
LUT
University
LAND
OF THE
CURIOUS

E-LIIKKUVUUDEN KEHITTYNEET VALMISTUSMENETELMÄT

E-LIIKKUVUUDEN KOMPONENTTIEN HITSAUS

Kootut tietopaketit

Euroopan unionin osarahoittama

ETELÄ-KARJALAN LIITTO

LAPPEENRANTA

Euroopan unionin osarahoittama

ETELÄ-KARJALAN LIITTO

LAPPEENRANTA

LUT University

JOHDANTO

Missä kohtaa sähköajoneuvoissa laserhitsausta hyödynnetään – ja millä lasereilla ja strategioilla liitokset onnistuvat?

01 Akusto

Liitokset: liuska–virtakisko, virtakisko–napa, kansi–kotelo, kennon sisäiset hitsit

Materiaalit: Al, Cu, Ni-pinnoitettu teräs, Al–Cu-eripariliitos

Päähaaste: lämmöntuonnin ja tunkeuman hallinta

02 Jäähdytyslevyt

Liitokset: pitkät, suljetut saumat ohuessa alumiinilevyssä

Materiaalit: 3xxx-, 5xxx- ja 6xxx-sarjan alumiiniseokset

Päähaaste: hermeettiset, huokos- ja halkeamavapaat saumat

03 Sähkömoottorit

Liitokset: hairpin-staattorin hitsit, Cu-tappi–virtakisko

Materiaalit: puhdas kupari (Cu-ETP, Cu-OF)

Päähaaste: heijastavuus, roiskeet, asematoleranssit

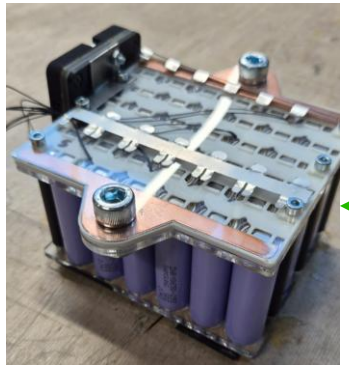
Euroopan unionin osarahoittama

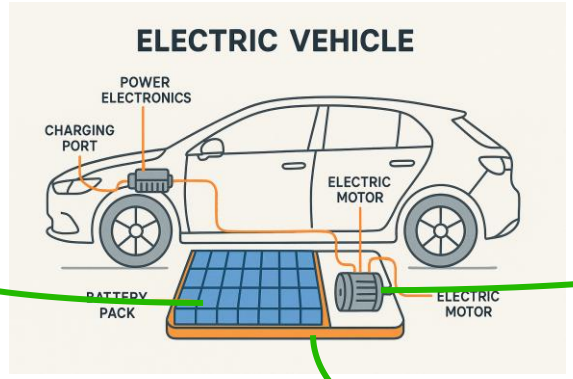
ETELÄ-KARJALAN LIITTO

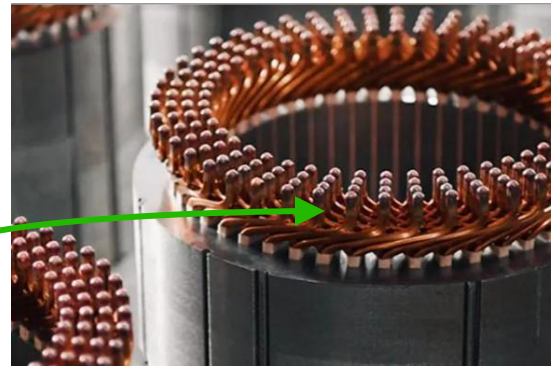
LAPPEENRANTA

LUT University

E-LIIKKUVUUDEN KOMPONENTIT

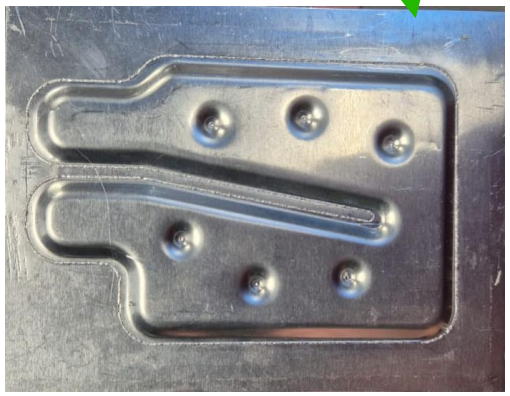


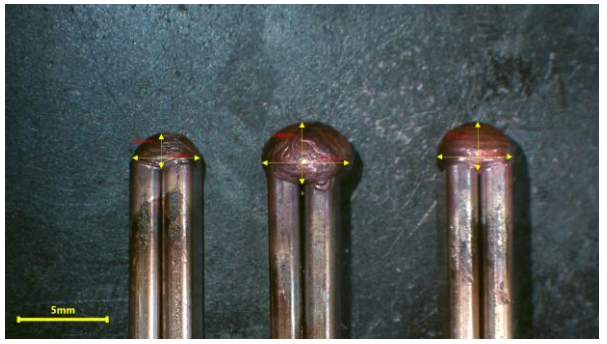


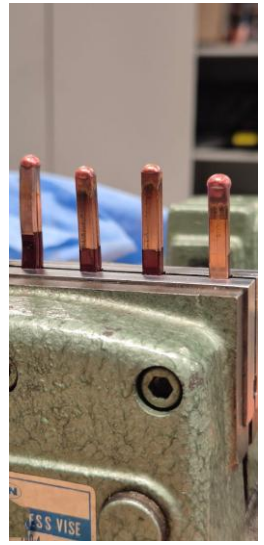












MIKSI LASERHITSAUS?

Pieni, paikallinen lämmöntuonti
Suojaa liitoksen lähellä olevia kennoja, separaattoreita ja eristeitä

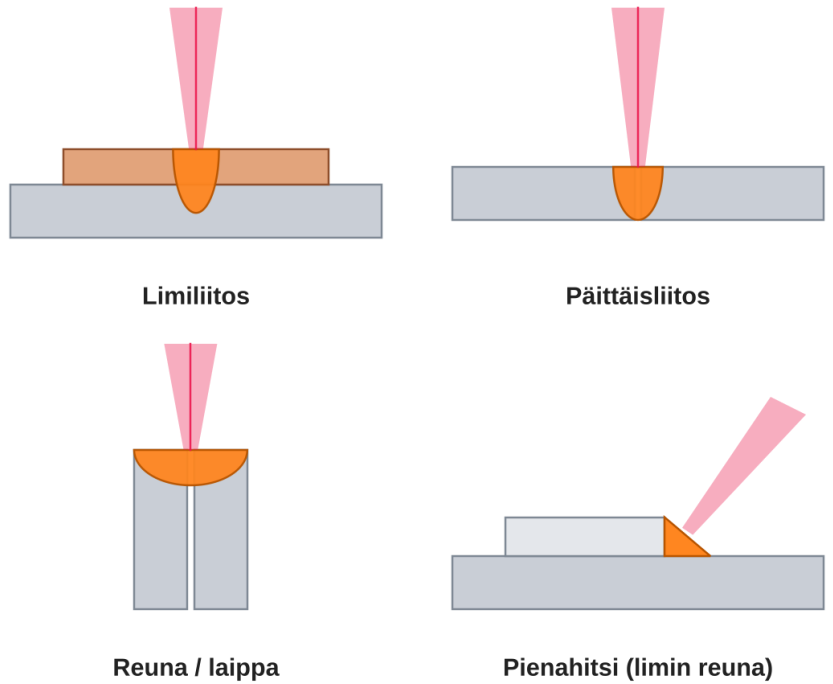
Suuri nopeus skanneri-optiikalla
Etähitsaus: säde siirtyy liitoksesta toiseen millisekunneissa

