

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 1(34)
--	---	---	-----------------------

Metallituotteiden uusi elämä (MUE) hankkeen DED-Arc testausten kokeellinen osuus

Miikka Karhu, Timo Kankala, Sakari Koivunen ja Antti Nousiainen
Turun ammattikorkeakoulu



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 2(34)
--	---	---	-----------------------

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Esipuhe	3
2.	Johdanto	4
3.	Hankkeen alustavia DED-Arc kokeita, osa #1	4
3.1	Kokeiden tavoitteet ja kuvaus	4
3.2	Kokeissa käytetyt laitteistot ja materiaalit	4
3.3	DED-Arc kokeet T1-T5: tulokset ja tulosten tarkastelu	5
3.3.1	Koe T1: 5 palkoa, palkojen offset-arvon testausta	6
3.3.2	Koe T2: 3 palkoa, T1 tuloksiin perustuvan offset-arvon testaus	7
3.3.3	Koe T3: 3 palkoa, langansyöttö-arvon lisäys 20%:lla => $v_F = 6$ m/min, T1 tuloksiin perustuen offset-arvon valinta	8
3.3.4	Koe T4: 3 palkoa, kuljetusnopeuden arvon lisäys 40%:lla => $v_W = 7$ mm/s ja langansyöttö-arvon lisäys 40%:lla => $v_F = 8.4$ m/min, sekä T1 tuloksiin perustuen offset-arvon valinta	9
3.3.5	Koe T5: 5 palkoa rinnakkain ja 5 palkokerrosta päällekkäin (5 x 5), DED-Arc parametrit perustuen kokeessa T4 saatuihin tuloksiin	10
3.3.6	Metallografiset poikkileikkaushiekuvat DED-Arc koekappaleista T1-T5	13
4.	MUE-hankkeen DED-Arc jatkokokeita, osa #2	14
4.1	Kokeiden tavoitteet ja kuvaus	14
4.2	Monipalko-suorakaidekoekappale K1 kerrostuskokeet	15
5.	Suorakerrostus-testauksien yritys-case esimerkki	17
5.1	Esittely ja taustaa	17
5.2	Suorakerrostustestaukset L-sarjan suorilla koekappaleilla	20
5.3	Koekappaleiden L1 ja L2 metallografian tulokset	22
5.4	Koekappaleiden L1 ja L2 iskutkeys- ja kovuuskokeiden tulokset	24
5.5	Lieriömäisen case-koekappaleen DED-Arc suorakerrostus	30
5.6	Yhteenveto	33



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 3(34)
--	---	---	-----------------------

1. Esipuhe

Lukijalle

Tämä tekninen raportti on osa julkisten tietopakettien sarjaa, joka on tuotettu Metallituotteiden uusi elämä -hankkeessa (hankekoodi A80607) hankkeen työpakettien tuloksien levittämiseen yrityksille ja muille sidosryhmille.

Metallituotteiden uusi elämä on Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) rahoituksen saanut hanke, joka on osa Uudistuva ja osaava Suomi 2021–2027 –ohjelmassa tehtävää kehittämistoimintaa. Hankkeen kesto oli 1.1.2024 – 30.6.2026. Hankkeen osarahoittajana on ollut Euroopan unioni ja rahoittavana viranomaisena Varsinais-Suomen liitto. Hanke toteutettiin ryhmähankkeena yhteistyössä Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston kanssa sekä yhteistyössä erityisesti Varsinais-Suomen valmistavan teollisuuden yritysten kanssa. Hankkeen kokonaistavoiteena oli saada suomalainen ja erityisesti Varsinais-Suomen alueen teollisuus käyttämään suorakerrostustekniikkaa osien korjaamiseen, kunnostukseen ja uudelleenvalmistamiseen ja sitä kautta yritykset ottamaan kiertotalouden näkökulma osaksi heidän liiketoimintamalliaan.

Terveisin,

Turun ammattikorkeakoulun ja Turun yliopiston hanketiimien työpakettien tekemiseen osallistuneet työryhmän henkilöt



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 4(34)
--	---	---	-----------------------

2. Johdanto

Metallituotteen uusi elämä -hankkeen tulokset julkaistaan teknisinä tietopaketti-raportteina, jotka on suunnattu ensisijaisesti valmistavan teollisuuden toimijoille. Em. raportit yhdessä muodostavat kokonaisuuden, joka tukee yrityksiä suorakerrostuspohjaisen korjauksen arvioinnissa, käyttöönotossa ja liiketoiminnallisessa hyödyntämisessä.

Tämä julkinen tietopaketti-raportin osa esittelee hankkeessa tuotetun hitsausvalokaareen perustuvan suorakerrostustekniikan eli DED-Arc (Directed Energy Deposition Arc) parametrien kartoitustyön sekä teollisuuden yritys-case esimerkin suorakerrostus-testauksien kokeelliset tulokset.

