



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JAAKKO MUSTONEN
HITSAUSLIITOKSET MODERNEISSA LENTOKONEISSA

Kandidaatintyö

Tarkastaja: Projektipäällikkö Jussi
Aaltonen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
27. 9. 2017

TIIVISTELMÄ

Jaakko Mustonen: Hitsausliitokset moderneissa lentokoneissa / Welding Processes and Applications in Modern Airplanes

Tampereen teknillinen yliopisto

kandidaatintyö 29 sivua

Lokakuu 2017

Teknisten tieteiden tutkinto-ohjelma

Tarkastaja: Projektipäällikkö Jussi Aaltonen

Avainsanat: hitsaus, lentokoneiden hitsaus, hitsausliitokset lentokoneissa, hitsausmenetelmät, hitsi, hitsisauma, liitosmenetelmät, tulevaisuuden lentokoneet, kitkahitsaus pyörivällä työkalulla.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia hitsauksen käyttöä liitosmenetelmänä nykyaikaisissa lentokoneissa sekä arvioida hitsausteknologian tulevaisuutta lentokoneiteollisuudessa. Työssä tutkittiin lentokoneiden valmistuksessa yleisimmin käytettyjä hitsausmenetelmiä sekä niiden käyttökohteita eri ilmailualoilla, luotiin katsaus hitsauksen käyttöön kunnossapidossa sekä tarkasteltiin hitsausteknologian uusimpia trendejä lentokonevalmistuksessa. Tulevaisuuden lentokoneissa uudet hitsausmenetelmät kuten laser- ja kitkahitsaus pyörivällä työkalulla tulevat syrjäyttämään niittien käytön metalliliitoksissa. Hitsauksen nopeus ja automatisoitavuus tekevät lisäksi metallirunkorakenteista varten otettavan kilpailijan komposiittirakenteiden käytölle lentokoneiden valmistusmateriaalina tulevaisuudessa.

ALKUSANAT

Työn aiheen valintaan vaikutti oleellisesti kolmen kesän pituinen työsuhteeni Tampereen vedellä konekunnossapidossa, missä opin työstämään metallia ja hitsaamaan pui-kolla sekä MIG- ja TIG-hitsillä. Kiitokset erityisesti verstaan jätkille, jotka opastitte alusta alkaen ja annoitte vastuuta toteuttaa haastaviakin metallitöitä.

Tampereella, 10.1.2018

Jaakko Mustonen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | LENTOKONETEOLLISUUDEN YLEISIMMÄT HITSAUSMENETELMÄT | 2 |
| 2.1 | Sulahitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa | 2 |
| 2.1.1 | Kaarihitsaus..... | 2 |
| 2.1.2 | Sädehitsaus..... | 4 |
| 2.1.3 | Plasmahitsaus | 5 |
| 2.2 | Vastushitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa | 5 |
| 2.2.1 | Pistehitsaus..... | 6 |
| 2.2.2 | Leimuhitsaus | 7 |
| 2.3 | Kiinteän tilan hitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa | 7 |
| 2.3.1 | Kitkahitsaus..... | 7 |
| 2.3.2 | Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla | 8 |
| 3. | HITSAUS LIITOSMENETELMÄNÄ ERI ILMAILUALOILLA | 10 |
| 3.1 | Hitsauksen käyttö liikenneilmailussa | 10 |
| 3.2 | Hitsauksen käyttö yleisilmailussa | 12 |
| 3.3 | Hitsauksen käyttö sotilasilmailussa..... | 14 |
| 4. | HITSAUKSEN MERKITYS LENTOKONEIDEN KUNNOSSAPIDOSSA..... | 17 |
| 5. | HITSAUS TULEVAISUUDEN LENTOKONEISSA | 20 |
| 6. | YHTEENVETO | 24 |
| | LÄHTEET | 25 |

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|-----|--|
| FSW | engl. friction stir welding eli kitkahitsaus pyörivällä työkalulla |
| MIG | Metal-arc Inert gas |
| MAG | Metal-arc Active gas |
| TIG | Tungsten Inert Gas Arc Welding |
| TWI | The Welding Institute |
| FAA | Federal Aviation Administration |
| ADR | Aircraft Ducting Repair inc. |
| NDT | engl. none-destructive testing eli ainetta rikkomaton testaus |

1. JOHDANTO

Hitsausta voidaan pitää taloudellisimpana ja tehokkaimpana tapana liittää metalleja yhteen. Se on myös ainoa tapa, jolla kaksi tai sitä useampi kappale saadaan toimimaan yhtenä elementtinä. (Cary 1998) Hitsausta on hyödynnetty liitosmenetelmänä lentokoneiteollisuudessa ensimmäisistä kaupallisista lentokoneista lähtien (FAA 2012). Hitsausmenetelmät ovat sittemmin kehittyneet, ja hitsausteknologian käyttö nykyään vaihtelee lentokonetyypin ja hitsattavan komponentin käyttötarkoituksen mukaan.

Tämän kirjallisuusselvityksen tarkoituksena on luoda lukijalle yleiskuva nykyaikaisissa lentokoneissa käytetyistä hitsausmenetelmistä, niiden käyttökohteista, ja luoda katsaus hitsausteknologian tulevaisuuteen lentokoneiteollisuudessa, jossa kasvavana trendinä on lisätä ei-hitsattavia komposiittimateriaaleja lentokoneisiin. Moderneista lentokoneista puhuttaessa työ on rajattu käsittelemään nykyaikaista lentokonekalustoa, jota näkee edelleen aktiivisessa käytössä lentolaivueissa ympäri maailmaa.

Seuraavassa luvussa esitellään lentokoneiden hitsauksessa yleisimmin käytetyt hitsausmenetelmät, jotka voidaan jakaa sulahitsausmenetelmiin, vastushitsausmenetelmiin ja kiinteän tilan hitsausmenetelmiin. Kolmannen luvun tarkoituksena on esitellä lukijalle hitsausteknologian yleisiä käyttötarkoituksia eri ilmailualoilla, joista perehdytään liikenneilmailuun, yleisilmailuun ja sotilasilmailuun. Neljännessä luvussa käsitellään hitsauksen merkitystä lentokoneiden kunnossapidon kannalta ja viidennessä tutkitaan hitsausteknologian suuntaa tulevaisuuden lentokoneita valmistettaessa. Selvitystyö päättyy yhteenvetoon, jossa tiivistetään työn tärkeimmät havainnot ja otetaan kantaa kysymykseen: tarvitaanko hitsausta tulevaisuuden lentokoneissa.

2. LENTOKONETEOLLISUUDEN YLEISIMMÄT HITSAUSMENETELMÄT

Hitsausprosessit jakautuvat kolmeen pääkategoriaan, jotka ovat sulahitsaus, vastushitsaus ja kiinteän tilan hitsaus. Hitsausprosessit jakautuvat edelleen eri hitsausmenetelmiin. Lentokoneiden rakenteita hitsattaessa merkittävimmät hitsausmenetelmän valintaan vaikuttavat tekijät ovat hitsattavan rakenteen kriittisyys kestävyuden kannalta, hitsattava materiaali, hitsausmenetelmän hinta ja syntyvän hitsisauman mekaaniset ominaisuudet. Erityisesti lentokonerakenteissa käytetyt erilaiset alumiini- ja titaaniseokset sekä muut erikoismetallit rajaavat hitsausmenetelmän valintaa. Myös hitsisauman mekaaniset ominaisuudet, kuten lujuus ja väsymisenkesto, ovat tärkeitä parametreja hitsausmenetelmää valittaessa.

2.1 Sulahitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa

Sulahitsauksessa liitos muodostuu paikallisesta sulamisesta hitsattavien kappaleiden välillä. Liitoskohtaan lisätään sulamisen yhteydessä usein myös metallille sopivaa lisäainetta. (Atkins & Escudier 2013)

2.1.1 Kaarihitsaus

Kaarihitsauksessa metallikappaleiden välille tuotu lämpö sulattaa perusaineen ja yhdessä sulaan metalliin lisätyn täyteaineen kanssa muodostaa kappaleiden välille hitsausliitoksen (Lincoln Electric 2017). Kaarihitsaukseen kuuluva MIG/MAG-hitsaus eli metallikaarihitsaus (Metal-Arc Inert Gas sekä Metal-Arc Active Gas) on maailmalla yleisin hitsausprosessi, mutta vähemmän käytetty menetelmä lentokoneita hitsattaessa (Eagar & Mendez 2001; ESAB 2017).

MIG/MAG eli yleisnimitykseltään MIG-hitsauksen heikon soveltuvuuden lentokoneteollisuuteen selittää prosessista syntyvä suuri lämmönvaikutusalue, joka aiheuttaa vääristymiä kappaleisiin ja heikentää hitsin mekaanisia ominaisuuksia (Eagar & Mendez 2001). Hitsin poikkileikkaus, missä saumakohta leviää laajalle perusaineeseen, kertoo käytetyn hitsausprosessin laajasta lämmönvaikutusalueesta.

Metallikaarihitsausta soveltuvampi hitsausmenetelmä lentokonevalmistukseen on menetelmää muistuttava TIG-hitsaus (Tungsten Inert Gas Arc Welding), jossa työkappaleeseen tuotu lämpö on huomattavasti keskitetympi, sillä lämpöä synnyttävä valokaari lähtee

tarkoin hallittavasta sulamattomasta volfrاميةlektrodista vauhdilla syötetyn lisäaineen sijaan, kuten MIG-hitsauksessa.

Käsin tehdyssä TIG-hitsauksessa metallia sulatetaan yhdellä kädellä pidetyllä polttimella, josta lähtee suojakaasun ympäröimänä valokaari. Toisella vapaalla kädellä annostellaan tarvittaessa lisäainetta metrin pituisesta lisäainelangasta, jonka kemiallinen koostumus vastaa yleensä perusainetta (ESAB 2017). Kuvassa 1 hitsataan ruostumatonta terästä TIG-hitsillä.



Kuva 1. Ruostumattoman teräsrakenteen hitsaamista TIG-hitsillä.

Lentokoneteollisuutta varten kehitetty TIG-hitsaus soveltuu hyvin ruostumattomille teräksille, erikoismetalleille ja ohuille ainepaksuuksille (Williams 2012; ESAB 2017). Menetelmän etuina ovat sen edullisuus, kohtalaisen hyvä tarkkuus ja monikäyttöisyys. TIG-hitsaus on lentokoneteollisuuden käytetyin hitsausmenetelmä (Nascimento et al. 2011).

Alumiinin TIG-hitsaus on mahdollista, mutta haasteellista materiaalin hapettumiskäyttäytymisen vuoksi (Lincoln Electric 2017). Esimerkiksi lentokoneissa yleisesti käytettyjen lämpökäsiteltyjen kovien alumiinien hitsaus on johtanut sauman haurastumiseen,

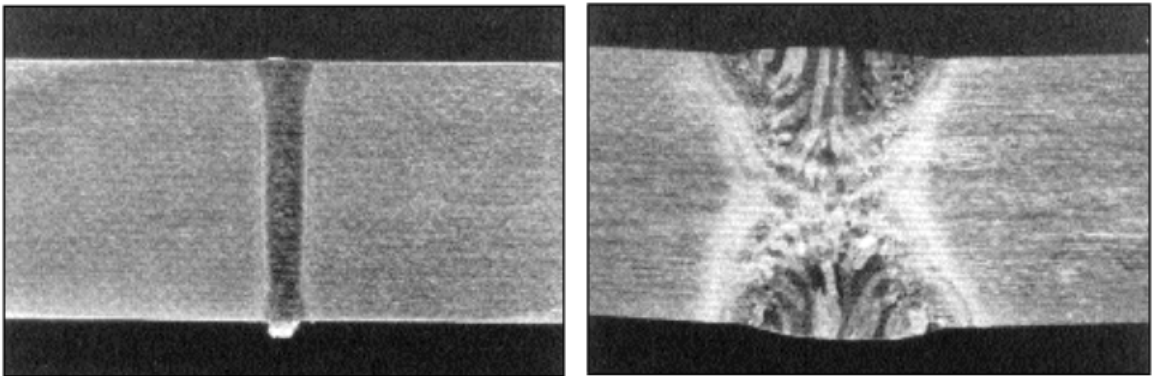
murtumiseen ja sauman huomattavasti pienentyneeseen myötölujuuteen (National Research Council 1996).