Tarkka tunkeuman hallinta
Ohuet foliot, osittainen tunkeuma ja Al–Cu-eripariliitokset

Joustava ja helppo automatisoida
Ohjelmoitavat hitsausradat, ei kosketusta, ei elektrodikulumista

Prosessinaikainen valvonta
Kamerat, OCT ja fotodiodit mahdollistavat 100 % tarkastuksen

Tyypilliset laserliitosmuodot



LASERLÄHTEET

Laserlähde	Aallonpituus	Vahvuudet	Tyypillinen käyttö
Yksimuotoinen kuitulaser (CW)	1070 nm	Hyvin pieni piste, suuri intensiteetti; nopea skannaus, kapeat syvät hitsit	Foliot ja liuskat, hairpinit (wobble-hitsauksella)
Monimuotoinen kuitu- / kiekkolaser	1030–1070 nm	kW-teho, suurempi piste, laaja prosessi-ikkuna	Jäähdytyslevyt, kansi–kotelo, kotelot
Ydin + rengas -säde (ARM-tyyppi)	1030–1070 nm	Ydin ja rengas säädetään erikseen: vakaa avaimenreikä, vähemmän roiskeita ja huokosia	Al-saumat, hairpinit, Al–Cu-virtakiskot
Vihreä laser	515 nm	~40 % Cu-absorptio: vakaa energian kytkeytyminen, vähän roiskeita	Hairpinit, Cu-liuskat, Cu-virtakiskot
Sininen diodilaser	~450 nm	~65 % Cu-absorptio: tasaiset johtumishitsit, usein hybridinä IR:n kanssa	Ohuet Cu-foliot, Cu–Cu-liitokset
Pulssilaser (ns / QCW)	1064–1070 nm	Tarkka pulssienergia, hyvin pieni lämmöntuonti	Kennojen navat, ohuet liuskat, pistehitsit

SÄTEENMUOKKAUS JA OSKILLOINTI

Intensiteettiprofiili

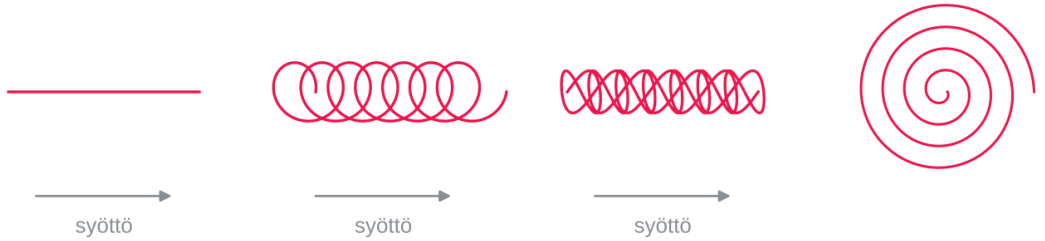


Yksimuoto
(pieni Gaussin piste)

Monimuoto
(iso, tasaisempi piste)

Ydin + rengas
(ARM / BrightLine)

Säteen rata (ylhäältä)



Suora

Ympyräoskillointi

Kahdeksikko (∞)

Spiraali (piste / limi)

Säteen profiili

Ytimen ympärillä oleva rengas pitää avaimenreiän auki – vähemmän roiskeita ja huokosia Al:ssa ja Cu:ssa.

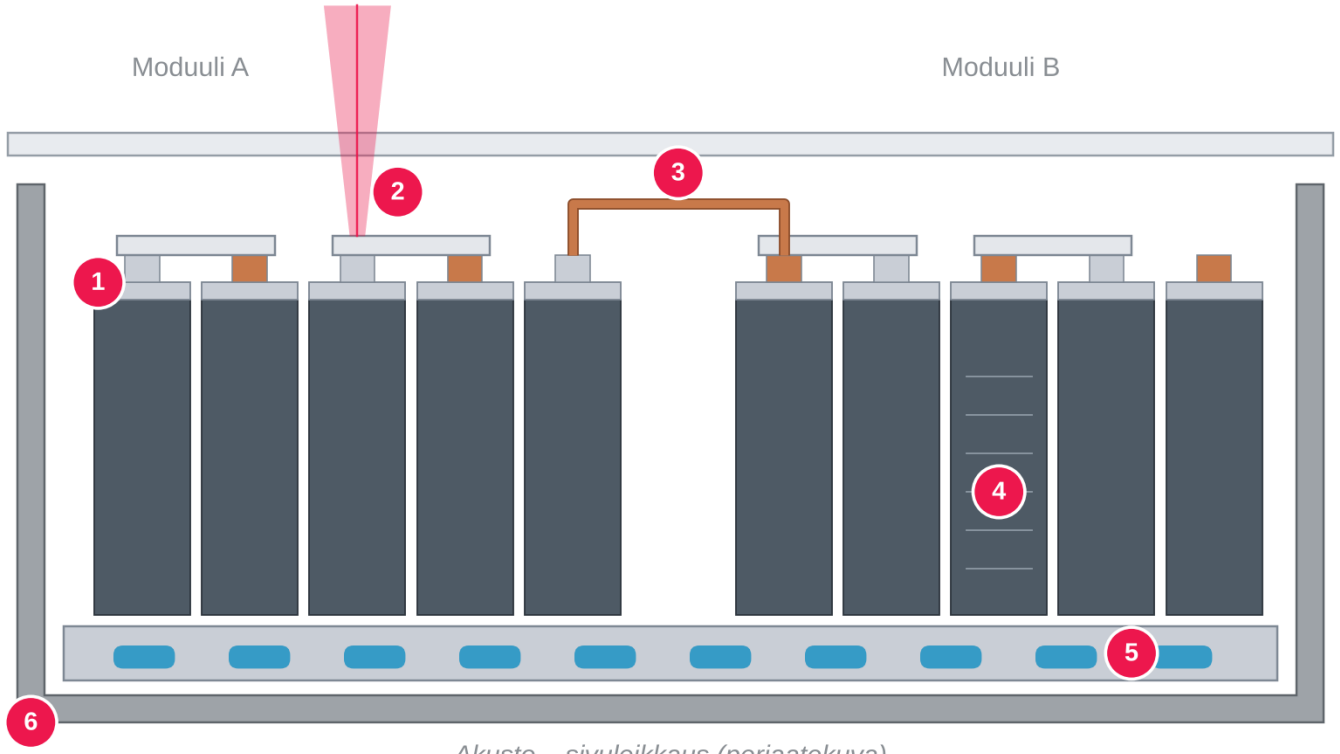
Säteen oskillointi (wobble)

Leventää hitsisaumaa, silloittaa rakoja, vakauttaa sula-allasta ja säätää Al–Cu-rajapinnan leveyttä.