3. Hankkeen alustavia DED-Arc kokeita, osa #1

3.1 Kokeiden tavoitteet ja kuvaus

Yhtenä hankkeen työpakettien toimenpiteiden tehtävänä ja tavoitteena oli kartuttaa hitsausvalokaareen perustuvan suorakerrostustekniikan eli DED-Arc (Directed Energy Deposition Arc) perusparametritietoutta ja prosessitietämystä hankkeen suorakerrostukseen liittyvien kehittämistehtävien pohjaksi ja tueksi. Tässä raporttiosiossa on kuvattuna alustavista testauksista testit 1-5 (T1-T5). Edellä mainittujen testien tarkoitus oli hakea hitsausparametreja ja niiden sopivaa keskinäistä suhdetta kuten **langansyöttönopeus (v_F) ja kuljetusnopeus (v_W)** sekä palkojen välistä sivuttaista vaakatason limitystä (ns. offset-arvo, L_{HBO}), ylätavoitteena oli suorakerrostaa DED-Arc –prosessilla noin 100 mm pitkä 5 x 5 palon (5 palkoa limittäin rinnakkain, yhteensä 5 kerroksessa) suorakaide-”palkki” peruslevyn pintaan. Kerrostusten leveys- ja korkeusmitat ($w \times h = \text{mm} \times \text{mm}$) mitattiin työntömitalla yksittäisten palkojen kerrostuksen välillä. Mittaustulokset ovat kolmen mittauksen keskiarvoja. Hitsatuista koekappaleista (T1-T5) valmistettiin metallografiset poikkileikkaushieet, joiden makrohiepoikkileikkauskuvista (Kuvat 2, 3 ja 4) voitiin arvioida vierekkäisten palkojen liittymistä toisiinsa ja samalla tarkastella jos palkojen ja/tai perusmateriaalin välillä esiintyy esimerkiksi liitosvirheitä.

3.2 Kokeissa käytetyt laitteistot ja materiaalit

Kokeissa käytettiin DED-Arc –suorakerrostukseen alla olevan luettelon mukaisia laitteita:

- Universal Robots UR10e-nivelvarsikobotti (kuva 1.)
- Kemppi A7 MIG Power source 450 -hitsausvirtalähde (kuva 1.)

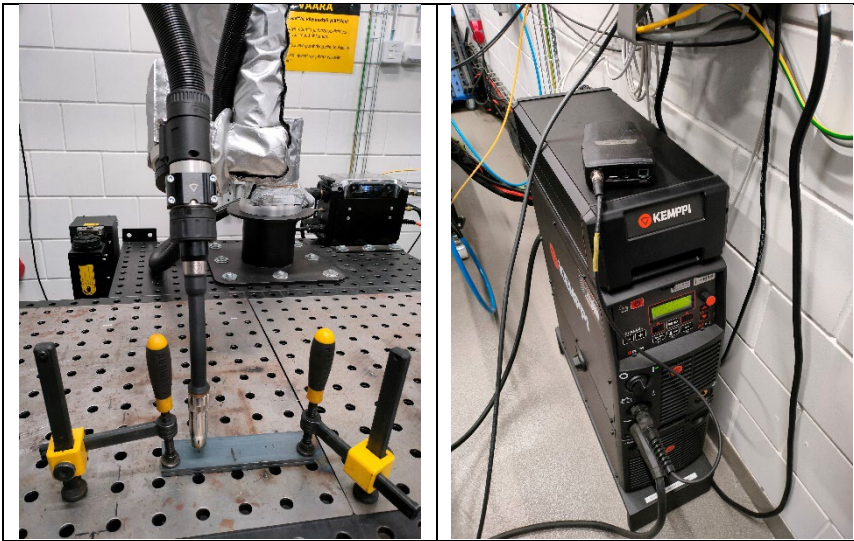


**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 5(34)
--	---	---	-----------------------



Kuva 1. DED-Arc kokeissa käytetty koelaitteisto.

Käytetyt koemateriaalit, perusaine ja lisäaine alla luetteloituna:

- Perusaine: rakenneteräs S235, levyn mitat paksuus 5 mm x leveys 50 mm x pituus 200 mm
- Lisäainelanka: Lincoln Ultramag G42 3C 3Si1, halkaisija $\varnothing$ 1.0 mm

3.3 DED-Arc kokeet T1-T5: tulokset ja tulosten tarkastelu

Testauksissa käytetyt vakiohitsausparametrit ovat luetteloituna alla:

- Kosketussuutinetäisyys (L_{KSE}): 17 mm
- Suojakaasu: Woikoski SK-18 (Ar+18 CO₂), kaasuvirtausnopeus = 17 l/min
- Poltinkulma: ”neutraali”, kuljetuskulma kohtisuoraan (90°) työkappaleen pintaan nähden

Testauksissa käytettyjen hitsausparametrien tunnuslyhenteet ja yksiköt ovat luetteloituna alla:

- Hitsauspolttimen ohjelmointiradan vaakasuora etäisyys ns. offset-arvo kerrostettavien palkojen välillä: L_{HBO} [mm]
- Polttimen kuljetusnopeus: v_w [mm/s]



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 6(34)
--	---	--	---------------

- Lisäainelangan syöttönopeus: v_F [m/min]
- Hitsausvirta: I [A]
- Kaarijännite: U [V]