TIG-hitsauksen yleisimmät käyttökohteet suurissa lentokoneissa ovat sekundääriset rakenteet, kuten ilmanvaihtoputket, säleiköt ja pakoputkistot (Eagar & Mendez 2001; Williams 2012). National Research Councilin määritelmän mukaan (1996 s. 7) rakenne luokitellaan sekundääriseksi, mikäli sen katastrofaalinen pettäminen ei johda lentokoneen tuhoon. Vastaavasti rakennetta kutsutaan primäärirakenteeksi, jos sen pettäminen johtaa väistämättä lentokoneen menetykseen.

TIG-hitsauksen käyttöön pienemmän kokoluokan lentokoneissa perehdytään seuraavassa luvussa. Rakenteellisesti vaativille kohteille sopivimmat hitsausmenetelmät ovat seuraavaksi esiteltävät sädehitsausmenetelmät.

2.1.2 Sädehitsaus

Elektronisäde- ja laserhitsaus ovat korkean intensiteetin hitsausprosesseja. Menetelmien etuina ovat muun muassa hitsausprosesseista paras lämmönkeskitys, korkea tarkkuus, laatu, hitsatun kappaleen minimaalinen vääristymä ja hyvä tunkeuma eli hitsisauman syvyys. (Eagar & Mendez 2001; Element 2016; TWI 2017) Kuvassa 2 on esitettyä elektronisäde- ja TIG-hitsattujen päittäisliitosten poikkileikkaukset. Elektronisädehitsatussa työkappaleessa on TIG-saumaan verrattuna selvästi pienempi hitsin fuusioitumisalue ja liitettyjen kappaleiden ei-toivottu vääntymä eli vetely.



Kuva 2. Vasemmalla elektronisäde- ja oikealla TIG-hitsattu päittäisliitos (Eagar & Mendez 2001).

Laserhitsauksessa keskitetty säde fotoneja sulattaa metallia työstettävien kappaleiden liitospohdasta ja viiletessään muodostaa sauman. Säteen keskitetty lämmöntuonti saa aikaan perinteisiä sulahitsausmenetelmiä pienemmän lämmönjakautumisalueen parantaen

syntyvän hitsin laatua. (Eagar & Mendez 2001; Element 2016) Tässä menetelmässä myös jäännösjännitykset ja vetely jäävät minimiin (Schubert et al. 2001).

Laserhitaustekniikoita on kaksi perustekniikkaa: keyhole- ja conduction welding menetelmät. Käytetyin on keyhole-tekniikka menetelmästä syntyvän kapean mutta syvän hitsisauman takia. Kyseinen tekniikka on kuitenkin altis huokoisuudelle, sillä nopeasti syntyvän sulan sisälle saattaa jäädä kaasua. Conduction welding on keyhole menetelmää vakaampi, sillä sulamisesta aiheutuvaa höyryä esiintyy vähemmän. (Okon et al. 2002, Boehm 2005 mukaan)

Elektronisädehitsauksessa fokusoitu säde elektroneja osuu hitsattavaan kappaleeseen nopeudella kaksi kolmasosaa valonnopeudesta tyhjiössä. Syntyvä säde on hyvin kapea, ja sen energiatiheys on erittäin korkea, luokkaa 10^5 W/mm². (TWI 2017) Elektronisädehitaus on laserhitausta tehokkaampi menetelmä, sillä sulasta materiaalista ei heijastu säteitä pois päin, kuten laserhitsauksessa. Elektronisädehitausta rajoittaa kuitenkin prosessin herkkyys hapettumiselle, minkä takia elektronisädehitsauksen on tapahduttava tyhjiössä. Tyhjiössä tapahtuva hitsaus kasvattaa kustannuksia huomattavasti erityisesti suuria työkappaleita hitsattaessa (Eagar & Mendez 2001; Atkins et al. 2013).

Tyhjiössä tapahtuva hitsaus sopii erityisesti titaaniseoksille, jotka eivät ole hitsattavissa ilmakehässä. Automaation ja hallintalaitteiston kehitys on mahdollistanut monimutkaisten ja ainepaksuudeltaan suurien muotojen hitsauksen ja hitsaussyvyuden automaattisen säätelyn elektronisädehitsauksella. (Eagar & Mendez 2001)

2.1.3 Plasmahitsaus

Plasmahitsaus on TIG-hitausta muistuttava kaarihitsausmenetelmä, jossa kappaleeseen kohdistettu valojuova syntyy terävän elektrodin kärjestä. Plasmahitsauksessa elektrodi on sijoitettu syvemmälle hitsauskärkeen suojakaasun ulottumattomiin, toisin kuin TIG-hitsauksessa. Hitsisauma syntyy sulan plasman virratessa kuparisuuttimen läpi työstettävään kappaleeseen. (TWI 2017)

Lentokoneteollisuutta varten kehitetyssä variable-polarity plasma arc welding (VPPA) hitsausmenetelmässä pystytään sädehitsauksen tavoin hitsaamaan paksuja metallikappaleita, vaikka yhtä suuriin tunkeumiin ei plasmahitsauksella päästä. VPPA soveltuu erityisen hyvin keskipaksujen alumiinikappaleiden hitsaamiseen. (Eagar & Mendez 2001)

2.2 Vastushitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa

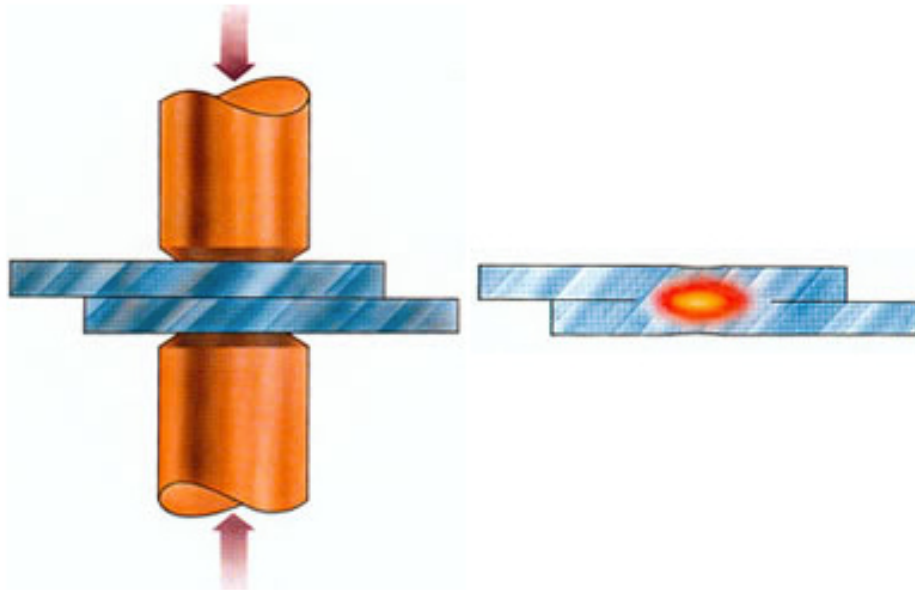
Vastushitsauksessa vastuslämpö ja puristusvoima saavat aikaan hitsausliitoksen. Vastuslämpöä kehittyy työkappaleiden kosketuspinnalle, kun virtapiiriin on kytketty sähkövir-

ta. Syntyvän lämmön ja paineen ansiosta pehmeät ja osittain sulaneet pinnat liittyvät yhteen. (ESAB 2017) Lentokoneteollisuudessa käytetyimmät vastushitsausmenetelmät ovat piste- ja leimuhitsaus.

2.2.1 Pistehitsaus

Pistehitsauksessa elektrodikärjet puristavat kahta hitsattavaa kappaletta yhteen. Kun virtapiiriin tuodaan virta, työkappaleet vastustavat virran kulkua, synnyttävät lämpöä ja ajan kuluttua kappaleiden väliin muodostuu hitsi. Menetelmän toimintaperiaate on esitetty kuvassa 3. Virran kulkuun vaadittu aika riippuu valitusta materiaalista ja sen paksuudesta, virtapiirissä kulkevan virran suuruudesta ja elektrodikärkien kosketuspinta-alasta työkappaleisiin. (Miller 2017)

Aikaisemmin esitetyistä hitsausmenetelmistä ainoastaan pistehitsauksella voidaan tehdä liitos suoraan työkappaleiden väliin eli syntyvän rakenteen sisälle. Pistehitsauksen hyötyjä ovat sen edullisuus ja automatisoitavuus. Pistehitsaus on autoteollisuudessa käytetyin hitsausprosessi, mutta lentokoneteollisuudessa sen laajempaa käyttöä rajoittaa prosessin ajoittainen huono luotettavuus ja alumiinin huono hitsattavuus. (Eagar & Mendez 2001)



Kuva 3. Pistehitsauksesta syntyvä liitos (ESAB 2017).

Eagar & Mendez (2001 s. 41) mukaan General Electricin kehittämä variantti pistehitsauksesta kykenee mittaamaan elektrodien siirtymää millimetrin tarkkuudella, parantaen prosessin laatua huomattavasti. Kehitetyllä menetelmällä hitsataan muun muassa nikke-

lipohjaisia seosmetallilevyjä Inconel 625 ja Inconel 718 hävittäjälentokoneiden jälkipolttimeihin.

2.2.2 Leimuhitsaus

Leimuhitsaus on työkappaleiden päittäisliittämismenetelmä, jossa liitos syntyy lyhyen valokaaren ja paineen avulla (Eagar & Mendez 2001). Esilämmitysvaiheessa liitettäviä pintoja pidetään hieman irti tai kevyessä kosketuksessa, jolloin työkappaleissa kulkeva sähkövirta saa aikaan lyhyitä valokaaria hitsattavien pintojen välille. Kappaleiden lämmentyä haluttuun asetusarvoon työkappaleet liitetään nopeasti yhteen eli tyssätään. (ESAB 2017)

Leimuhitsauksella on mahdollista aikaansaada hitsausliitoksia, jotka ovat yhtä kestäviä kuin itse perusaine. Menetelmän etuja ovat myös monimutkaisten poikkileikkauksien sekä alumiinin ja lämmönkestävien metallien hitsattavuus. Leimuhitsaus ei myöskään vaadi suojakaasun käyttöä tai hitsattavien pintojen esikäsitteilyä. Leimuhitsauksen käyttökohteita lentokoneteollisuudessa ovat muun muassa alumiinisten laskeutumistelineiden valmistus sekä suihkumoottoreissa käytettyjen rengasrakenteiden yhteenliittäminen. (Eagar & Mendez 2001)

2.3 Kiinteän tilan hitsausmenetelmät lentokoneteollisuudessa

Hitsausta, jossa liitosten tekeminen ei vaadi kappaleiden sulamista, kutsutaan kiinteän tilan hitsaamiseksi. Työkappaleet liitetään yhteen paineen avulla, ja kestävä liitos edellyttää pinnoilta puhtautta muun muassa oksidikerroksilta, jäännösmateriaaleista, metallin työstämiseen tarkoitetuista jäähdytysnesteistä ja muilta epäpuhtauksilta. (Kalpakjian & Schmid 2010) Lentokoneteollisuuden käytetyimmät kiinteän tilan hitsausmenetelmät ovat perinteinen kitkahitsaus ja kitkahitsaus pyörivällä työkalulla.

