E. Totten, ASM International, 2016.

- [16] B. F. Antolovich, *Fatigue and Fracture of Nickel-Base Superalloys*, *Fatigue and Fracture*, Vol 19, ASM Handbook, ASM International, 1996.
- [17] T. Sadowski, P. Golewski, Introduction. In: *Loadings in Thermal Barrier Coatings of Jet Engine Turbine Blades*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 2016. Springer, Singapore.
- [18] X.Q. Cao, R. Vassen, D. Stoeber, Ceramic materials for thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 24, Issue 1, 2004, Pages 1-10, ISSN 0955-2219, saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0955-2219\(03\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0955-2219(03)00129-8).
- [19] N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan, Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. *Science* 2002 Apr 12;296(5566):280-4.
- [20] C. Heveran, J. Xu, S. N. Basu, V. K. Sarin, Design Geometry Optimization of Vertical Cracks in Thermal Barrier Coatings From Simulated Thermal and Mechanical Behavior, 2020, Division of Materials Science and Engineering, Boston University, Brookline, MA. saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/267426416_Design_Geometry_Optimization_of_Vertical_Cracks_in_Thermal_Barrier_Coatings_From_Simulated_Thermal_and_Mechanical_Behavior
- [21] J. Hou, X. Shi, J. Qiao, Y. Zhang, P. K. Liaw, Y. Wu, Ultrafine-grained dual phase Al_{0.45}CoCrFeNi high-entropy alloys, *Materials & Design*, Volume 180, 2019, 107910, ISSN 0264-1275.
- [22] B. S. Murty, J. W. Yeh, S. Ranganathan, *High-Entropy Alloys*, London, England: Elsevier, 2015. Print.
- [23] O. V. Kharissova, M. Mendez-Rojas, B. I. Kharisov, U. O. Mendez, P. E. Martínez, Metal complexes containing natural and artificial radioactive elements and their applications. *Molecules*, 2014. 19(8), 10755-10802.
- [24] G. Qiu, Corrosion characteristics of high entropy alloys. *Materials science and technology*. 2015 Mar 12;31(10):1235–43.
- [25] Periodic table, *Encyclopædia Britannica*, verkkosivu, saatavissa (Viitattu: 1.9.2020): <https://www.britannica.com/science/alkali-metal#/media/1/15617/91>
- [26] S-J. Lin, Breakthrough applications of high-entropy materials. *Journal of Materials Research*, 33(19), 3129-3137, 2018, saatavissa: <http://dx.doi.org.lib-proxy.tuni.fi/10.1557/jmr.2018.283>
- [27] D. A. Porter, K. E. Easterling, M. Sherif, *Phase Transformations in Metals and Alloys (Revised Reprint)*. Boca Roca: Taylor & Francis Group; 2009.
- [28] E. Rathakrishnan, *High Enthalpy Gas Dynamics*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2015. ProQuest Ebook Central.
- [29] Y. Zhang et al. Microstructures and Properties of High-Entropy Alloys, *Progress in materials science*, Volume 61, 2014, verkkosivu, saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.10.001>.
- [30] W. Li, Creep, fatigue, and fracture behavior of high-entropy alloys. *Journal of materials research*. 2018 Oct 14;33(19):3011–34.

- [31] D. Kay, Partial Pressure Brazing, Vac Aero International Inc. verkkosivu, saatavissa (viitattu: 1.9.2020): <https://vacaero.com/information-resources/vacuum-brazing-with-dan-kay/790-partial-pressure-brazing.html>
- [32] Y.Y. Chen, T. Duval, U.D. Hung, J.W. Yeh, H.C. Shih, Microstructure and electrochemical properties of high entropy alloys—a comparison with type-304 stainless steel, *Corrosion Science*, Volume 47, Issue 9, 2005.
- [33] S. Miracle, A critical review of high entropy alloys and related concepts, *Acta materialia*, 2017 Jan;122:448–511.
- [34] E-H. Attar, Comparative study of commercially pure titanium produced by laser engineered net shaping, selective laser melting and casting processes, *Materials science & engineering A, Structural materials: properties, microstructure and processing*, 2017 Sep 29;705:385–93.
- [35] C. Zhao, Research on laser engineered net shaping of thick-wall nickel-based alloy parts, *Rapid prototyping journal*. 2009 Jan 16;15(1):24–8.
- [36] R. B. Mane, B. B. Panigrahi, Sintering mechanisms of mechanically alloyed CoCrFeNi high-entropy alloy powders, *Journal of materials research*, 2018 Oct 14;33(19):3321–9.
- [37] M. S. El-Eskandarany, *Mechanical alloying for fabrication of advanced engineering materials*. Norwich, N.Y: Noyes Publications/W. Anderew Pub.; 2001.