3.3.1 Koe T1: 5 palkoa, palkojen offset-arvon testausta

Kokeessa T1 hitsattiin viisi 150 mm pitkää hitsipalkoa rinnakkain levyn päälle. Levyn mitat olivat 5 mm x 50 mm x 200 mm. Palkojen hitsausjärjestys hitsaussuuntaan nähden oli => 1. palko keskelle – 2. palko vasemmalle puolelle – 3. palko oikealle puolelle – 4. palko vasemmalle puolelle – 5. palko oikealle puolelle. Palkojen optimaalisen limityksen mahdollistavaa ns. offset-arvon suuruutta testattiin kolmella eri arvolla ($L_{HBO} = 3, 4.5$ ja 3.75 mm). Edellä mainittu L_{HBO} -arvo tarkoittaa edellisen palon keskilinjan ja seuraavan viereen hitsattavan palon keskilinjojen välistä etäisyyttä. Jos etäisyys (L_{HBO} -arvo) on liian iso, palkojen väliin jää vajoama eli ns. ”laakso” tai pahimmillaan palkojen ja/tai perusaineen väliin muodostuu liitosvirhe, jos vierekkäisten palkojen kyljet eivät sula riittävästi tai sulan liityntä perusaineeseen jää vajaaksi. Jos puolestaan käytetty L_{HBO} -arvo on liian pieni, vierekkäiset palot limittyvät liikaa toisiinsa ja vaarana on, että edellisen palon poikkileikkauksen pinta-alan volyyymi aiheuttaa viereen hitsattavaan palkoon valuman ja epätasaisen hitsien välisen pinnan tai jopa vajaan tunkeuman (liitosvirhe) perusaineeseen.

Palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet ovat nähtävissä Taulukossa 1. Hitsatusta koekappaleesta T1 valmistetun metallografisen poikkileikkaushieen makrohiepoikkileikkaus on nähtävissä Kuvassa 2a (luku 2.3.6).

Taulukko 1. Koe T1 palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet.

Koe T1	L_{HBO} [mm]	Polttimen kuljetus nopeus v_w [mm/s]	v_F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havainnot
1 palko	-	5	5	135	18.1	6 x 3	
2 palko	3	5	5	135	18.1	8.3 x 4.3	offset-etäisyys L_{HBO} liian pieni, liitosvirhe rajaviivalla
3 palko	4.5	5	5	135	18.1	w = 13.5	offset-etäisyys L_{HBO} liian suuri, liitosvirhe
4 palko	3.75	5	5	135	18.1	w = 17.5	offset-etäisyys L_{HBO} sopiva
5 palko	3.75	5	5	134	18.1	w = 20.4	”-”



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 7(34)
--	---	---	-----------------------

Kuvasta 2a voidaan arvioida vierekkäisten palkojen liittymistä toisiinsa ja samalla tarkastella, jos palkojen ja/tai perusmateriaalin välillä esiintyy esimerkiksi liitosvirheitä. Kuvasta 2a on nähtävissä, että T1 koekappaleen järjestyksessä toisen palon hitsauksessa käytetty LHBO-arvo 3 mm on liian pieni, koska vierekkäiset palot 1 ja 2 limittyvät liikaa toisiinsa, jolloin edellisen 1-palon poikkileikkauksen pinta-alan volyymi on aiheuttanut viereen hitsattavaan 2-palkoon valuman ja epätasaisen hitsien välisen pinnan. Langansyöttö 5 m/min ja hitsausenergia ($135 \text{ A} \times 18.1 \text{ V} = 2444 \text{ W}$) ei ole ollut riittävä, koska valokaaren sulatustehoa ei ole riittänyt perusaineen täydelliseen sulamiseen, jolloin 2-palon ja perusainelevyn välille on jäänyt liitosvirhettä. 3-palon hitsauksessa käytetty LHBO-arvo 4.5 mm on liian suuri, koska palkojen 1 ja 3 väliin jää vajoama eli ns. "laakso" sekä palkojen ja perusaineen väliin on jäänyt liitosvirhe koska vierekkäisten palkojen kyljet eivät sula riittävästi, sekä sulan liityntä perusaineeseen on jäänyt vajoaksi. 4- ja 5-palko ovat hitsattu identtisillä hitsausparametreilla, sekä niissä on käytetty hypoteesia, jossa aiempiin tuloksiin (palot 1-3) perustuen palkojen välisen offset-etäisyyden valinnaksi on määritetty $\Rightarrow \text{LHBO} = (\text{palon leveys mm:nä} / 2) + 0.75 \text{ mm} = 3.75 \text{ mm}$. Kuvasta 2a voidaan havaita, että em. etäisyys $\text{LHBO} = 3.75 \text{ mm}$ on testisarjasta kaikkein optimaalisin. Palkojen 4 ja 5 välinen liittyminen aiemmin hitsattuihin palkoihin on onnistunut. Valokaaren hitsausteho on ollut kuitenkin liian alhainen, joka on nähtävissä siitä, että molemmissa reunoissa palko 4 ja palko 5 hitsien rajaviivojen läheisyydessä on havaittavissa liitosvirhe perusaineen ja hitsiaineen välillä.

Seuraavissa jatkokokeissa (T2, T3-T5) oli tarkoitus testata koesarjan T1 tuloksiin perustuvan palkojen välisen optimi offset-etäisyyden valinnan hypoteesia $\text{LHBO} = (\text{palon leveys mm:nä} / 2) + 0.75 \text{ mm}$ sekä T3-T4 kokeissa myös sopivaa hitsausenergian tasoa liitosvirheiden välttämiseksi varioimalla hitsauspolttimen kuljetusnopeuden ja langansyöttönopeuden yhdistelmää.