AKUSTO

Liuska-, virtakisko-, napa- ja kennokotelohitsit

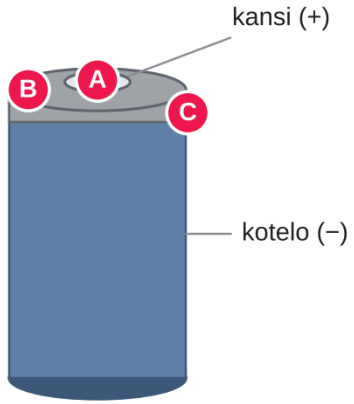
HITSIT AKUSTOSSA



Akusto – sivuleikkaus (periaatekuva)

1. Kennon kannen ja kotelon tiivishitsi
2. Virtakisko–napa (kennon liitäntä)
3. Moduulien välinen liitin
4. Kennon sisällä: foliopino virrankeräimeen
5. Jäähdytyslevyn saumat (osio 02)
6. Akuston kotelo / pohja (Al)

KENNOTYYPIT JA LIITOKSET

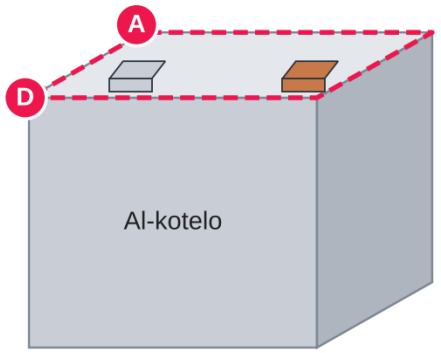


Sylinterikenno

Kotelo: Ni-pinnoitettu teräs (myös Al)

A / B: kansi (+) ja reuna (−) virtakiskoon tai Ni-liuskaan

C: kannen ja kotelon sulku

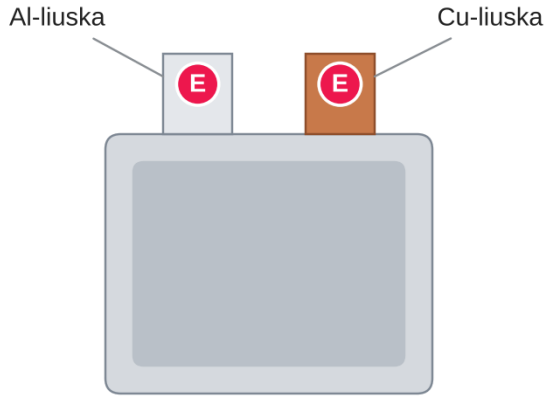


Prismaattinen kenno

Kotelo ja kansi: alumiini (3xxx)

A: napa–virtakisko (Al–Al, Al–Cu)

D: kansi–kotelo-sauma, täyttöaukko, venttiili



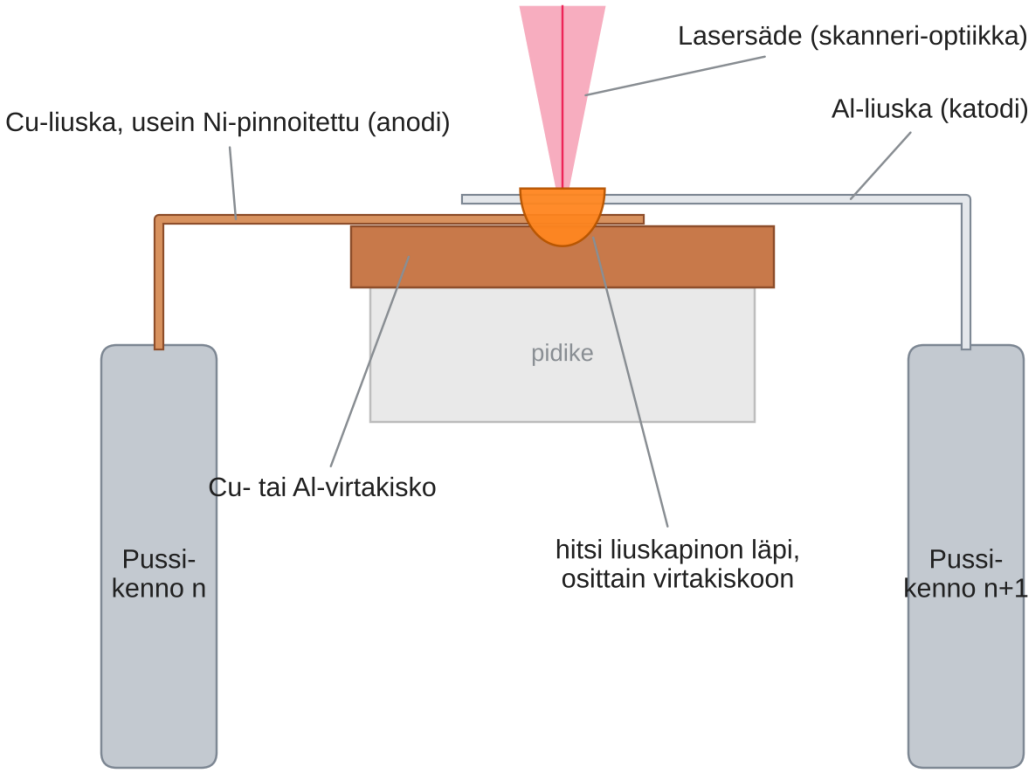
Pussikenno

Liuskat: Al (+), Ni-pinnoitettu Cu (−)

E: liuska–virtakisko tai liuska–liuska

Sisällä: foliopino liuskaan

PUSSIKENNOJEN LIUSKAHITSIT



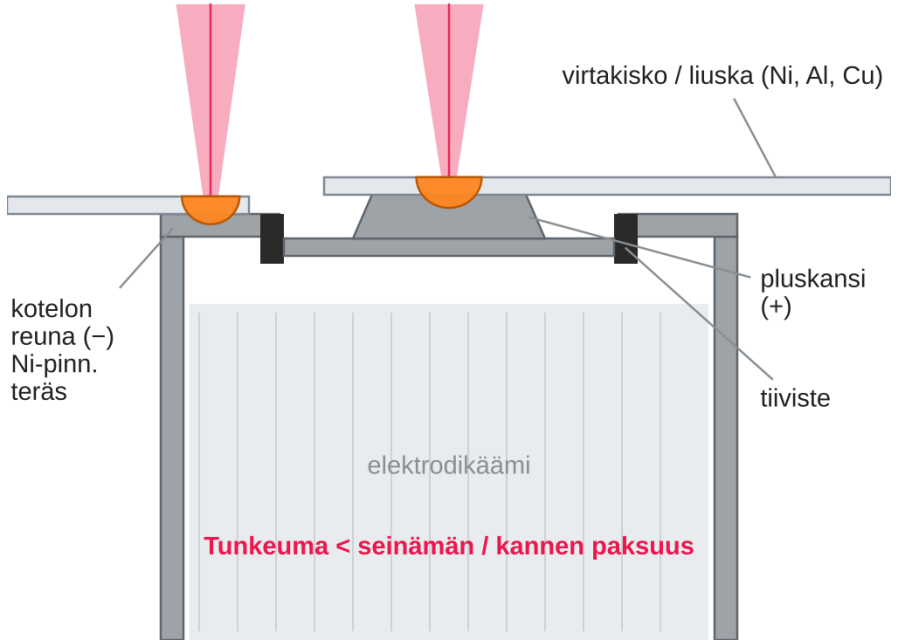
Haasteet

- Ohuet liuskat (~0,1–0,4 mm) paksulla kiskolla: läpipalaminen vs. liitosvirhe
- Al–Cu-eripari: hauraat metallienväliset yhdisteet, suurempi resistanssi
- Raot liuskapinossa, oksidit ja Ni-pinnoite