2.3.1 Kitkahitsaus

Kitkahitsauksessa yhtä työkappaletta pyöritetään suurella nopeudella samalla kun toista paikallaan olevaa kappaletta työnnetään pyörivää työkappaletta vasten. Kun kappaleiden välille on syntynyt riittävästi kitkasta aiheutuvaa lämpöä, pyörimisliike lopetetaan. Työkappaleet liittyvät yhteen paineen avulla lämmenneiden kosketuspintojen jäähdyttyä. (TWI 2017)

Kitkahitsaus rajoittuu pääsääntöisesti poikkileikkaukseltaan pyöriviin kappaleisiin. Menetelmän suurimpia hyötyjä ovat eri materiaaleista valmistettujen työkappaleiden yhteenliittäminen sekä erinomainen mekaanisten ominaisuuksien säilyminen liitoskohdas-

sa. (Eagar & Mendez 2001; TWI 2017) Muita kitkahitsauksen etuja ovat prosessin nopeus, edullisuus ja yksinkertaisuus (TWI 2017).

Kitkahitsausta pystytään hyödyntämään esimerkiksi liitoskohdissa alumiiniseoksien ja ruostumattomien teräksien sekä alumiiniseoksien ja titaanin välillä (TWI 2017). Lentokoneteollisuudessa kitkahitsauksen käyttökohteita ovat muun muassa suihkumoottoreiden turbiinien akselit sekä alumiinista valmistetut laskeutumistelineet (Eagar & Mendez 2001; TWI 2017).

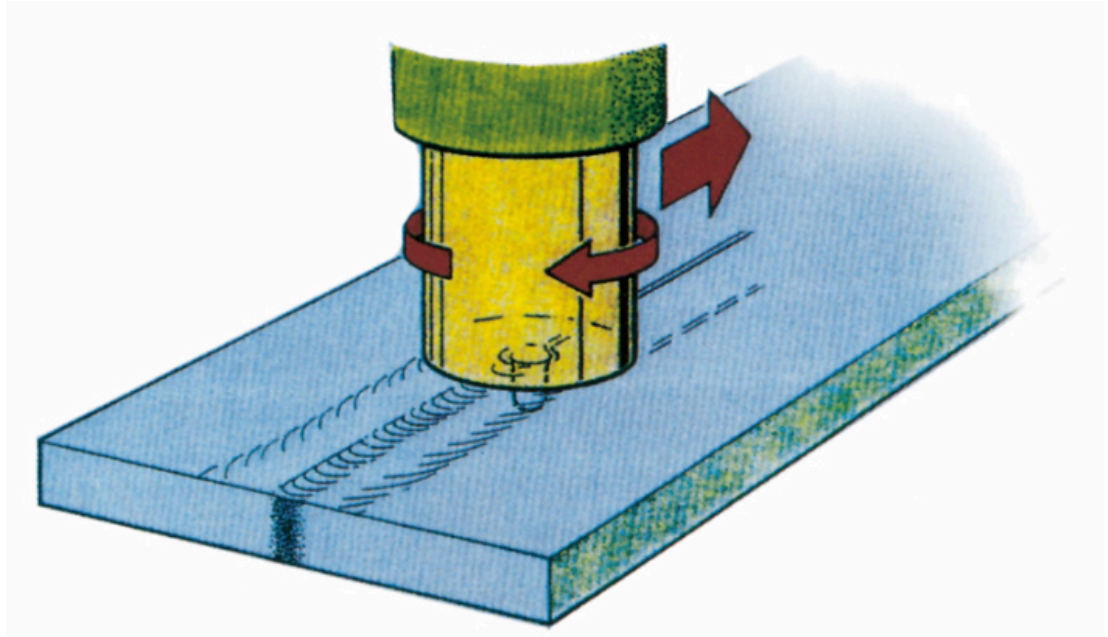
2.3.2 Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla

Hitsausmenetelmistä uusimpiin kuuluu The Welding Instituten (TWI) vuonna 1991 keksimä kitkahitsaus pyörivällä työkalulla, englanniksi Friction Stir Welding eli FSW (Eagar & Mendez 2001; TWI 2017).

Menetelmässä kahden toisiaan vasten puristetun työkappaleen väliin tuodaan pyörivä työkalu, jossa on profiloitu kärkiosa. Tämä työkalu tunkeutuu liitoskohtaan ja hitaasti edeten lämmittää perusainetta pyörimisestä aiheutuvalla kitkalla. Lämmennyt perusaine plastisoituu työkalun alla ja työntyy hitsauskärjen etenemissuuntaan nähden pyörivän työkalun taakse. Tuloksena on lujittunut kiinteän tilan hitsi. (TWI 2017; ESAB 2017) Kuvassa 4 on esitettyä FSW:ssä käytetty pyörivä työkalu, ja sen liike kahden hitsattavan levyn välissä. Sauma on myös mahdollista kitkahitsata molemmilta puolin levyä, jos levyn toiselle puolelle asetetaan vastaavanlainen pyörivä työkalu (ESAB 2017).

Kitkahitsauksen edut pyörivällä työkalulla ovat huomattavat: menetelmä ei vaadi lisäaineen tai suojakaasun käyttöä, hitsattavat työkappaleet eivät vaadi erityistä railon valmistusta, hitsattuun rakenteeseen kohdistuu minimaalinen vetely, sama kemiallinen koostumus hitsi- ja perusaineessa, soveltuvuus aiemmin vaikeasti hitsattaville materiaaleille sekä erinomaiset liitosten ominaisuudet. (Eagar & Mendez 2001; ESAB 2017; Martin Šrubař 2009) Prosessin haittapuolina ovat muun muassa pienet jäännösjännitykset ja pieni havaittava lämmönvaikutusalue (Eagar & Mendez 2001).

FSW:sta saavutettavat hyödyt sopivat erinomaisesti lentokoneteollisuuden tarpeisiin. Esimerkiksi lentokoneissa useasti käytettyjä 2XXX ja 7XXX sarjan alumiiniseoksia pidettiin mahdottomana hitsata ennen FSW:n keksimistä (Eagar & Mendez 2001; Martin Šrubař 2009).



Kuva 4. Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla (ESAB 2017).

Erittäin merkittävänä löytönä voidaan myös pitää FSW –hitsatun sauman mekaanisia ominaisuuksia. Pyörivällä työkalulla kitkahitsatun sauman lujuus on 30-50 % kaarihitattua saumaa suurempi (Eagar & Mendez 2001). Vähintään yhtä merkittävänä ominaisuutena voidaan pitää FSW –hitsatun sauman väsymisenkestävyyttä, joka vastaa kestävyydeltään niitattuja liitoksia (Eagar & Mendez 2001; Lertora 2013) FSW:n käyttökohteisiin ja tulevaisuuteen lentokoneteollisuudessa syvennyttään enemmän seuraavissa luvuissa.

3. HITS AUS LIITOSMENETELMÄNÄ ERI ILMAILUALOILLA

Hitsauksen käyttö lentokonerakenteiden liitosmenetelmänä vaihtelee lentokoneen käyttötarkoituksen mukaan. Lentokonetyypit voidaan karkeasti jakaa kuuluvan liikenneilmailuun, yleisilmailuun tai sotilaalliseen ilmailuun, joissa hitsausta hyödynnetään eri tavoin. Hitsauksen käyttöasteeseen ja käyttötarkoituksiin eri lentokonetyypeissä vaikuttaa muun muassa liitosten vaatimukset luotettavuuden suhteen ja syntyvien valmistuskustannuksien suuruus.

3.1 Hitsauksen käyttö liikenneilmailussa

Liikenneilmailuun lukeutuu kaupallinen lentoliikenne, jonka tarkoituksena on kuljettaa matkustajia, rahtia tai postia maksua tai vuokraa vastaan (Finavia 2017). Hitsattavat kohteet kaupalliseen lentoliikenteeseen tarkoitetuissa lentokoneissa ovat melko samanlaisia keskenään.

2000-luvun taitteessa käytössä olevien lentokoneiden rakenteellisena materiaalina käytettiin 70-prosenttisesti alumiinia. (Fridlyander 2001). Pääsääntöisenä liitosmenetelmänä lentokoneissa on yli viidenkymmenen vuoden ajan käytetty niittausta sen hyvän kuormankantokyvyn ja väsymisenkestävyyden takia (Heintz 1986). Fridlyander (2001 s. 7) mukaan niittaus on jatkunut lentokoneiden pääsääntöisenä liitosmenetelmänä aina 2000-luvulle asti. Alumiinin vaikea hitsattavuus, ja hitsisaumojen yleisesti huono väsymisenkestävyys ovat johtaneet niittien käyttöön lentokoneiden pääsääntöisenä liitosmenetelmänä. Hitsattavia kohteita perinteisissä matkustaja- ja rahtikoneissa saadaan etsiä muualta kuin koneen kantavista rakenteista.

Matkustajalentokoneiden yksityiskohtaisimmista rakenneratkaisuista on saatavilla melko vähän tietoa. Lentokoneyhtiöille hitsauspalveluja tarjoavat yritykset sekä Yhdysvaltain ilmailuhallinnon (FAA eli Federal Aviation Administration) teettämä opas lentokoneiden hitsaukseen kuitenkin valottavat hitsattavia kohteita liikenneilmailuun tarkoitetuissa lentokoneissa. Yleisimpiä hitsattavia kohteita matkustajalentokoneissa ovat ohutlevytuotteet.

Eagar & Mendez (2001 s. 42) mukaan suurin osa kaupallisten liikennelentokoneiden ilmanvaihtoputkista on koottu TIG-hitsaamalla. Yhdysvaltalainen lentokoneiden hitsaukseen perehtynyt yritys Dynamic Fabrication, inc. mainitsee hitsauskohteikseen pakoputkistot ja niiden äänenvaimentimet. FAA-valtuutettu yritys Aircraft Ducting Repair inc.

eli ADR on erikoistunut lentokoneiden ilmanvaihtokanavien valmistukseen ja korjaamiseen. ADR (2017) mainitsee internetsivuillaan yleisimmiksi hitsattaviksi komponentteikseen ilmanvaihtokanavat, ohutlevyputket ja apuvoimalaitteiden äänenvaimentimet.

Muita matkustajalentokoneen hitsattavia kohteita ovat suihkumoottorin hitsaamalla valmistetut komponentit, kuten aiemmin hitsausmenetelmien yhteydessä mainitut kitkahitsattu turbiinin akseli ja leimuhitsaamalla valmistetut suihkumoottorin rengasrakenteet. Suihkumoottorin hitsaamalla valmistettuja komponentteja käytetään suihkumoottorista riippuen niin liikenneilmailuun kuin sotilasilmailuun tarkoitetuissa lentokoneista. Lisäksi lentokoneiteollisuudessa yleisesti esiintyvä hitsattava kohde on lentokoneiden polttoainesäiliö hitsisauman tiiveyden vuoksi. (National Research Council 1996).

Rahtilentokoneiden hitsattavat kohteet ovat toiminnallisilta osiltaan pitkälti samoja kuin matkustajalentokoneidenkin. Matkustajalentokoneista poiketen rahtilentokoneissa hitsattavia rakenteita voi esiintyä suuremmissa määrin rahdin kiinnitykseen tarkoitetuissa laitteissa. Esimerkiksi Nordstrommin (1977 s. 1) patentoima neljän auton ilmakuljetukseen tarkoitettu kehikko on valmistettu hitsaamalla.