3.3.2 Koe T2: 3 palkoa, T1 tuloksiin perustuvan offset-arvon testaus

Kokeessa T2 hitsattiin kolme 150 mm pitkää hitsipalkoa levyn päälle. Palkojen hitsausjärjestys hitsaussuuntaan nähden oli $\Rightarrow$ 1. palko keskelle – 2. palko vasemmalle puolelle – 3. palko oikealle puolelle. T2 kokeessa haluttiin testata edellisissä kokeissa havaittu optimi LHBO-arvo ($\text{palon leveys mm:nä} / 2 + 0.75 \text{ mm}$) toistamalla koe kolmella rinnakkaisella hitsillä ja käyttämällä samaa optimi LHBO-arvoa $= 3.75 \text{ mm}$. T2:n palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet ovat nähtävissä taulukossa 2. Hitsatusta koekappaleesta T2 valmistetun metallografisen poikkileikkaushieen makrohiepoikkileikkaus on nähtävissä Kuvassa 2b.



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 8(34)
--	---	--	---------------

Taulukko 2. Koe T2 palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet.

Koe T2	L _{HBO} [mm]	V _W [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havainnot
1 palko	-	5	5	132	18.0	6 x 3	
2 palko	3.75	5	5	122	18.0	8.6 x 3.5	virran arvo alhaisempi vrt. 1 palko, hitsin rajaviivalla liitosvirhe, ks. kuva 2: T2
3 palko	3.75	5	5	122	18.0	w = 12.5	-"

Kuvasta 2b arvioiden, palkojen välisen offset-etäisyyden valintamääritys => L_{HBO} = (palon leveys mm:nä / 2) + 0.75 mm = 3.75 mm näyttäisi toimivan tässä kokeessa hyvin, antaen kasvatetulle palkokerrokselle melko tasaisen yläpinnan poikkileikkausprofiilin. Kuvasta 2b on havaittavissa myös, että valonkaaren hitsausteho on ollut liian alhainen, koska palko 2:n ja palko 3:n molemmissa reunoissa hitsien rajaviivojen läheisyydessä on nähtävissä liitosvirhe perusaineen ja hitsiaineen välillä.

3.3.3 Koe T3: 3 palkoa, langansyöttö-arvon lisäys 20%:lla => v_F = 6 m/min, T1 tuloksiin perustuen offset-arvon valinta

Kokeessa T3 hitsattiin muuten samalla tavalla kolme rinnakkaista palkoa (palkojärjestys kuvassa 2c) levyn päälle kuin kokeessa T2, sillä erolla että T3 kokeessa haluttiin nostaa hitsausenergiaa suuremmaksi kuin T2:ssa, jotta päästäisiin eroon aiemmin mainitusta T2:ssa havaitusta liitosvirheongelmasta. Hitsausenergian nosto tarkoitti sitä, että langansyöttönopeutta lisättiin 20 %:lla T2:ssa käytetystä arvosta 5 m/min arvoon 6 m/min T3-kokeessa. Edellä mainitulla langansyöttönopeuden lisäyksellä hitsausteho saatiin nousemaan noin 2200–2400 W tasosta noin tasolle 2700 W.

Palkojen järjestys hitsaussuuntaan nähden => 1. palko keskelle – 2. palko vasemmalle puolelle – 3. palko oikealle puolelle (ks. Kuva 2c).



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 9(34)
--	---	---	-----------------------

Taulukko 3. Koe T3 palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet.

Koe T3	LHBO [mm]	VW [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havainnot
1 palko	-	5	6	150	18.7	6.5 x 3.2	palko levenee => offset hypoteesin mukaisesti
2 palko	4.0	5	6	145	18.7	10.0 x 3.7	
3 palko	4.0	5	6	146	18.7	w = 14.2	

Kuvassa 2c on nähtävissä makrohiekuva koe T3:n kerrostuksesta. Em. kuvasta on havaittavissa, että T3:ssa käytetty korotettu hitsausenergia verrattuna koe T2:een on juuri ja juuri riittänyt sulattamaan molempien reunaviivojen palkojen hitsit perusainelevyyn. Kerrostuspoikkileikkaus voisi olla yläpinnaltaan tasaisempi, koska kerrostuksen pintaan on keskelle jäänyt hieman "laaksoa" 1- ja 3-palon väliin. Em. vuoksi seuraavassa kokeessa T4 pyrittiin etsimään vielä parempaa langansyöttönopeus/hitsausnopeus-yhdistelmää.

3.3.4 Koe T4: 3 palkoa, kuljetusnopeuden arvon lisäys 40%:lla => $v_w = 7$ mm/s ja langansyöttö-arvon lisäys 40%:lla => $v_F = 8.4$ m/min, sekä T1 tuloksiin perustuen offset-arvon valinta

Kokeessa T4 hitsattiin muuten samalla tavalla kolme rinnakkaista palkoa (palkojärjestys kuvassa 2c) levyn päälle kuin kokeessa T2 ja T3, sillä erolla että T4 kokeessa varioitiin sekä hitsauspolttimen kuljetusnopeutta että langansyöttönopeutta, tavoitteena löytää sopiva yhdistelmä, jolla hitsausenergian taso olisi riittävä liitosvirheiden välttämiseksi sekä kasvatuksen tuottavuutta (palon leveys) lisäävä vaikutus. Langansyöttönopeutta lisättiin 40 %:lla T3:ssa käytetystä arvosta 6 m/min arvoon 8.4 m/min ja samalla kuljetusnopeutta lisättiin 40 %:lla arvosta 5 mm/s arvoon 7 mm/s T4-kokeessa. Edellä mainitulla langansyöttönopeuden lisäyksellä hitsausteho saatiin nousemaan 2700 W tasosta noin tasolle 4000 W.