Laserit ja strategiat

- Yksimuoto- tai ydin + rengas -kuitulaser skannerilla
- Oskillointi / spiraalirata: leveä rajapinta, pieni syvyys
- Raoton kiinnitys; vihreä tai sininen Cu-pinoille

SYLINTERIKENNOJEN LIITÄNNÄT



Molemmat navat liitetään ylhäältä: kansi (+) ja kotelon reuna (−)



Laserhitsatut liuskat sylinterikennoissa

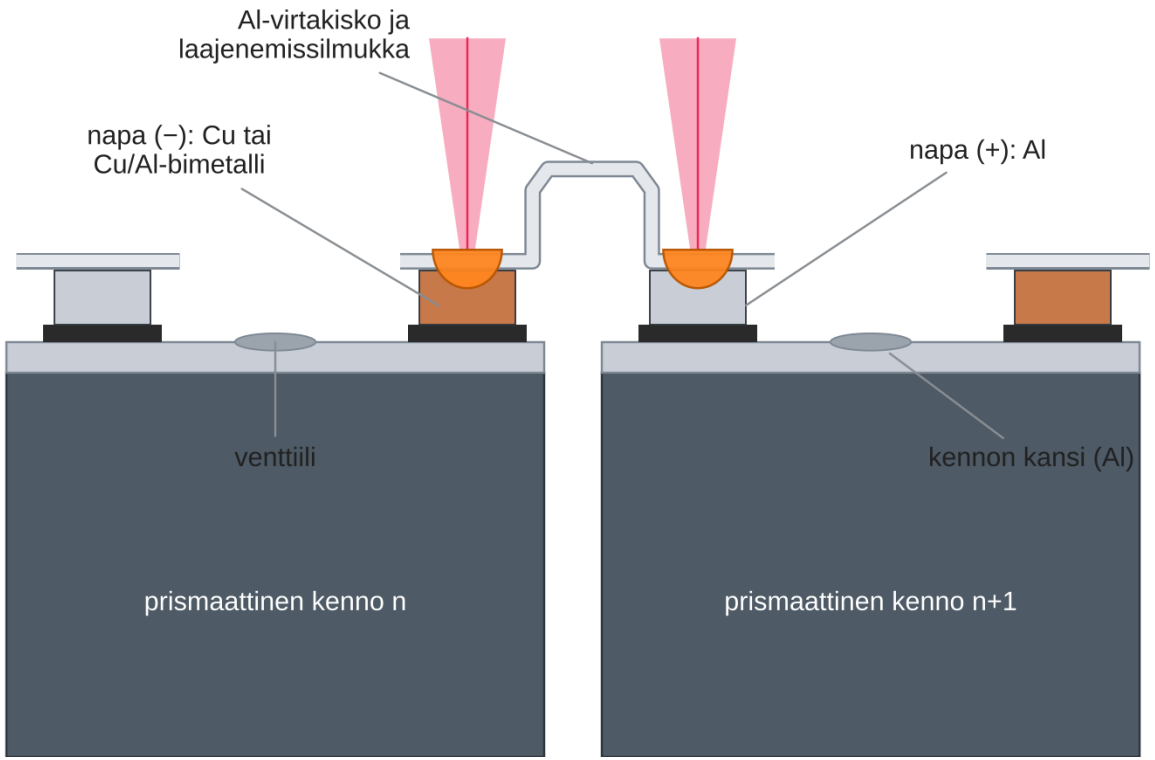
Haasteet

- Ohut seinämä: ei läpipalamista
- Lämpöjohtuminen kennoon ja tiivisteeseen
- Ni / Al / Cu Ni-pinnoitetulle teräkselle

Strategiat

- Pulssitettu tai moduloitu kuitulaser
- Spiraali- / ympyräpistehitsit
- Syvyyden valvonta, vetokokeet

PRISMAATTISEN KENNON NAVAT



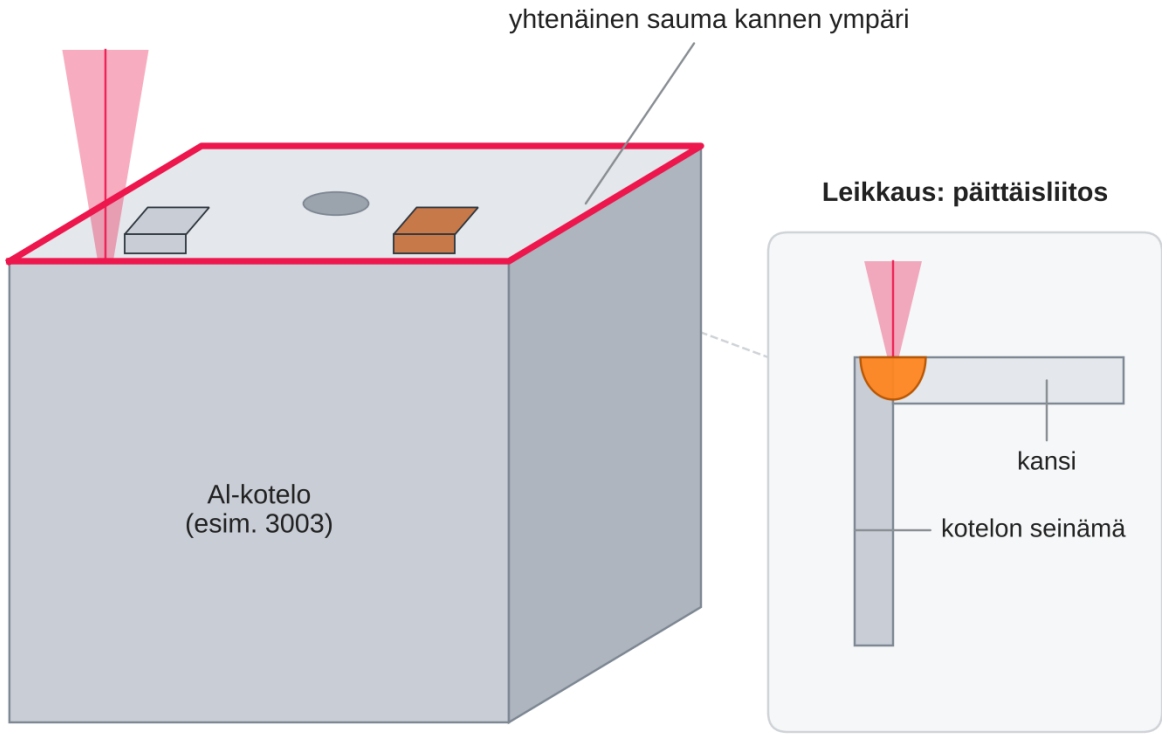
Haasteet

- Al-kisko Al-napaan (+) ja Cu- tai Cu/Al-bimetallinapaan (−)
- Suuret virrat: tarvitaan suuri hitsin poikkipinta
- Al:n huokoisuus ja halkeilu; lämpö navan tiivisteeseen

Laserit ja strategiat

- Monimuotoinen tai ydin + rengas -kuitulaser (kW)
- Lineaariset tai ympyränmuotoiset pistesaumat wobble-hitsauksella
- Bimetallinavat mahdollistavat Al-Cu-hitsauksen tarpeen tuotantolinjalla

KANNEN JA KOTELON HITSAUS



Vaatimukset

- Hermeettinen koko käyttöiän: elektrolyytti sisään, kosteus ulos
- Pitkä suljettu sauma kulmineen; sovitusraot vaihtelevat
- Ei roiskeita kennoon; rajoitettu lämmöntuonti

Laserit ja strategiat

- Kuitulaser + skanneri, ydin + rengas -säde
- Ytimen/renkaan tehon säätö kulmissa ja kentän reunoilla
- Sauman alun ja lopun limitys, tehon alasajo

MUUT HITSIT KENNOSSA

Tabless-virrankeräimet

Elektrodikäämin litistetyt folioreunat hitsataan keräinlevyyn (esim. 4680-kennot): paljon ohuita folioita, hyvin pieni lämpöbudjetti.