Liikenneilmailussa käytetyn liitostekniikan uusimpia käyttökohteita hitsauksen kannalta ovat muutamissa lentokonetyypeissä käytetty kitkahitsaus pyörivällä työkalulla sekä Airbussin käyttämä laserhitsaus A318, A380 ja A340 matkustajalentokoneiden rakenteissa (Pacchione & Telgkamp 2006). Eclipse Aviationin valmistama Eclipse 500 liikelentokone on ensimmäinen pääsääntöisesti hitsaamalla valmistettu lentokone (Boehm 2005). Eclipse 500:n ulkopaneelien liitos on samalla kitkahitsauksen ensimmäinen suuren kapasiteetin käyttökohde lentokoneiteollisuudessa (Kallee et al. 2001). Kyseisen lentokoneen kitkahitsatut runko ja siivet on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. *Eclipse 500 liikelentokoneen kitkahitsattu runko ja siivet (Pacchione & Telgkamp 2006).*

Kitkahitsaamalla lentokoneen ulkopaneelit saavutetaan kustannussäästöjä painon suhteen, sillä hitsatut rakenteet eivät mene päällekkäin kuten niitatut rakenteet, eikä erillisiä kiinnittimiä kuten nittejä tai ruuveja tarvita. Primäärirakenteiden hitsauksen muita hyötyjä ovat prosessin hyvä automatisoitavuus ja päällekkäin meneviin rakenteisiin verrattuna rakenteen helpompi tarkastettavuus (Pacchione & Telgkamp 2006).

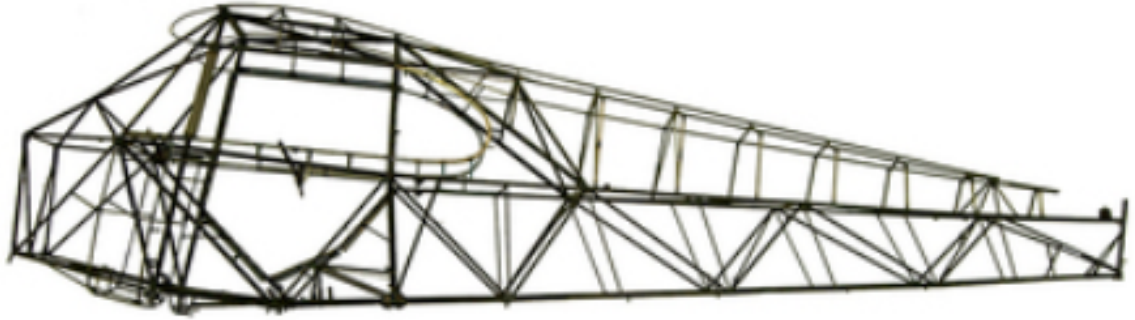
Matkustajalentokonevalmistaja Airbus on laserhitsausteknologian johtava toimija lentokonerakenteiden liitoksissa. Airbussin A318 matkustajakoneessa on kaksi, A380 kahdeksan ja A340 lentokoneessa neljätoista lasersädehitsauksella koottua runkopaneelia. Hitsatut runkopaneelit mahdollistavat minimaalisen painon ja tuotantokustannukset. Airbussin kerrotaan myös hyödyntäneen kitkahitsausta A380 matkustajakoneen runkopaneelien yhteenliittämisessä. (Pacchione & Telgkamp 2006)

3.2 Hitsauksen käyttö yleisilmailussa

Yleisilmailuksi luetaan kaikki ilmailutoiminta lukuun ottamatta kaupallista ilmakuljetusta (Trafi 2017). Yleisesti ottaen yleisilmailuun, kuten harrastelentämiseen, tarkoitettu lentokonekalusto koostuu muutaman henkilön istuttavista, kevyistä yksimoottorisista lentokoneista.

Suurimpien lentokoneiden yleisin runkorakenne on ns. puolikuori-rakenne, jossa runko muodostuu pitkittäisistä tuista (longeron), poikittaisista tuista (bulkhead), poikittaisten tukien välisistä kovikkeista (stringer) ja rungon ulkokuoresta (skin). Yleisilmailulle tyypillisissä pienkoneissa runko koostuu usein hitsatuista teräksisistä ristikkorakenteisista, joilta vaaditaan kestävyyttä sekä puristus- että vetokuormilta. (FAA 2012). Seuraavalla sivulla kuvassa 6 on esitetty erään pienkoneen ristikkorunko. Rungon lisäksi pienkoneille ja muille potkurikoneille tyypillisiä hitsaamalla valmistettuja komponentteja ovat moottorin kiinnikkeet, jotka ovat putkesta hitsattuja kehikkoja, joiden tarkoituksena on yhdistää moottori lentokoneen runkoon.

Ristikkorakenteen hitsaukseen soveltuvin hitsausmenetelmä on TIG-hitsaus. TIG-hitsauksen tarkkuus, edullisuus ja hyvä soveltuvuus ohuille teräksille tekevät siitä sopivan lentokoneiden ristikkorakenteiden valmistukseen. Pienkoneiden käytön aikainen rasitus on suhteellisesti vähäistä verrattuna esimerkiksi suihkühävittäjien lennon aikana kokemaan kuormitukseen. Näin vältetään kalleimpien hitsausmenetelmien käytöstä pienempien lentokoneiden valmistuksessa, jossa tavoitteena on myös harrastekäyttäjälle soveltuva lentokoneen ostohinta.



Kuva 6. Ristikkorakenteinen Piper PA-12 lentokonerunko (Univair 2017).

Pienkoneen rasi-tetuimpia osia ovat sen runko ja moottorin kiinnikkeet (Nascimento et al. 2011). Ristikkorunkoa, ja erityisesti moottorista aiheutuvan jatkuvan värinän alla olevia moottorin kiinnikkeitä suunniteltaessa on erityisesti huomioitava rakenteen väsymisenkestävyys. Nascimento et al. (2011. s. 1126) toteaa TIG-hitsin väsymisenkestävyyttä tutkivassa artikkelissaan, että 60 % rakenteellisista vioista lentokoneissa johtuu materiaalin väsymisestä aiheutuvista murtumista. Väsymismurtumista aiheuttavia tekijöitä ovat muun muassa monimutkaiset kuormitusjaksot, huonosti suunniteltu rakenne, käytetyt valmistusmenetelmät ja materiaalit. (Bhaumik et al. 2008 Nascimento et al. 2011 mukaan)

Väsymisenkestävyyteen liittyvät haasteet ovat monimutkaisempia ja vaarallisempia lentokoneissa, jotka sisältävät hitsattuja rakenteita (Nascimento et al. 2011). Hitsausauman ongelmallisen väsymiskäyttäytymisen syitä ovat mekaanisten ominaisuuksien vaihtelu hitsin kohdalla ja hitsiä ympäröivällä lämmönvaikutusalueella, hitsaamisesta syntyvät jäännösjännitykset sekä syntyvän hitsisauman vaikea täydellinen määrittely automatisoiduissakin hitsausprosesseissa. (Atzori et al. 2009 Nascimento et al. 2011 mukaan)

Hitsatut kriittiset rakenteet kuten pienkoneen moottorin kiinnikkeet ovat väsymiskäyttäytymisensä ja kovan vaaditun kuormituksensa takia säännöllisesti tarkastettava kohde lentokoneen käytön aikana. Moottorin kiinnikkeiden mekaaniset ominaisuudet saattavat kuitenkin vaihdella keskenään kiinnikkeistä riippuen jo niiden valmistuksen aikana. Nascimento et al. kertoo moottorin kiinnikkeiden olevan 100 % NDT-testatut komponenttien tuotantovaiheessa. Testivaihetta läpäisemättömät kiinnikkeet korjaushitsataan niiden valmistuksen yhteydessä vastaamaan haluttuja kriteerejä muuttaen tällöin hitsin mekaanisia ominaisuuksia osin arvaamattomiksi. Hitsauksen merkitykseen lentokoneiden kunnossapidon kannalta palataan luvussa neljä.

3.3 Hitsauksen käyttö sotilasilmailussa

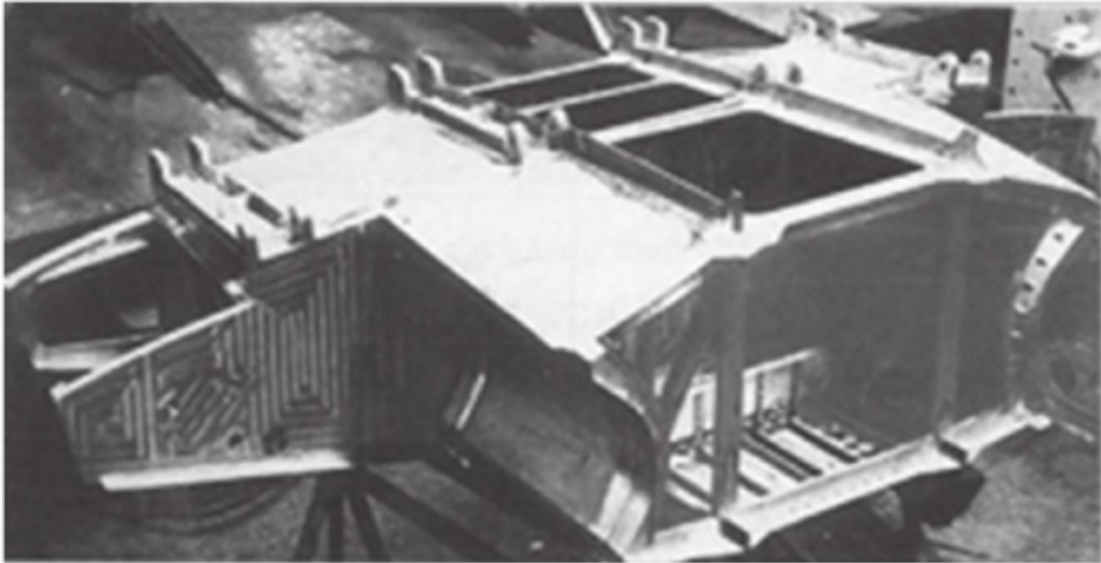
Lentokonerakenteiden suunnitteluun suurimmat vaikuttavat tekijät ovat rakenteiden lujuus, paino ja luotettavuus. Liikenneilmailuun tarkoitetuissa lentokoneissa korostuu luotettavuuden merkitys osana suunnittelua. Sotilasilmailun lentokalustossa, erityisesti ilmatilan hallintaan tarkoitetuissa hävittäjälentokoneissa, pyritään erityisen kestäviin ja kevyisiin rakenteisiin. Kevyet rakenteet mahdollistavat hävittäjätoiminnan tarvitseman suuren työntövoima/paino-suhteen. Lujat rakenteet ovat hävittäjille välttämättömyys, jotta ne kestäisivät niiden käytön aikana kokemat suuret G-voimat.

Hitsausta ei ole perinteisesti pidetty varteenotettavana liitosmenetelmänä lentokoneiden primäärirakenteille (National Research Council 1996). Syitä väittämälle ovat muun muassa hitsiliitosten huono väsymisenkestävyys ja hitsin selvästi heikompi lujuus perusaineeseen verrattuna. Esimerkiksi alumiiniseoksien 2014 ja 2219 hitsauksen kerrotaan vähentävän materiaalin lujuutta hitsin kohdalta puoleen perusaineeseen verrattuna. Hävittäjälentokoneiden rakenteet soveltuvat nykyään kuitenkin hyvin hitsattaviksi: uusia seosmetalleja on kehitetty, ja nykyaikaiset hitsausmenetelmät mahdollistavat hitsille aikaisempaa paremmat mekaaniset ominaisuudet.