Palkojen järjestys hitsaussuuntaan nähden => 1. palko keskelle – 2. palko vasemmalle puolelle – 3. palko oikealle puolelle.



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

Taulukko 4. Koe T4 palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet.

Koe T4	LHBO [mm]	VW [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havainnot
1 palko	-	7	8.4	184	22.4	7.2 x 3	palko levenee => offset hypoteesin mukaisesti
2 palko	4.35	7	8.4	177	22.5	12.2 x 3	
3 palko	4.35	7	8.4	178	22.5	16.2 x 3	

Kuvassa 2d on nähtävissä makrohiekuva koe T4:n kerrostuksesta. Em. kuvasta on havaittavissa, että käytetty hitsausenergia on ollut sopiva sulattamaan riittävästi sekä perusaineen että vierekkäisten palkojen liittymän toisiinsa. Lisäksi langansyöttö- ja hitsausnopeusarvot ovat keskenään tasapainossa, tuottaen paremman muodon poikkileikkaukseen verrattuna T3:ssa saavutettuun kerrostusgeometriaan (Kuva 2c). T4 kokeessa tehdyillä parametrimuutoksilla kerrostuksen poikkileikkaus on saatu tasaisemmaksi ja kasvatuksen leveyttä saatu myös lisättyä verrattuna T3:een.

3.3.5 Koe T5: 5 palkoa rinnakkain ja 5 palkokerrosta päällekkäin (5 x 5), DED-Arc parametrit perustuen kokeessa T4 saatuihin tuloksiin

Kokeessa T5 käytettiin edellisen kokeen T4 kerrostusparametrejä tavoitteena suorakerrostaa poikkileikkaus, jossa on 5 palkoa rinnakkain viidessä päällekkäin olevassa kerroksessa. Palkokohtaiset parametritiedot ovat nähtävissä Taulukossa 5. Kerrostushitsauksen aikana palkokerroksen vaihtuessa, kosketussuutinetäisyys määritettiin edellisen palkokerroksen pinnasta.

Palkojen järjestys hitsaussuuntaan nähden: => palot hitsataan kerroksittain 5 palkoa rinnakkain järjestyksessä vasemmalta oikealle ja 5 palkokerrosta.

Taulukko 5. Koe T5 palkokohtaiset hitsausparametrit ja hitsipalkojen mitatut poikkileikkaussuureet.

Koe T5	LHBO [mm]	VW [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havainnot
1 PALKOKERROS							
1 palko	-	7	8.4	177	22.5	7.2 x 3	
2 palko	4.35	7	8.4	182	22.5	11.3 x 3.3	
3 palko	4.35	7	8.4	178	22.5	15.6 x 3.4	
4 palko	4.35	7	8.4	179	22.5	20 x 3.3	
5 palko	4.35	7	8.4	184	22.5	24.4 x 3.3	



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 11(34)
--	---	--	----------------

Koe T5	L _{HBO} [mm]	V _W [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havaintoja
2 PALKOKERROS							
1 palko	-	7	8.4	181	22.6	-	reunimmainen palko valuu hieman alimman palon reunan yli
2 palko	4.35	7	8.4	185	22.5	-	
3 palko	4.35	7	8.4	184	22.5	-	
4 palko	4.35	7	8.4	183	22.5	-	
5 palko	4.35	7	8.4	178	22.5	-	

Koe T5	L _{HBO} [mm]	V _W [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havaintoja
3 PALKOKERROS							
1 palko	-	7	8.4	172	22.4	-	
2 palko	4.35	7	8.4	173	22.4	-	
3 palko	4.35	7	8.4	177	22.5	-	
4 palko	4.35	7	8.4	174	22.5	-	
5 palko	4.35	7	8.4	179	22.5	-	

Koe T5	L _{HBO} [mm]	V _W [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havaintoja
4 PALKOKERROS							
1 palko	-	7	8.4	168	22.5	-	
2 palko	4.35	7	8.4	173	22.4	-	
3 palko	4.35	7	8.4	174	22.5	-	
4 palko	4.35	7	8.4	177	22.5	-	
5 palko	4.35	7	8.4	175	22.4	-	

Koe T5	L _{HBO} [mm]	V _W [mm/s]	V _F [m/min]	Virta k.a. [A]	Jännite k.a. [V]	Kasvatettu poikkileikkaus, leveys [w = mm] x korkeus [h = mm]	Havaintoja
5 PALKOKERROS							
1 palko	-	7	8.4	170	22.4	-	
2 palko	4.35	7	8.4	-	-		langansyöttövirhe, lanka paloi



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 12(34)
--	---	--	----------------

							kosketussuuttimeen kiinni
3 palko	4.35	7	8.4	179	22.5	-	
4 palko	4.35	7	8.4	175	22.5	-	
5 palko	4.35	7	8.4	175	22.5	-	