Foliopino–liuska

Kymmeniä ohuita Cu- tai Al-folioita yhteen liuskaan; usein ultraäänellä, laser tuo nopeutta eikä työkalu kulu.

Elektrolyytin täyttöaukon sulku

Tiivistetappi hitsataan kanteen täytön jälkeen; oltava hermeettinen elektrolyyttijäämistä huolimatta.

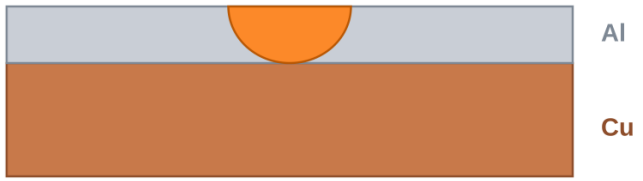
Venttiilit ja mittausliitännät

Murtolevy / varoventtiili hitsataan kanteen; jännite- ja lämpötilamittauksen liuskat virtakiskoihin.

AL–CU-ERIPARILIITOKSET

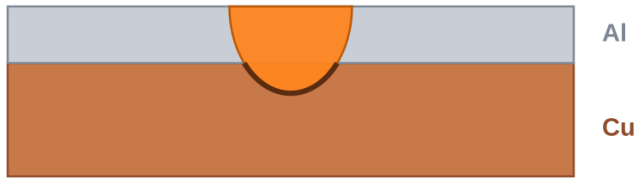
Liian matala

pieni liitospinta → heikko, suuri kontaktiresistanssi



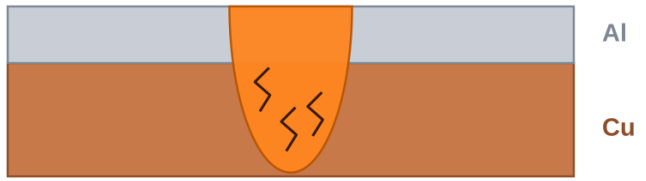
Hallittu tunkeuma

ohut IMC-kerros, leveä liitos → luja ja hyvin johtava



Liian syvä

Cu-sekoittuminen → hauraat Al–Cu-IMC:t, halkeamat



Miksi kriittistä?

Al ja Cu muodostavat sulassa sekoittuessaan hauraita metallien välisiä faaseja (esim. Al_2Cu, Al_4Cu_9).

Seuraukset

Halkeamia, heikko lujuus ja suurempi sähkövastus, joka pahenee lämpösyklien ja vanhenemisen myötä.

Laserstrategiat

Alumiini päällä, minimaalinen tunkeuma kupariin; oskillointi / spiraaliradat leventävät rajapintaa; pulssinmuokkaus; Ni- tai bimetallivälikerros.

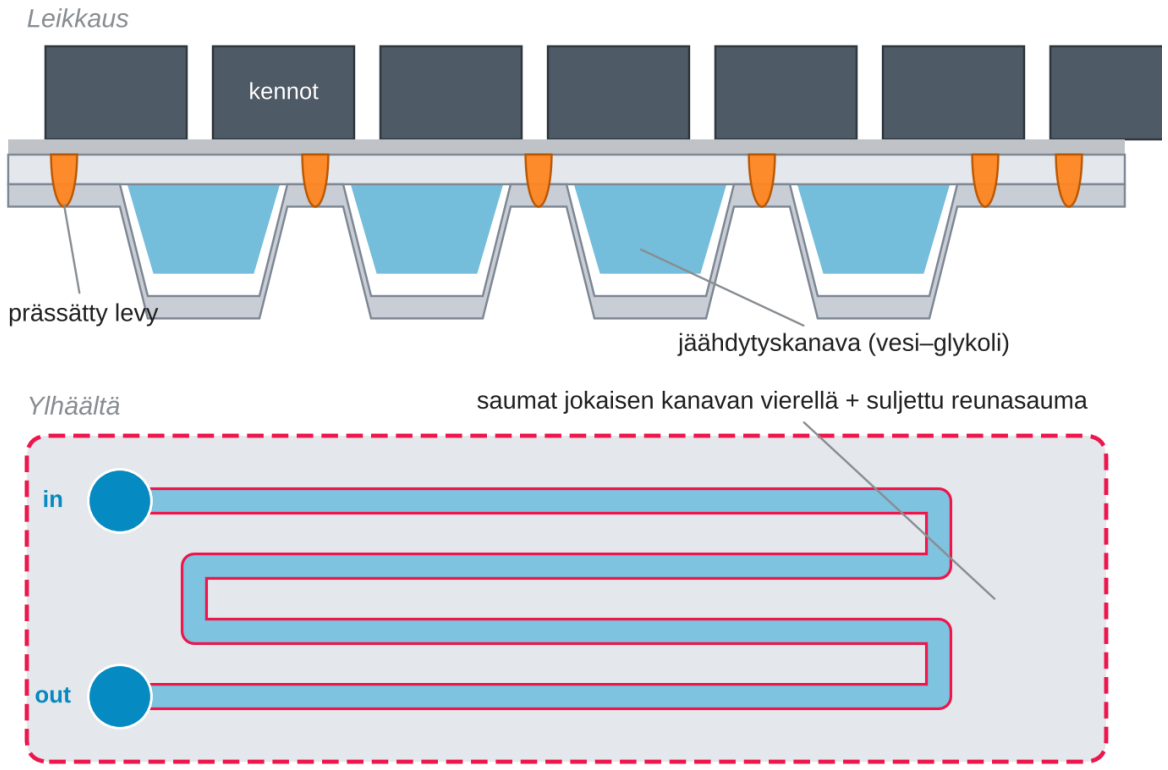
AKKUHITSAUKSEN YHTEENVETO

Liitos	Materiaalit	Tyypillinen laser	Strategia	Laatutarkastus
Liuska–virtakisko (pussikenno)	Al-, Cu(Ni)-liuskat Cu/Al-kiskolle	Yksimuotoinen- tai ydin+rengas-kuitu; vihreä	Oskillointi / spiraali, ei rakoa	Rajapinnan leveys, resistanssi
Virtakisko–napa (sylinterikenno)	Ni / Al / Cu -liuska Ni-pinnoitetulle terälkselle	Pulssitettu tai moduloitu kuitu	Spiraalipistehitsit	Tunkeumasyvyys, vetokoe
Virtakisko–napa (prismaattinen)	Al-kisko Al- tai Cu/Al-napaan	Monimuotoinen- tai ydin+rengas-kuitu	Saumat + oskillointi	Hitsin pinta-ala, huokoisuus
Kansi–kotelo	Al 3xxx -kotelo ja -kansi	Kuitu + skanneri, ydin+rengas	Yhtenäinen sauma, tehon alasajo	Tiiviys, halkeamat
Täyttöaukko / venttiili	Al-tappi tai -levy Al-kannessa	Kuitu tai pulssikuitu	Ympyräsauma	Hermeettisyys
Moduulien liittimet	Cu- tai Al-kiskot	Suuritehoinen kuitu; vihreä Cu:lle	Saumat oskilloiden	Resistanssi, lämpötilan nousu