Venäläinen A.I. Mikoyan suunnittelutoimisto kehitti vuonna 1985 ensimmäisenä maailmassa alumiinista hitsatun rungon ja ohjaamon MiG-29 hävittäjään (Fridlyander 2003; Grushko et al. 2016). Materiaalina MiG-29 hävittäjässä käytettiin kevyttä Al-Li 1420 seosmetallia. Prasad (2013 s. 260) kertoo MiG-29:n ja samaisesta AL-Li 1420 seosmetallista tehdyn YAK-36 hävittäjän olevan pääsääntöisesti sulahitsausmenetelmällä hitsatut. Hitsatut Al-Li rakenteet valittiin MiG-29 hävittäjään materiaalista ja liitosmenetelmästä saavutettavan painon takia. Fridlyander (2003 s. 347) mukaan käytetyllä materiaalilla ja liitosmenetelmällä saavutettiin 24 % hyöty painon suhteen: 12 % painosta vähensi Al-Li 1420 seosmetallin keveys ja toiset 12% niittien, pulttien ja tiivistysaineiden tarpeettomuus.

A.I. Mikoyanin hitsauksesta vastaava päällikkö Stanislav Adamov kertoo Discovery Channelin teettämässä MiG-29 hävittäjästä kertovassa dokumentissa kuinka kyseisen hävittäjän hitsattu polttoainesäiliö toimii lentokoneen varsinaisena runkoelementtinä. Polttoainesäiliöön on kiinnitetty koneen siivet, laskeutumistelineet, nokka ja perä. Kolmikerroksisen polttoainesäiliön valmistukseen kerrotaan tarvittavan 130 metriä hitsausaamaa. Seuraavalla sivulla on kuva MiG-29 hävittäjän polttoainesäiliöstä.

MiG-29 ja YAK-36 runkomateriaalina käytetyn Al-Li 1420 seosmetallin kerrotaan olevan kuitenkin lujuudeltaan verrattain heikkoa (National Research Council 1996). Al-Li 1420 kuuluukin ensimmäisen sukupolven alumiini-litium-seosmetalleihin ja otettiin käyttöön Neuvostoliitossa jo vuonna 1965 (Prasad 2013). Tästä huolimatta MiG-29 hävittäjiä hitsatulla alumiinirungolla on edelleen aktiivisessa käytössä ympäri maailmaa.



Kuva 7. *MiG-29 hävittäjän hitsattu polttoainesäiliö (Grushko et al. 2016).*

Länsimaisessa hävittäjäkalustossa on niin ikään hyödynnetty hitsausta kriittisten runkorakenteiden liitoksissa. MiG-29 hävittäjästä poiketen useamman modernin hävittäjän runkomateriaalina on käytetty titaaniseoksia ja hitsausmenetelmänä elektronisädehitsausta.

Titaani sopii erinomaisesti hävittäjälentokoneiden runkomateriaaliksi. Titaanilla on suuri lujuus/paino-suhde, erinomainen korroosionkestävyys sekä alumiinia parempi lämmön-sietokyky. Titaani sopii myös materiaalina hyvin hitsattavaksi. Hitsatun titaanin mekaaniset ominaisuudet ovat alumiinihitsejä huomattavasti paremmat: titaanihitsin lujuus voidaan saada lähes perusaineen suuruiseksi murtumiskäyttäytymisen ja kestävyuden laskiessa sauman kohdalla vain hieman. Lisäksi titaanin pieni lämmönjohtavuus- ja lämpölaajentuvuuskerroin estää hitsauksesta aiheutuvaa vetelyä. Titaanin laajaa käyttöä lentokoneiteollisuudessa rajoittaa kuitenkin materiaalin korkea hinta ja hitsausmenetelmien kappaleessa aiemmin esitetty titaanin tarve tyhjiölle sitä hitsattaessa. (National Research Council 1996)

Titaania voidaan hitsata kaikilla sulahitsausmenetelmillä, kunhan materiaalin hapettuminen on estetty tyhjiön avulla. Runkorakenteille soveltuvuin hitsausmenetelmä on elektronisädehitsaus sen suuren tunkeuman ja työkappaleelle aiheutuvan minimaalisen pienen muodonmuutoksen ansiosta. National Research Councilin julkaisemassa materiaalioppaassa (1996 s. 19) kerrotaan elektronisädehitsaamalla pystyttävän hitsaamaan jopa 51 mm paksuista työkappaletta yhdellä vedolla.

Ensimmäisiä elektronisädehitsattuja titaanirunkokomponentteja valmistettiin hävittäjä-lentokoneisiin jo 1970-luvun alussa. Grumman Aerospace Corporationin valmistama F-14 Tomcat, McDonnell Douglasin suunnittelema F-15 Eagle sekä Panavian valmistama Tornado hyödynsivät elektronisädehitsausta Ti-6Al-4V rakenteiden liittämiseen. F-15 hävittäjän ohjusten- ja ylimääräisten polttoainesäiliöiden kannakkeet sekä muutamat siipikomponentit ovat elektronisädehitsatut. F-14 ja Tornadon siipilaatikot, jotka yhdistävät lentokoneen siivet sen runkoon ovat niin ikään elektronisädehitsatut. (Eagar & Mendez 2001)

Kehittyneet hallintalaitteet ja automaatio ovat mahdollistaneet entistä monimutkaisempien rakenteiden hitsaamisen. Uusimpia hävittäjiä valmistettaessa pystytään kerralla hitsaamaan kaarevia ja eri paksuuskaisia pintoja. Uudemman sukupolven hävittäjistä eurooppalaisten lentokonevalmistajien yhdessä tekemä Eurofighter Typhoon ja Yhdysvaltalaisen Lockheed Martinin valmistama F-22 Raptor sisältävät rakenteellisesti kriittisiä hitsattuja titaanikomponentteja. (Eagar & Mendez 2001)



Kuva 8. Yhdysvaltojen ilmaherruushävittäjä F-22 Raptor (*The Aviationist 2017*)

Eurofighter Typhoonin siivet ja peräsin ovat elektronisädehitsatut sen runkoon. F-22 hävittäjän kantaviin rakenteisiin on elektronisädehitsattu 91 metrin pituudelta hitsisaumaa, jonka kerrotaan vähentävän 75 % niittien ja muiden tavanomaisten kiinnittimien tarvetta. (Eagar & Mendez 2002; Pike 2016)

4. HITSUKSEN MERKITYS LENTOKONEIDEN KUNNOSSAPIDOSSA

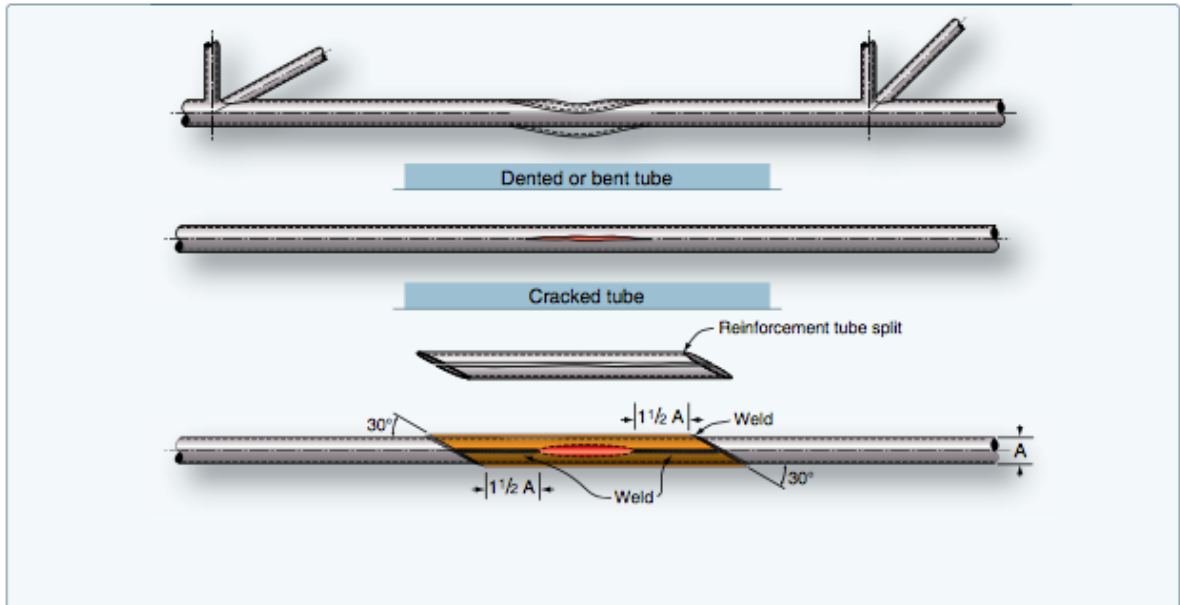
Lentokoneiden varaosat ovat usein kalliita ja niiden läpimenoaika eli aika tilauksesta tuotteen saamiseen saattaa kestää yli vuoden. Hitsaus mahdollistaa usean lentokonekomponentin verrattain edullisen korjaamisen sekä pidentää komponenttien käyttöikää. (Williams 2012) Lentokoneiden seisonta-aikaa korjauksen tai huollon yhteydessä voidaan minimoida hyödyntämällä ilmailuvälineiden hitsauskelpuutettuja toimijoita.

Suomessa Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi määrittelee ilma-alusten lentoturvallisuuden kannalta olennaisten hitsaustöiden ohjeistuksen ja hitsaustöitä tekevien henkilöiden kelpoisuuden. Hitsaustyöt tulee Trafin määräyksen mukaan (2016 s. 12) tehdä tyyppihyväksymistodistuksen haltijan tai valmistajan antamien ohjeiden tai niiden puuttuessa yleisesti hyväksytyjen huolto-ohjeiden mukaisesti. Lentoturvallisuuden kannalta kriittisiä hitsaustöitä saa tehdä henkilö, jolla on ilma-alushitsaajan kelpuus tai joka on muutoin Liikenteen turvallisuusviraston tehtävään hyväksymä.

Hitsausta hyödynnetään monenlaisen lentokonekomponentin korjaamiseen. Tyypillisiä korjattavia komponentteja ovat esimerkiksi matkustajakoneiden ilmanvaihtoputket, teräksiset putkirakenteet ja moottorin osat. Hitsaamalla korjataan repeämiä, paikataan metalliin syntyneitä reikiä ja lommoja, lisätään ainetta kuluneeseen metalliin sekä liitetään uusia komponentteja vanhojen tilalle. (FAA 2012; Williams 2012)

Yhdysvaltain ilmailuhallinnon julkaisemassa oppaassa annetaan yksityiskohtaiset ohjeet ilma-aluksiin hitsaamalla tehtävään huoltotyöhön. Eri hitsausmenetelmien ja tekniikoiden esittelyn lisäksi oppaassa neuvotaan tyypillisimpien korjaushitsausten tekeminen. FAA:n huolto-oppaassa (2012 s. 5-32) käydään läpi haljenneiden ja vääntyneiden putkien korjaus, korjattavien laskeutumistelineiden tunnistaminen ja annetaan lisäohjeita moottorinkiinnikkeiden hitsaamiseen.