Kuvissa 3 ja 4 on nähtävissä T5 kokeessa tehdyn monipalkokerrostuksen poikkileikkauksien makrohiekuvia. Em. kuvista voidaan havaita, että palkojen sekä palkokerrosten väliset liittymiset sekä vaaka- että pystysuunnassa toisiinsa nähden ovat onnistuneet lukuun ottamatta Kuvan 4 vasemmassa poikkileikkauksikuvassa 4-palon alla näkyvää liitosvirhettä. 5 x 5 monipalkokerrostuksen poikkileikkaus vaaka ja pystysuunnassa on suurimmillaan noin 24 mm x 16 mm. Yksittäisen palkokerroksen korkeus on puolestaan hieman yli 3 mm. Kokeessa yhtenä tavoitteena oli saada kerrostuksen poikkileikkauksen sivuseinämät kestävämmän mahdollisimman suorina pohjalevyyn nähden. Kuvasta 3 voidaan nähdä, että kasvatuksen seinämien kohtisuoruus perusainelevyn tasoa vastaan ei ole pysynyt halutunlaisena. Seinämien kohtisuoruuteen vaikuttaa hitsisulan käyttäytyminen jähmettymisen aikana. Painovoima pyrkii vetämään sulaa alaspäin liikkeelle, jolloin reunimmaisat palot ovat kokeessa T5 päässeet hieman valumaan alas ja sivulle ennen jähmettymistään. Seuraavissa jatkokokeissa tarkoituksena oli testata, pystyttäisiinkö vaakapalkojen kerrostuspalkojärjestyksellä ja parametrien lisäoptimoinnilla saamaan hitsisula paremmin hallintaan ja siten kasvatuksen seinämärakenteen poikkileikkausgeometria halutunlaiseksi.



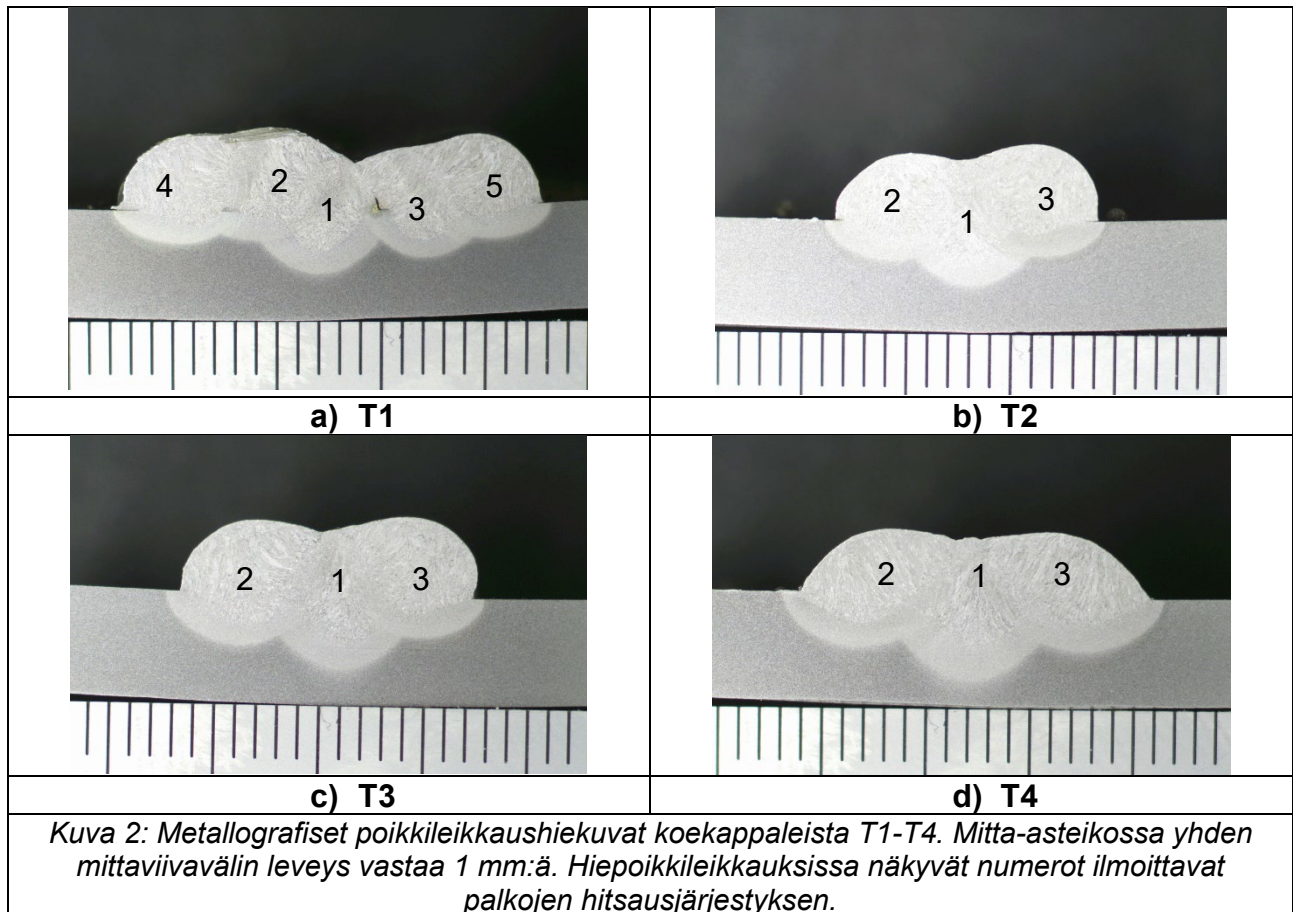
**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 13(34)
--	---	---	------------------------