JÄÄHDYTYSLEVYT

Hermeettiset alumiinisaumat akuston nestejäähdytykseen

HITSI ON TIIVISTE



Rakenteet

- Prässätyt kaksilevyrakenteet
- Pursotetut monikanavaputket + jakotukit
- Kanavat integroituna akuston pohjaan
- Al-seokset 3xxx, 5xxx, 6xxx



Prässätty Al-levy

Jokainen sauma on paineraja

Tiivis koko ajoneuvon käyttöiän, todennetaan helium- tai painehäviötestillä; lisäksi tasomaisuus, murtopaine ja korroosionkesto.

MIKSI ALUMIINI ON HAASTAVA?

Sitkeä oksidikerros

Al_2O_3 sulaa ~2050 °C:ssa, Al 660 °C:ssa: sulkeumat, liitosvirheet.

→ **Puhdistus tai laseresipuhdistus, Ar-suojaus**

Pieni absorptio 1 µm:llä

Suurin osa IR-valosta heijastuu, kunnes avaimenreikä syntyy: epävakaa aloitus.

→ **Suuri intensiteetti, tehon ylösajo**

Suuri lämmönjohtavuus

~4–5× teräkseen verrattuna: lämpö johtuu nopeasti pois.

→ **Kuitu- / kiekkolaser, hyvä säteenlaatu**

Vetyhuokoisuus

Vedyn liukoisuus laskee ~20× jähmettyessä: huokoset ovat vuotoreittejä.

→ **Puhtaus, vakaa avaimenreikä**

Kuumahalkeilu

6xxx-seokset halkeilevat hitsissä (laaja jähmettymisväli).

→ **Si-rikas lisäaine (4043 / 4047)**

Roiskeet ja avaimenreiän romahdus

Juokseva sula; Mg:n höyrystyminen 5xxx-seoksissa.

→ **Ydin + rengas -säde, oskillointi**

TIIVIIT AL-SAUMAT

Laserlähteet

- Monimuotoinenkuitu- tai kiekkolaser (kW-luokka)
- Ydin + rengas (ARM) -kuitulaser
- Yksimuoto + skanneri-oskillointi ohutlevyille

Hitsausstrategiat

- Limisaumat kanavien vierellä, suljettu reunasauma
- Oskillointi: leveämpi sauma, raon silloitus
- Lisäainelanka 6xxx:lle; tehon alasajo sauman lopussa

Prosessin hallinta

- Raottomat kiinnittimet
- Rasvan- ja oksidinpoisto, Ar-suojaus
- Saumanseuranta ja prosessinaikainen valvonta

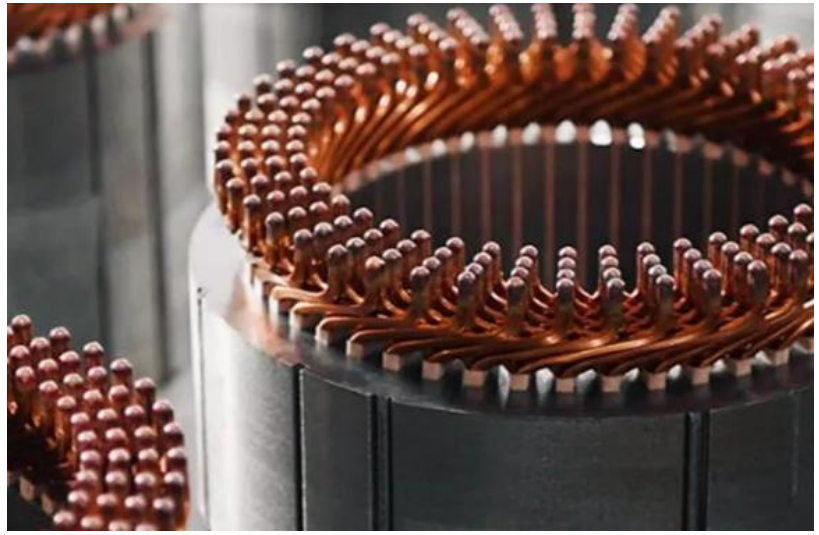
Prosessiketju

Puhdistus → Kiinnitys → Hitsaus → Valvonta → Vuototesti → Painekoe

SÄHKÖMOOTTORIT

Kuparisten hairpin- ja tappi–virtakiskoliitosten hitsaus

HAIRPIN-STAATTORIT

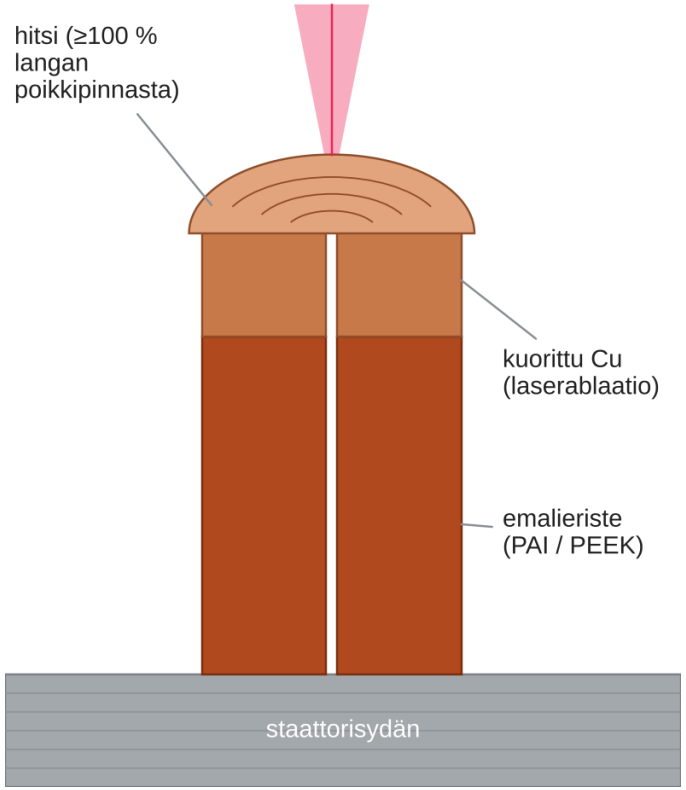


Hairpin-staattori: tappiparit kytkentäpuolella

2–6 mm
langan koko

≥100 %
hitsin poikkipinta

100+
hitsiä / staattori



Mitä hitsataan

- Suorakulmainen kuparijohdin (Cu-ETP / Cu-OF), joka on taivutettu tapeiksi
- Emali poistettu, päät käännetty ja katkaistu
- Jokainen tappipari hitsataan käämitykseksi