Vääntyneiden, lommoisten tai repeytyneiden putkien korjaamiseksi voidaan ongelmakohdan päälle hitsata vahvikeputki, kuten kuvassa 9 ohjeistetaan. Rikkoutunut putki voidaan kunnossapidon oppaan mukaan myös vaihtaa ongelmakohdan pituudelta uuteen samanvahvuiseen putkeen, jolloin myös työkappaleen sisälle hitsataan sen sisähalkaisijan suuruinen metalliputki vahvikkeeksi ja estämään korjaushitsatun rakennelman vääntymistä. (FAA 2012)



Kuva 9. Vahingoittuneen metalliputken korjaus (FAA 2012).

Laskeutumistelineiden korjauksesta kerrotaan, että teräsputkesta valmistetut laskeutumistelineet sopivat yllä mainituilla menetelmillä hitsaamalla korjattaviksi. Lämpökäsitellyjä nikkelseosemetalleja sisältäviä laskeutumistelineitä tai pienkoneissa usein esiintyviä teräs-jousilaskeutumistelineitä ei saa korjaushitsata, vaan ne tulee vaihtaa uusiin niiden vahingoittuessa. (FAA 2012)

FAA:n kunnossapidon oppaassa (2012 s. 5-36) painotetaan hitsisauman virheettömyyttä moottorin kiinnikkeitä korjattaessa. Yleisilmailua koskevan luvun kohdalla todettiin moottorin kiinnikkeiden olevan erityisen altis kohde väsymismurtumiselle. Väsymismurtuma saa usein alkunsa hitsisauman virheestä, joka saattaa syntyä kokemattoman hitsarin työnjäljestä tai hitsausprosessia varten väärin valituista asetuksista. Laadukas hitsisauma edellyttää myös korkealaatuisen lisäaineen käyttöä. FAA:n oppaassa (2012 s. 37) neuvotaan myös poistamaan moottorin kiinnikkeiden hitsauksesta aiheutuvat jäännösjännitykset, mikäli alkuperäinen valmistaja on käyttänyt jännitystenpoistohehkutusta kiinnikkeiden valmistuksessa.

Pienkoneiden runkorakenteiden yhteydessä viitattiin aiemmin Nascimento et al. (2011) toteuttamaan tutkimukseen, jossa pyrittiin ymmärtämään korjaushitsatun sauman mekaanisia ominaisuuksia. Tutkimuksessa vertailtiin ehjää TIG-saamaa hitsiin, joka oli revennyt ja jonka päälle oli korjaushitsattu uusi TIG-sauma, sekä hitsiin joka oli korjaushitsattu kahdesti. Nascimento et al. mukaan revenneen hitsin päälle tehty uusi hitsisauma on yleinen käytäntö lentokoneiden kunnossapidossa. Haljenneen hitsin poista-

minen ja uuden tekeminen tilalle olisi paras käytäntö, mutta tämä ei ole aina mahdollista eikä myöskään kustannustehokasta.

Tutkimustulosten mukaan ensimmäinen korjaushitsi alensi testikappaleen aksiaalista väsymisenkestävyyttä. Toinen korjaushitsi kesti väsyttävää kuormitusta ensimmäistä korjaushitsiä pidempään, mutta oli silti heikompi kuin alkuperäinen hitsisauma. (Nascimento et al. 2011) Tutkimustulokset osoittavat, että erityisesti dynaamisesti kuormitetut rakenteet, kuten moottorin kiinnikkeet tulisi korjaushitsata perusteellisesti. Perusteellisia korjausmenetelmiä ovat esimerkiksi aiemmin FAA:n huolto-oppaassa esitetyt putkenkorjausmenetelmät.

Käsin tehdyn korjaushitsauksen lisäksi myös automatisoituja hitsausprosesseja hyödynnetään lentokoneiden kunnossapidossa. Kustannussäästöjä syntyy erityisesti suuria suihkumoottorikomponentteja korjattaessa. Klimpel & Rzeźnikiewicz korostavat artikkelissaan (2011 s. 74) laserhitsauksen erinomaista soveltuvuutta korjaushitsattaviin kohteisiin. Tutkimuksessaan Klimpel & Rzeźnikiewicz korjaushitsaavat MiG-29 hävittäjän suihkumoottorin haljenneen ilmanottoaukon suojan, sekä analysoivat laserhitsaamalla syntyneen sauman mekaanisia ominaisuuksia. Tarkastelussa olivat korkeatehoisella diodilaserilla syntyvän hitsisauman lujuus, plastiset ominaisuudet sekä eroosion kestävyys.

Klimpel & Rzeźnikiewicz :n tutkimuksessa hitsattavana oleva ilmanottoaukon suoja vastaa materiaaliltaan perinteisesti huonosti hitsattavaa nikkeli-pohjaista superseosta RENE 95. Korjaushitsauksessa käytettiin lisäaineena jauhemaista Inconel 625 superseosta. Syntynyt hitsi tutkittiin visuaalisesti, tunkeumanestetarkastuksella sekä tarkemmalla metallografisella tarkastelulla. Korjaushitsatun sauman mekaaniset ominaisuudet osoittautuivat tarkastelussa kiitettäväksi: sauma kesti hyvin staattista taivutusta, ja sauman eroosion kestävyys todettiin 22-35 % perusainetta paremmaksi. Ainoastaan hitsin lujuus jäi perusainetta pienemmäksi. Tämä johtui käytetystä lisäaineesta, joka soveltuu hyvin hitsattavaksi, mutta jonka mekaaniset ominaisuudet eivät yllä perusaineen tasolle.

5. HITS AUS TULEVAISUUDEN LENTOKONEISSA

Lentokoneiden suunnittelu perustuu kolmeen ehtoon, jotka nykyaikaisen lentokonerakenteen tulee täyttää. Valmistettavan lentokoneen tulee olla kevyt, kustannustehokas ja ennen kaikkea turvallinen (Pacchione & Telgkamp 2006). Hitsauksen rooli tulevaisuuden lentokoneiden liitosmenetelmänä riippuu tavoista, joilla suunnittelijat pyrkivät kohti edellä mainittuja suunnittelukriteerejä. Jotta hitsausteknologian tulevaisuutta voidaan ennustaa, on ymmärrettävä mitä materiaaleja uusimpien lentokoneiden valmistuksessa suositaan.

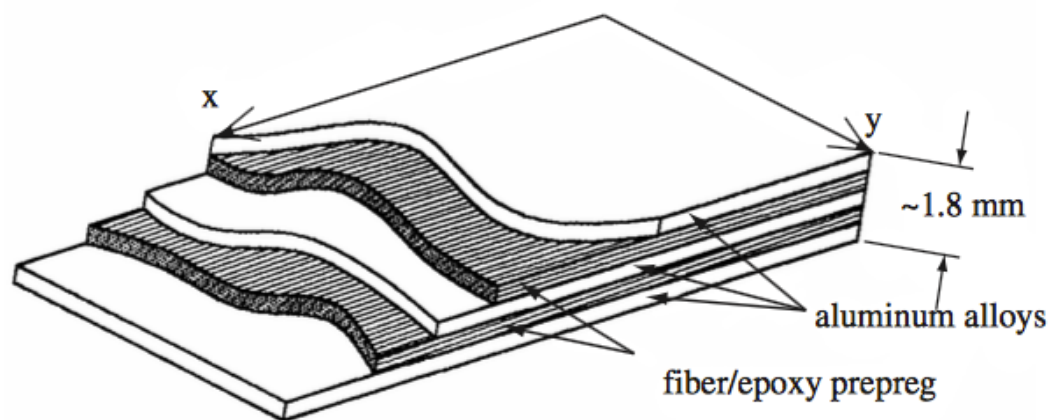
Liikennelentokoneissa ja hävittäjissä on käytetty vuosikymmenten aikana enenevässä määrin komposiittirakenteita niiden erinomaisten materiaaliominaisuuksien takia. Kehitteillä on ollut jatkuvasti myös uusia seosmetalleja, joiden ominaisuudet vastaavat lentokonerakenteiden tarpeita. Vaihtoehtoisina materiaaleina ovat myös kuitumetallilaminat, joissa yhdistyvät sekä metallien että komposiittimateriaalien mekaaniset ominaisuudet. Koska lentokonerungon vaatimukset lujuuden, jäykkyyden, väsymisen ja iskunkestävyyden suhteen vaihtelevat paikoittain, on optimoidun lentokonerungon tekemisessä hyödynnettävä useita eri materiaaleja (Pacchione & Telgkamp 2006). Materiaalien valinta vaikuttaa samalla hitsausteknologian käyttöasteeseen lentokonerunkoa valmistettaessa.

Komposiittimateriaalien etuja metalliseoksiin verrattuna ovat muun muassa korkea lujuuden ja jäykkyyden suhde painoon, sekä erinomainen väsymisen- ja korroosionkestävyys. Metalliseoksiin nähden alhainen murtolujuus ja kosteuden imeytyminen materiaaliin ovat komposiittien heikkous. (Botelho et al. 2006) Komposiittien liittäminen tapahtuu komposiittimateriaaleja varten tehdyillä erityisillä kiinnikkeillä. Yleisimmät komposiitteja varten tehdyt kiinnikkeet ovat kierteisiä kiinnikkeitä, pultteja lukkomutterilla tai ilman, nittejä, tai erikoisia kiinnikkeitä pehmeille materiaaleille kuten hunajakonnerakenteille. (FAA 2012)

Komposiittimateriaalien kehityksen ohella on myös tutkittu ja kehitetty uusia lentokonerakenteisiin sopivia seosmetalleja. Pacchione & Telgkamp toteavat artikkelissaan (2006 s. 4) uusimman sukupolven Al-Li seosmetallien olevan erityisen lupaava materiaali matkustajakoneiden ulkokuoren rakenteisiin. Alcan 2198 ja Alcoa 2199 seosmetallit ovat termodynaamisesti vakaampia materiaaleja kuin aiemmat Al-Li seosmetallit sekä kestävä paremmin korroosiota. Kyseisiä seosmetalleja on hyödynnetty muun muassa Airbussin uudessa A380 matkustajakoneessa.

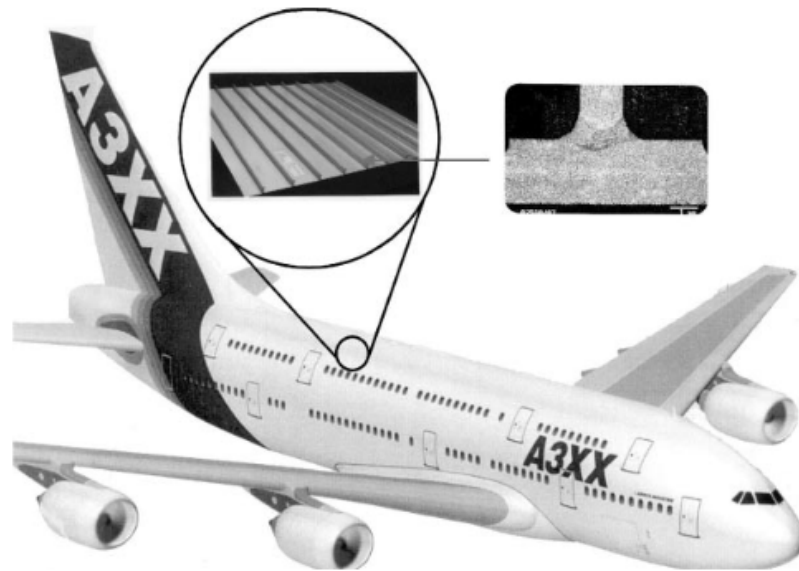
Kuitumetallilaminaatit (Fiber metal laminates, FML) ovat hybridimateriaaleja, jotka koostuvat alumiini- ja kuitu/sidosainekerroksista. Laminaattirakenteen ansiosta materiaalilla on erinomainen väsymisen- ja iskunkestävyys. Kuitumetallilaminaattien uloimman alumiinikerroksen takia kosteutta ei pääse imeytymään materiaaliin, kuten komposiittien kanssa. Botelho et al. (2006 s. 248) mukaan kuitumetallilaminaattien hinta on viidestä kymmeneen kertaa lentokoneissa perinteisesti käytettyjä alumiineja kalliimpi. FML materiaalien painon kerrotaan kuitenkin olevan 20 % perinteisiä alumiineja pienempi, tehden kuitumetallilaminaateista varteenotettavan vaihtoehdon lentokoneiden runkomateriaaliksi.