2.3.6 Metallografiset poikkileikkaushiekuvat DED-Arc koekappaleista T1-T5



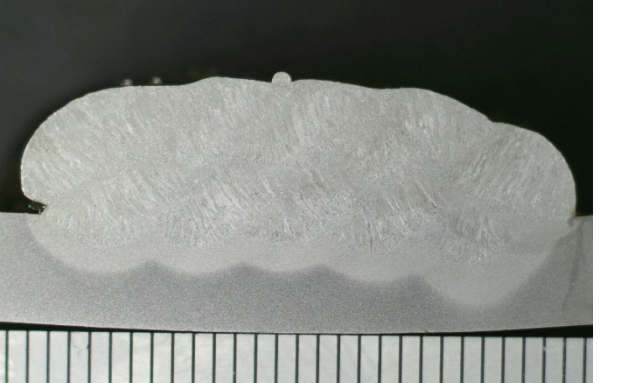
Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 14(34)
--	---	--	----------------

	
T5: 5 x 5 palkoa (syövytysaika lyhyempi)	T5: 5 x 5 palkoa (syövytysaika pitempi)
<i>Kuva 3: Metallografiset poikkileikkaushiekuvat eri syövytysajalla koekappaleesta T5, jossa kerrostettuna 5 palkokerrosta päällekkäin siten että yhdessä palkokerroksessa 5 palko rinnakkain (5 x 5 palkoa). Mitta-asteikossa yhden mittaviivavälin leveys vastaa 1 mm:ä.</i>	

	
T5: 1 palkokerros, 5 palkoa rinnakkain	T5: 2 palkokerrosta, 5 palkoa rinnakkain
<i>Kuva 4: Metallografiset poikkileikkaushiekuvat koekappaleesta T5. Vasemmalla kerrostettuna 1 palkokerros ja oikealla 2 palkokerrosta. Mitta-asteikossa yhden mittaviivavälin leveys vastaa 1 mm:ä.</i>	

4. MUE-hankkeen DED-Arc jatkokokeita, osa #2

4.1 Kokeiden tavoitteet ja kuvaus

Hankkeen DED-Arc kokeita jatkettiin perustuen aiemmin raportoitujen alustavien kokeiden käytännön kokemuksiin ja tuloksiin perustuen sekä niitä soveltaen. Tämän raportin osassa



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

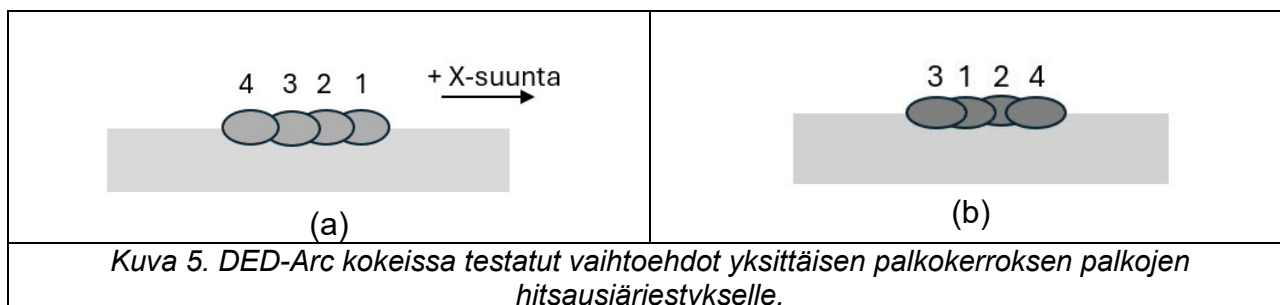
 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 15(34)
--	---	---	------------------------

#1 on kuvattuna käytetyt koelaitteistot, joilla kokeita jatkettiin myös osassa #2. Hankkeessa tehtävän yritysysteistyön mukana tuli testattavaksi sovellusesimerkki, josta saatiin alustavasti geometriareunaehdoja kerrostettavalle rakenteelle, jonka mukaisesti voitiin asettaa tavoitteet DED-Arc jatkokokeissa kerrostusmenetelmän soveltuvuuden testaamiselle. Testattavaksi poikkileikkausgeometriaksi asetettiin noin 200 mm halkaisijaltaan oleva lieriö rakenne, jonka suorakaideseinämän paksuus oli noin 20 mm ja korkeus noin 20 mm. Jatkokokeet alkoivat testauksilla, joissa 20 mm x 20 mm suorakaide poikkileikkausgeometria pyrittiin kerrostamaan suorina noin 150–250 mm pitkinä koekappaleina. Jatkokokeissa vaihdettiin testeihin myös paksumpi lisäainelanka Ø 1.0 mm:stä Ø 1.2 mm:n halkaisijaiseksi, joka paremmin edustaa teollisuudessa robottihitsauksessa yleisesti käytettävää langanpaksuutta. Langansyöttö- ja kuljetusnopeusparametrijärjestelmä Ø 1.2 mm:n langalle suhteutettiin prosentuaalisesti vastaamaan Ø 1.0 mm:n langalla optimoitua parametrijärjestelmää. Pyrkimyksenä oli pysyä lyhytkaari-alueella roiskeisuuden välttämiseksi.