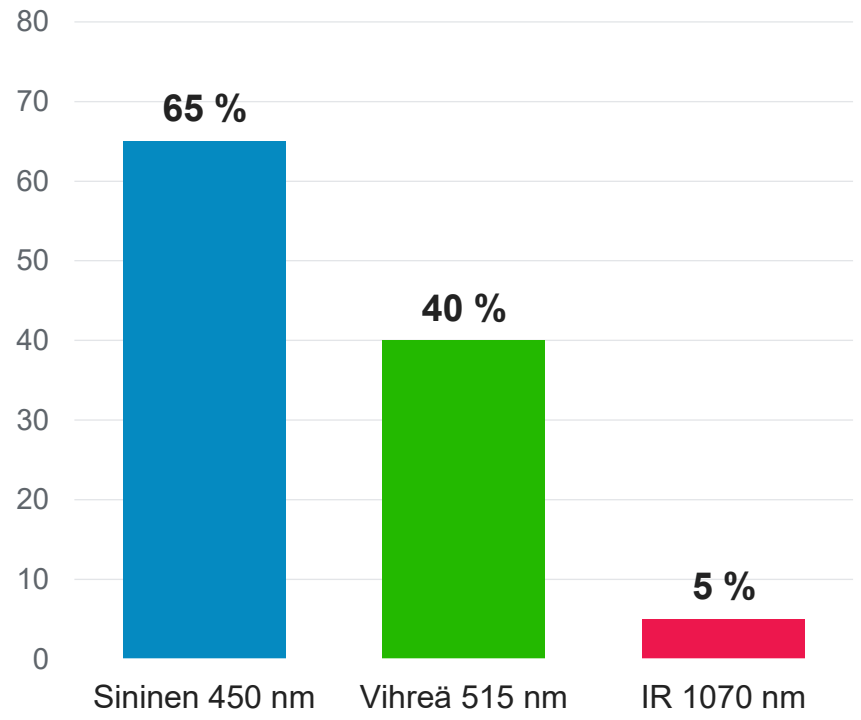
Vaatimukset

- Hitsin pinta-ala ≥ langan poikkipinta
- Ei roiskeita käämitykseen
- Ei eristevaurioita

Euroopan unionin osarahoittama
ETELÄ-KARJALAN LIITTO
LAPPEENRANTA
LUT University

MIKSI KUPARI ON HAASTAVA?

Cu:n absorptio, kiinteä, huoneenlämpö



Suuri heijastavuus IR:ssä
~95 % 1 µm:n valosta heijastuu: tarvitaan suuri teho, takaisinheijastusriski.

Suuri lämmönjohtavuus
~400 W/m·K (≈1,7× Al) vie lämmön pois hitsausalueelta.

Absorptio kasvaa äkillisesti
Kytkeytyminen kasvaa jyrkästi sulan / avaimenreiän synnyttyä: energiapiikki.

Roiskeet ja purkaumat
Juokseva sula ja avaimenreiän romahdus sinkoavat pisaroita käämitykseen.

Huokoisuus
Avaimenreiän romahdus ja Cu-ETP:n happi aiheuttavat kaasuhuokosia.

Pinnan tila
Oksidit, emalijäämät ja purseet muuttavat kytkeytymistä tapista toiseen.

LASERIT KUPARILLE

1070 nm

IR-yksimuoto + oskillointi

Miten auttaa

Hyvin suuri intensiteetti synnyttää avaimenreiän; oskillointi vakauttaa sulan ja leventää hitsiä

Huomioitavaa

Roiskeita ilman oskillointia

Tyypillinen käyttö

Hairpinit, virtakiskot, foliot

1030–1070 nm

IR ydin + rengas

Miten auttaa

Rengas pitää avaimenreiän auki; jopa ~90 % vähemmän roiskeita raportoitu

Huomioitavaa

Enemmän säädettäviä parametreja

Tyypillinen käyttö

Hairpinit, Cu-kiskot, Al–Cu

515 nm

Vihreä laser

Miten auttaa

~8× suurempi Cu-absorptio kuin IR:llä: vakaa, toistettava kytkeytyminen, vähän roiskeita

Huomioitavaa

Korkeampi hinta per watti

Tyypillinen käyttö

Hairpinit, Cu-liuskat, ohut Cu

~450 nm

Sininen / hybridi sininen + IR

Miten auttaa

~65 % absorptio: tasaiset johtumishitsit; IR tuo hybridissä syvyyttä

Huomioitavaa

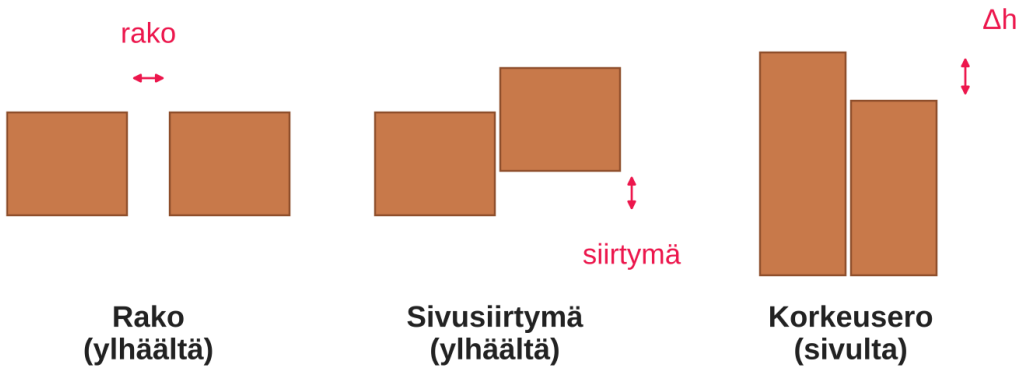
Pelkällä sinisellä rajallinen syvyys

Tyypillinen käyttö

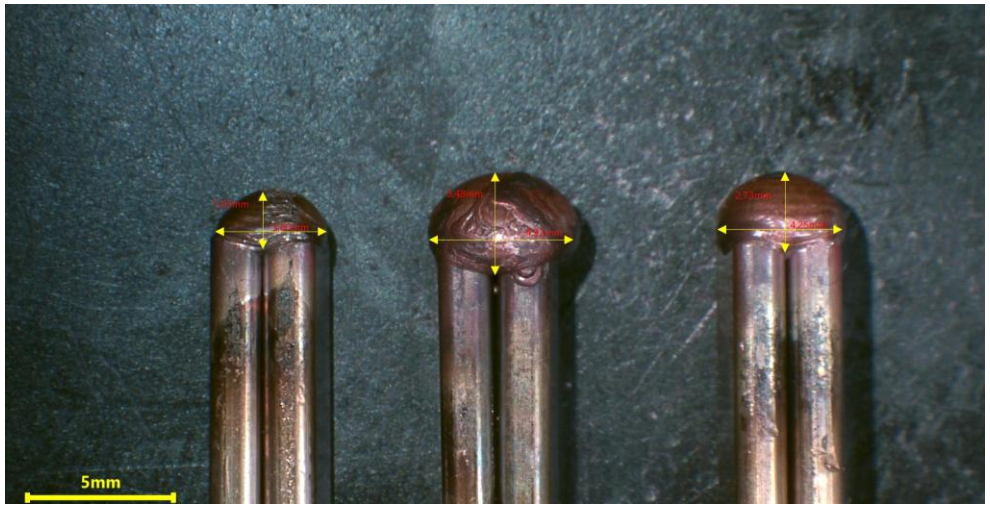
Ohuet Cu-foliot, Cu–Cu-liuskat

HAIRPIN-PROSESSI JA LAATU

Eristeen poisto → Muotoilu ja katkaisu → Kiinnitys → Tappien paikannus → Adaptiivinen hitsaus → OCT-valvonta