Airbussin A380 lentokoneen ylempi ulkokuori koostuu kuitumetallilaminaattipaneeleista. Kuvassa 10 on esitetty erään kuitumetallilaminaatin rakenne. Myös muut suuret lentokonevalmistajat kuten Aerospatiale, NASA, Bombardier ja Embraer suunnittelevat kuitumetallilaminaattien käyttöä perinteisten alumiiniseoksien sijaan. (Botelho et al. 2006)



Kuva 10. Kuitumetallilaminaatti Glaren (GLAss REinforced) rakenne (Botelho et al. 2006).

Airbussin strategisena ratkaisuna käytettävien lentokonemateriaalien suhteen on pitää yllä suunnittelutilannetta, jossa metallista ja komposiiteista valmistetut lentokonerungot kilpailevat keskenään paremmuudesta. Uusimmat metallirunkoratkaisut, kuten yleisilmailun luvussa mainitut laserhitsatut runkopaneelirakenteet A318, A380 ja A340 lentokoneissa ovat esimerkki hitsauksen hyödyntämisestä uusimman sukupolven matkustajalentokoneissa. Kuvassa 11 on nähtävissä Airbussin runkopaneeliin laserhitsattu kovike. Runkopaneelin kovikkeen hitsaamisesta koituvat painonsäästöt perinteisiin niittiliitoksiin verrattuna ovat 0,18 kg per hitsattu metri. (Pacchione & Telgkamp 2006)



Kuva 11. Laserhitsauksen käyttökohde Airbusin uusimmissa matkustajalentokoneissa (Schubert et al. 2001).

Pacchione & Telgkamp (2006 s. 6) mukaan aiemmin mainitut uusimman sukupolven Al-Li 2198 ja 2199 seosmetallit ovat sulahitsattavia, mahdollistaen kyseisten materiaalien käytön laserhitsattavina runkopaneeleina tulevaisuudessa. Laserhitsattavien runkorakenteiden lisäksi metallisten runkopaneelien yhteenliittäminen kitkahitsauksen avulla osoittaa suurta potentiaalia tulevaisuuden lentokoneiden liitosmenetelmänä (Šrubař 2009; Lertora 2013).

Kitkahitsauksella pyörivän työkalun avulla voidaan saavuttaa huomattavaa painonsäästöä niittaukseen verrattuna: Airbus A380 matkustajakoneen runkopaneelielementtien kitkahitsaus säästää painossa 0,8 kg per hitsattu metri (Pacchione & Telgkamp 2006; Šrubař 2009). Painonsäästön lisäksi kitkahitsaus on niittaukseen verrattuna huomattavasti nopeampaa. Eagar & Mendez (2002 s. 28) mukaan niittaamalla tehty liitos valmistuu keskimäärin kuuden tuuman minuuttivauhdilla, kun taas kitkahitsaamalla hitsisaumaa muodostuu 20-40 tuumaa minuutissa.

Airbussin lisäksi suuret ilmailualan yritykset, kuten Boeing ovat investoineet kitkahitsaukseen pyörivällä työkalulla. Boeing on implementoinut FSW tekniikkaa onnistuneesti muun muassa Delta II ja Delta IV raketien polttoainesäiliöiden hitsauksessa. Kitkahitsauksen käytön kerrotaan pienentäneen liitostkustannuksia 60 % ja vähentäneen valmistukseen kuluvan ajan kahdestakymmenestä kolmesta päivästä kuuteen päivään. (Kallee et al. 2001)

Kallee et al. (2001) mukaan Boeing on lisäksi patentoinut laitteiston, joka mahdollistaa FSW tekniikan käytön kaarimaisiin työkappaleisiin. Tämän tekniikan avulla Boeingin kerrotaan valmistaneen lentokoneeseen geometrialtaan monimutkaisen laskeutumisteli-

neen luukun. Kaarimaisten ja monimutkaisten muotojen onnistunut kitkahitsaus osoittaa suurta potentiaalia myös muiden monimutkaisten lentokonerakenteiden kitkahitsaamiselle jatkossa.

Kitkahitsausta pyörivällä työkalulla on tutkittu käytettävän myös kuitumetallilaminaattien päittäisliitoksissa. Bied-Charretonin diplomityössä (2016) tutkitaan lentokoneissa käytettävien Glare kuitumetallilaminaattien päittäisliitosten tekemistä FSW tekniikan avulla. Glare paneelien yhteenliittäminen suuremmiksi paneelikokonaisuuksiksi johtaisi kustannussäästöihin valmistuksessa ja yksinkertaistaisi paneelien liittämistä lentokoneen runkoon. Tutkimustulokset ovat lupaavia: FSW tekniikalla tehty hitsisauma kuitumetallilaminaattiin on virheetön, mikäli hitsausparametrit ovat kohdallaan.

Hitsaamalla valmistettavia ja korjattavia lentokoneen moottorinosia tullaan käyttämään myös tulevaisuuden lentokoneissa. Eräs potentiaalinen uusi korjaushitsausmenetelmä lentokoneiteollisuutta varten on CDW eli capacitor discharge welding. CDW mahdollistaa Inconel 718 ja Ti6Al4V seosmetalleista tehtyjen haljenneiden kappaleiden yhteen liittämisen. CDW muistuttaa prosessina leimuhitsausta, jossa työkappaleet fuusioituvat yhteen sähkövirran ja paineen avulla, mutta leimuhitsauksesta poiketen sähkövirta tuodaan työkappaleisiin sekunnin murto-osassa kondensaattoreiden avulla. Capacitor discharge welding mahdollistaisi tulevaisuudessa nopean ja luotettavan hitsausmenetelmän muun muassa Inconel 718 ja Ti6Al4V seosmetalleista tehtyjen turbiinien ja kompressorikomponenttien korjaamiseen. (Palano et al. 2010)

Hitsauksen tulevaisuudelle lentokoneiteollisuudessa voidaan myös ennustaa täysin uudenlaisia käyttökohteita. Tervola (2016 s. 1) mukaan Airbussin A350 lentokoneesta käytetään jo 500 3d-tulostettua muoviosaa ja 180 3d-tulostettua metallikomponenttia. Erään 3d-tulostetun metallikannattimen kerrotaan olevan aiempaa rakennetta 45 % kevyempi ja samalla 30 % jäykempi. 3d-tulostettavien metallisten sekundaärirakenteiden yleistyessä lentokoneissa myös niiden hitsaustarpeen voidaan spekuloida lisääntyvän.

Airbussin uusien tekniikoiden kehityksestä vastaava Peter Sander uskoo 3d-tulostettujen osien päätyvän myös lentokoneen runko-osiin. Vuodelle 2030 ulottuvan bionic aeroplane –konseptin rungon kerrotaan koostuvan monimutkaisista 3d-tulosteista, joihin ohutlevyt joko hitsataan tai niitataan. (Tervola 2016)

6. YHTEENVETO

Lentokoneiden valmistuksessa esiintyvät erilaiset liitostarpeet ovat johtaneet usean eri hitsausmenetelmän käyttöön lentokoneteollisuudessa. Sulahitsausmenetelmistä käytetyimpiä ovat TIG-, säde- ja plasmahitsaus. TIG-hitsaus on lentokoneteollisuudessa käytetyin hitsausprosessi, joka mahdollistaa kohtalaisen tarkan sauman ohuisiin metallirakenteisiin. Lentokoneiden valmistuksessa käytettyjä sädehitsausprosesseja ovat laser- ja elektronisädehitsaus, jotka ovat kalliita korkean intensiteetin hitsausmenetelmiä. Plasmahitsaus soveltuu erityisesti keskipaksujen alumiinikappaleiden hitsaukseen.

Lentokoneteollisuuden käytetyimpiä vastushitsausmenetelmiä ovat piste- ja leimuhitsaus. Pistehitsausta käytetään lentokoneiden ohutlevytuotteissa, joissa vaatimukset hitsin luotettavuuden suhteen ovat alhaiset. Leimuhitsauksen yleisiä käyttökohteita ovat suihkumoottorikomponenttien valmistus. Lentokoneteollisuuteen soveltuvia kiinteän tilan hitsausmenetelmiä ovat kitkahitsaus ja kitkahitsaus pyörivällä työkalulla. Perinteinen kitkahitsaus mahdollistaa eri materiaaleista tehtyjen työkalujen päittäisliitokset. Kitkahitsaus pyörivällä työkalulla on verrattain uusi hitsausmenetelmä, jossa muodostuvan hitsin mekaaniset ominaisuudet ovat erinomaiset.

Liikenneilmailuun tarkoitetuissa lentokoneissa hitsattavat kohteet ovat perinteisesti sekundäärisiä rakenteita, kuten ilmanvaihtoputkia. Uusimmissa matkustajakoneissa on lisäksi hyödynnetty laser- ja kitkahitsausta runkorakenteissa, jotka on aiemmin liitetty niittaamalla. Pienkoneiden runkorakenteet ovat matkustajakoneista poiketen usein putkesta hitsattuja ristikkorakenteita. Hävittäjien runkorakenteissa hyödynnetään elektronisädehitsausta, joka mahdollistaa titaanirakenteiden lujat ja kevyet liitokset.

Lentokonekomponenttien korjaushitsaus on kustannustehokas vaihtoehto hajonneen komponentin vaihtamiselle uuteen ja pienentää huollossa olevan lentokoneen seisontaaikaa. Lentokoneiden kunnossapidon kannalta kriittisimpiä huoltotoimenpiteitä ovat moottorin kiinnikkeisiin tehtävät korjaushitsit.

Tulevaisuuden lentokoneet tulevat sisältämään sekä metalli- että komposiittirakenteita. Siellä missä metallirakenteita käytetään, tullaan hitsausta suosimaan liitosmenetelmänä hitsauksesta saavutettavien valmistuksen- ja käytönaikaisten kustannussäästöjen takia. Hitsisaumojen väsymisenkestävyyden parantuessa uusien hitsausmenetelmien myötä tullaan metallisten lentokonerakenteiden niittaus korvaamaan kokonaan automatisoiduilla hitsausmenetelmillä. Uusista hitsausmenetelmistä erityisesti kitkahitsaus pyörivällä työkalulla tulee yleistymään lentokoneteollisuudessa menetelmän nopeuden ja kestävänsä hitsausauman takia.