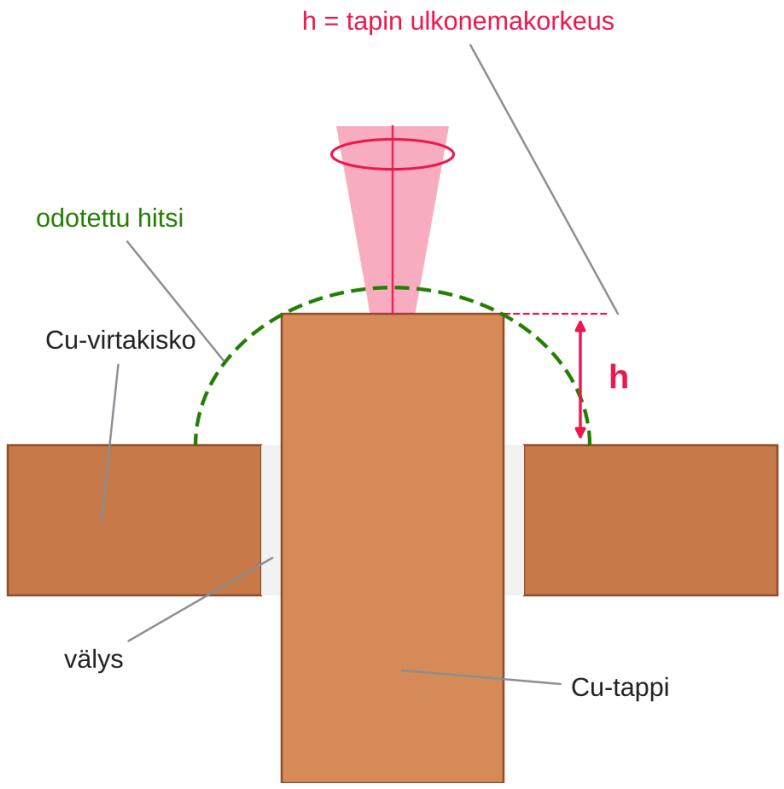


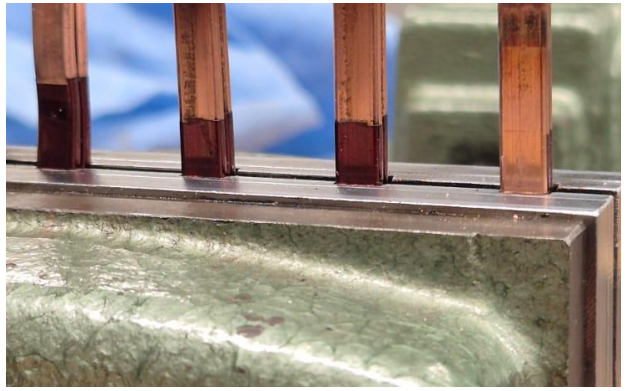
Joustavat tapit vaihtelevat: kamera mittaa raon ja siirtymän, OCT korkeuden, ja laserparametrit mukautuvat.



Laserhitsatut hairpin-parit

TAPIN JA VIRTAKISKON HITSAUS







Sovellus

Tapit (hairpin-johtimet, navat) hitsataan vaihekiskoihin ja kytkentärenkaisiin.

Avainparametri: h

Tapin ulkonemakorkeus määrää hitsin muodostavan sulan tilavuuden ja sitä kautta hitsin muodon ja liitoksen lujuuden.

Laserit ja strategia

IR-laser (hyvä säteenlaatu) tai vihreä laser; ympyrä- / spiraalioskillointi tapin päällä; h:n ja välyksen tarkka hallinta.

YHTEENVETO

Komponentti	Materiaalit	Päähaaste	Laser	Strategia
Kennoliitännät (liuskat, kiskot, navat)	Al, Cu, Ni-pinnoitettu teräs	Ohuet osat, Al–Cu-IMC:t, lämpö kennoon	Yksimuoto- / ydin+rengas-kuitu, pulssi, vihreä	Oskillointi / spiraali, syvyyden hallinta
Kennokotelot (kansi, täyttöaukko, venttiili)	Al 3xxx	Hermeettisyys, roiskeet, kulmat	Kuitu + skanneri, ydin+rengas	Yhtenäinen sauma, tehon alasajo
Jäähdytyslevyt	Al 3xxx / 5xxx / 6xxx	Huokoset, halkeamat, oksidi → vuodot	Monimuoto- / ydin+rengas-kuitu	Oskillointi, lisäaine, kiinnitys, vuototesti
Hairpin-staattorit	Cu-ETP / Cu-OF	Heijastavuus, roiskeet, toleranssit	Vihreä, IR ydin+rengas, IR + oskillointi	Kamera-adaptiivinen, OCT
Tappi–virtakisko	Cu	Sulan tilavuus (h), välys	IR (hyvä säteenlaatu) tai vihreä	Ympyrä- / spiraalioskillointi

Päiviesti: valitse aallonpituus ja säteen muoto materiaalin mukaan ja tee prosessista vakaa oskilloinnilla, kiinnittimillä ja valvonnalla.

Euroopan unionin osarahoittama

ETELÄ-KARJALAN LIITTO

LAPPEENRANTA

LUT University

LISÄLUKEMISTA

LÄHTEET

[1] Ophir Photonics: Green and blue laser welding (Cu:n absorptio aallonpituuden mukaan). ophiropt.com/blog/green-and-blue-laser-welding-need-to-upload-ariellas-revised-version/

[2] Coherent / Laser Focus World: Advances in laser welding prismatic battery: can to cap. laserfocusworld.com/laser-processing/article/14279643

[3] Coherent: Solution brief, welding aluminium foil busbar to copper bar (ARM). coherent.com/web-resources/solution-brief/welding-aluminum-foil-busbar-to-copper-bar-sb

[4] TRUMPF: Whitepaper, laser stripping and welding of hairpins for EV motors (2021). chargedevs.com/wp-content/uploads/2021/04/TRUMPF_Whitepaper_Laser-stripping_welding_EV.pdf

[5] AMADA Weld Tech: Electric motor hairpin welding, comparing 3 joining technologies. amadaweldtech.com/blog/electric-motor-hairpin-welding-comparing-3-joining-technologies/

[6] Potentials of optical coherence tomography for process monitoring in laser welding of hairpin windings (FAU). cris.fau.de/publications/269392417

[7] Precitec: Measurement and adaptive solutions for stator production. precitec.com/e-mobility/powertrain/

[8] Tech Briefs: Laser beam shaping increases welding speed of EV battery coolers. techbriefs.com/component/content/article/47658

Tämän paketin periaatekuvat ovat yksinkertaistettuja eivätkä ole mittakaavassa.


LUT
University