LÄHTEET

Aircraft Ducting Repair inc. Welding. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): <http://www.aircraftductingrepair.com/services-capabilities/welding/>

Atkins, T. & Escudier, M. (2013). *Welding. A Dictionary of Mechanical Engineering*. Oxford University Press. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): <http://www.oxfordreference.com/view/10.1093/acref/9780199587438.001.0001/acref-9780199587438-e-7336>

Atzori, B., Lazzarin, P., Meneghetti, G., & Ricotta, M. (2009). Fatigue Design of Complex Welded Structures. *International Journal of Fatigue* 31, pp. 59–69. Saatavissa (viitattu 23.10.2017)

The Aviationist (2017). Kuvan 8 lähde. Saatavissa (viitattu 29.11.2017): <https://theaviationist.com/2016/07/05/the-most-up-to-date-f-22-raptor-jets-are-currently-fighting-daesh/>

Bhaumik, S.K., Sujata, M., & Venkataswamy, M.A., (2008). Fatigue Failure of Aircraft Components. *Engineering Failure Analysis* 15, pp. 675–694. Saatavissa (viitattu 23.10.2017)

Bied-Charreton, A.D. (2016). Friction Stir Welding Effects of Defects in Glare. Saatavissa (viitattu 15.11.2017): <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3A2c3b4900-2d71-402a-9dd9-f5e09c249cfa>

Boehm, L. (2005). *New Engineering Processes in Aircraft Construction: Application of Laser-Beam and Friction Stir Welding*. Vol. 31(1), pp. 27–29. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): <https://doi.org/10.1007/s10720-005-0021-0>

Botelho, E. C., Silva, R.A., Pardini, L.C., & Rezende, M.C. (2006). A Review on the Development and Properties of Continuous Fiber/epoxy/aluminum Hybrid Composites for Aircraft Structures. *Materials Research*, 9(3), 247–256. Saatavissa (viitattu 8.11.2017): <https://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392006000300002>

Cary, H.B. (1998). *Modern Welding Technology*, 4th edition. Prentice-Hall. Saatavissa (viitattu 2.10.2017): <http://www.welding.org>

Discovery Channel (1990). *Wings of the Red Star, The Last Generation – MiG-29*. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): <https://www.youtube.com/watch?v=1KG6bK8itH0>

Dynamic Fabrication Inc. *Aircraft Welding Overview*. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): <http://www.welding-fabrication.com/aircraft-welding/>

- Eagar, T.W. & Mendez, P.F. (2001). *Welding Processes for Aeronautics*. ASM International, pp. 39-43. Saatavilla (viitattu 6.10.2017): <http://eagar.mit.edu/Publications/Eagar184.pdf>
- Eagar, T.W. & Mendez, P.F. (2002). *New Trends in Welding in the Aeronautic industry*. Saatavilla (viitattu 22.11.2017): <http://slideplayer.com/slide/4514773/>
- Element (2016). *Electron Beam vs Laser Beam Welding*. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): <https://www.element.com/nucleus/2016/06/29/electron-beam-vs-laser-beam-welding>
- ESAB. Kitkahitsaus Saatavissa (viitattu 13.10.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/kitkahitsaus.cfm>
- ESAB. Leimuhitsaus. Saatavissa (viitattu 11.10.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/leimuhitsaus.cfm>
- ESAB. MIG/MAG-hitsaus. Saatavissa (viitattu 4.10.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/mig-mag-hitsaus.cfm>
- ESAB. Pistehitsaus. Saatavissa (viitattu 9.10.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/pistehitsaus.cfm>
- ESAB. TIG-hitsaus. Saatavissa (viitattu 20.9.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/tig-hitsaus.cfm>
- ESAB. Vastushitsaus. Saatavissa (viitattu 9.10.2017): <http://www.esab.fi/fi/fi/education/blog/vastushitsaus.cfm>
- FAA (2012). *Aviation Maintenance Technician Handbook –Airframe. Vol. 1*. Saatavissa (viitattu 4.10.2017): https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aircraft/amt_airframe_handbook/media/amt_airframe_vol1.pdf
- Finavia. Liikennetilastot. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): <https://www.finavia.fi/fi/tietoa-finaviasta/lentoliikenne/tilastot/>
- Fridlyander, I.N. (2001). Aluminum Alloys in Aircraft in the Periods of 1970 – 2000 and 2001 – 2015, *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 43(1), pp. 6-10. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): <https://link.springer.com/article/10.1023/A%3A1010453702596?no-access=true>
- Fridlyander, I.N. (2003). Aluminum Alloys with Lithium and Magnesium. *Metal Science and Heat Treatment*, Vol. 45, pp. 344-347. Saatavissa (viitattu 27.10.2017):
- Grushko, O., Ovsyannikov, B., & Ovchinnokov V. (2016). *Aluminum-Lithium Alloys: Process Metallurgy, Physical Metallurgy and Welding*. CRC Press, pp. 320. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): https://books.google.fi/books?id=vyYNDgAAQBAJ&dq=%22MIG-29%22+the+used+welding+methods&hl=fi&source=gbs_navlinks_s

Heintz, C. (1986). Riveted Joints, Part 1. Aircraft Design and Construction. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): <http://www.zenithair.com/kit-data/ht.html>

Kallee, S.W., E., Nicholas, E.D., & Thomas, W.M. (2001). Industrialisation of Friction Stir Welding for Aerospace Structures. Saatavissa (viitattu 28.9.2017): <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/published-papers/industrialisation-of-friction-stir-welding-for-aerospace-structures-december-2001/>

Kalpakjian & Schmid (2010). Manufacturing Engineering and Technology. Chapter 31. Saatavilla (viitattu 13.10.2017): [http://ebooks.bharathuniv.ac.in/gdlc1/gdlc1/Libraries/Manufacturing%20Technology%201%20Library/Kalpakjian/Solid-State%20Welding%20Processes%20\(104\)/Solid-State%20Welding%20Processes%20-%20Kalpakjian.pdf](http://ebooks.bharathuniv.ac.in/gdlc1/gdlc1/Libraries/Manufacturing%20Technology%201%20Library/Kalpakjian/Solid-State%20Welding%20Processes%20(104)/Solid-State%20Welding%20Processes%20-%20Kalpakjian.pdf)

Klimpel, A. & Rzeźnikiewicz, A. (2011). Technology of Laser Welding of Nickel Superalloy Inner Flaps of Jet Engine. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Vol. 47, pp 66-74. Saatavissa (viitattu 2.11.2017): http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol47_1/4717.pdf

Lertora, E. (2013). Comparison of AA 2024 T3 Friction Stir Welded and Riveted Overlap Joints with the Addition of a Pressurization Test pp. 259-266. Saatavissa (viitattu 14.10.2017): https://ac.els-cdn.com/S0261306913000757/1-s2.0-S0261306913000757-main.pdf?_tid=95e372a2-b064-11e7-a9c1-00000aab0f01&acdnat=1507933351_9fc8913ee943bd2c8b87f2c8a65282fe

Lincoln Electric. Arc Welding Fundamentals. Saatavissa (viitattu 4.10.2017): <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/arc-welding-detail.aspx>

Lincoln Electric. TIG Welding Aluminum. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): <http://www.lincolnelectric.com/en-us/support/welding-how-to/pages/tig-welding-aluminum-detail.aspx>

Miller (2012). Handbook for Resistance Spot Welding. Saatavissa (viitattu 9.10.2017): <https://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:hLEmJ8-rvBgJ:https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/files/pdf/resources/bookspampamphlets/resistance.pdf+%&cd=11&hl=fi&ct=clnk&gl=fi#6>

Nascimento, M.P., Voorwald, H.J.C. & Filho, J.C.P (2011). Fatigue Strength of Tungsten Inert Gas-repaired Weld Joints in Airplane Critical Structures pp. 1126-1135. Saatavissa (viitattu 23.10.2017): https://ac.els-cdn.com/S0924013611000288/1-s2.0-S0924013611000288-main.pdf?_tid=542d378c-b80a-11e7-b97d-00000aab0f02&acdnat=1508774196_497d56cab62078f452c9fd950fa6b207

National Research Council (1996). New Materials for Next-Generation Commercial Transports. Washington, DC: The National Academies Press, p. 84. Saatavissa (viitattu 5.10.2017): <https://doi.org/10.17226/5070>

- Nordstrom, A.B. (1997). Automobile carrier for use on air cargo pallets, U.S. Patent US4124119A. Saatavissa (viitattu 21.9.2017): <https://patents.google.com/patent/US4124119A/en?q=Automobile&q=carrier&q=use&q=air&q=cargo&q=pallets>
- Okon, P., Dearden, G., Watkins, K., Sharp, M., & French, P. (2002). Laser Welding of Aluminium Alloy 5083. 21st International Congress on Applications of Lasers and Electro-Optics, Scottsdale, pp. 1-2. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): https://www.researchgate.net/profile/Martin_Sharp3/publication/241627492_Laser_Welding_of_Aluminium_Alloy_5083/links/0deec52a48743499be000000.pdf
- Pacchione, M. & Telgkamp, J. (2006). Challenges of the Metallic Fuselage. 25th International Congress of the Aeronautical Sciences, pp. 6-8. Saatavissa (viitattu 18.10.2017): http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2006/PAPERS/195.PDF
- Palano, F., Panella, F.W. & Dattoma, V. (2010). Characterization of Aeronautical Engine Parts Welded with Capacitor Discharge Welding Technology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Vol. 224(G1), pp. 11-22. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): <https://search.proquest.com/docview/366298406?accountid=27303>
- Pike, J.E. (2016). F-22 Raptor Manufacturing. Saatavissa (viitattu 30.10.2017): <https://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/f-22-manu.htm>
- Prasad, N.E., Gokhale, A. & Wanhill, R.J.H. (2013). Aluminum-Lithium Alloys: Processing, Properties, and Applications. Butterworth-Heinemann, pp. 608. Saatavissa (viitattu 27.10.2017): https://books.google.fi/books?id=OG7PzP5xiHwC&dq=%22MIG-29%22+laser+beam+weld&lr=&hl=fi&source=gbp_navlinks_s
- Schubert, E., Klassen M., Zerner, I., Walz, C. & Sepold, G. (2001). Light-weight Structures Produced by Laser Beam Joining for Future Applications in Automobile and Aerospace Industry pp. 2-8. Saatavissa (viitattu 6.10.2017): http://www.improve.it/metro/file.php?file=/1/Papers/Metallurgy_of_Welding_Processes/20_Light_weight_struct.pdf
- Šrubař, M. (2009). Application of Friction Stir Welding in Aircraft Structures. Saatavissa (viitattu 14.10.2017): <http://www.fswelding.com>
- Tervola, J. (2016). Mallia reisiluusta ja jättiläislumpeesta – uudenlaiset lentokoneen osat valmistuvat 3d-tulostamalla. Tekniikka & talous. Saatavissa (viitattu 16.11.2017): http://www.tekniikkatalous.fi/talous_uutiset/liikenne/mallia-reisiluusta-ja-jattilaislumpeesta-uudenlaiset-lentokoneen-osat-valmistuvat-3d-tulostamalla-6592277
- TWI. Rotary Friction Welding. Saatavissa (viitattu 13.10.2017): <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-processes/rotary-friction-welding/>
- TWI. What is electron beam welding? Saatavissa (viitattu 5.10.2017): <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-electron-beam-welding/>

TWI. What is plasma welding? Saatavissa (viitattu 6.10.2017): <http://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-plasma-welding/>

Trafi (2016). Ilmailuvälineiden huoltotoiminta-, lentokelpoisuuden hallinta- ja muutostyövaatimukset AIR M1-5. Saatavissa (viitattu 31.10.2017): https://www.trafi.fi/filebank/a/1482245740/c5999ee1b0f4f700c64ce49aa493aeeb/23474-AIR_M1-5_perustelumuuisto_final.pdf

Trafi (2017). Yleisilmailijalle. Saatavilla (viitattu 19.10.2017): <https://www.trafi.fi/yleisilmailijalle>

Univair. U24066-000 Piper PA-12 Frame Assembly. Saatavilla (viitattu 23.10.2017): <http://www.univair.com/piper/piper-pa-12/view-all/u24066-000-piper-pa-12-frame-assembly/>

Williams, B. (2012). Aircraft Welding & Repair. Saatavissa (viitattu 20.9.2017): <http://www.aviationpros.com/article/10623333/turbine-technology-aircraft-welding-and-repair>