Suorille koekappaleille tehtyjen kerrostusparametrien selvittämisen jälkeen, kerrostustestaukset suoritettiin em. optimiparametreilla myös lieriökoekappaleelle DED-Arc kerrostusprosessin soveltuvuuden testaamiseksi.

4.2 Monipalko-suorakaidekoekappale K1 kerrostuskokeet

Aiemmin tehdyissä alustavissa kerrostuskokeissa havaittiin, että yksittäisen palkokerroksen rinnakkaisten palkojen hitsausjärjestyksellä oli merkitys hitsisulan hallintaan ja siten kerrostettavan kasvatuksen suorakaidepoikkileikkauksen geometrian muodon hallintaan. Jatkokokeissa käytettiin rinnakkaisten palkojen vaihtelevaa järjestystä, koska tasaisesti rinnakkain etenevä palkojärjestys ei testattavassa geometriassa antanut kunnollista hitsisulan ja poikkileikkausmuodon hallintaa. Kuvassa 5 on esitettyä edellä mainittu palkojärjestyksen muutos. Vasemmalla kuvassa 5a tasaisesti rinnakkain yhteen suuntaan etenevä palkojärjestys ja oikealla (Kuva 5b) jatkokokeissa käyttöön otettu vaihteleva palkojärjestys.

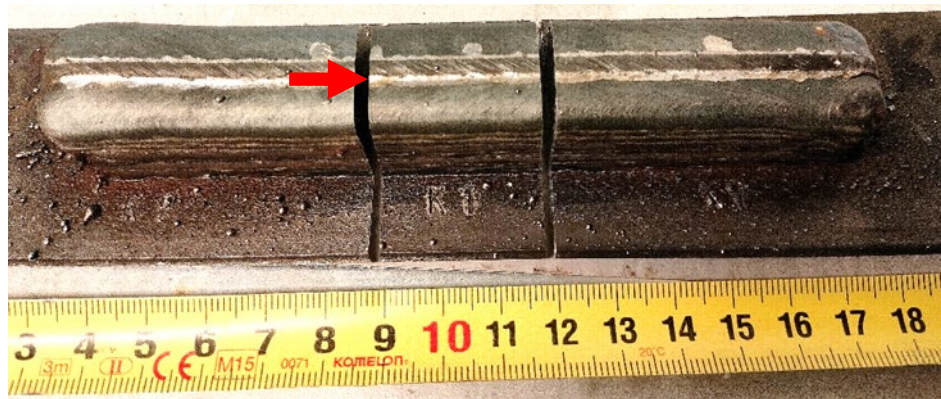


 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 16(34)
--	---	---	------------------------

Alla on nähtävissä listattuna koekappale K1 kerrostuskokeessa käytetyt parametritiedot:

- Kosketussuutinetäisyys (L_{KSE}): 17 mm
- Suojakaasu: Woikoski SK-18 (Ar+18 CO₂), kaasuvirtausnopeus = 17 l/min
- Poltinkulma: ”neutraali”, kuljetuskulma kohtisuoraan (90°) työkappaleen pintaan nähden
- Hitsauspolttimen ohjelmointiradan vaakasuora etäisyys (x-suunta) ns. offset-arvo kerrostettavien palkojen välillä: $L_{HBO} = 4.3$ mm (palon nimellisleveys = 7 mm)
- Hitsauspolttimen ohjelmointiradan pystysuora etäisyys (z-suunta) ns. offset-arvo kerrostettavien palkokerrosten välillä: $L_{VBO} = 2.8$ mm
- Polttimen kuljetusnopeus: $v_W = 6.5$ mm/s
- Lisäainelangan syöttönopeus: $v_F = 4.7$ m/min (20.5 – 20.6 V / 167 – 170 A)
- Lisäainelanka: Lincoln SupraMig Ultra 46 3 C1 4Si1, halkaisija $\varnothing 1.2$ mm
- Hitsauksen aloitus- ja lopetusarvot Kempissä/UR-cobotissa
 - Hot Start: Level 10%, Time 0,5s
 - Crater Fill: Start 80%, End 50%, Fill time 1,5s
- Suorakerrostus 4 rinnakkaista palkoa (palkojärjestys ks. kuva 5) per kerros, yhteensä 9 kerrosta
- Yksittäisen palon pituus: 140 mm

Kuvassa 6 on nähtävissä DED-Arc suorakerrostuskoekappale K1:n poikkileikkausnäyte irti sahattuna metallografisen hieen valmistusta varten. Punainen nuoli kuvassa osoittaa poikkileikkauspinnan, josta hiekuva valmistettiin. Hitsaussuunta on vasemmalta oikealle.



Kuva 6. DED-Arc suorakerrostuskoekappale K1:n poikkileikkausnäyte irti sahattuna metallografisen hieen valmistusta varten.

Kuvassa 7 on nähtävissä K1-kokeessa tehdyn monipalkokerrostuksen poikkileikkauksen makrohiekuva. Em. kuvasta voidaan havaita, että palkojen sekä palkokerrosten väliset liittymiset sekä vaaka- että pystysuunnassa toisiinsa nähden ovat onnistuneet ja sulan jähmettyminen kerrostuksen edetessä on saatu palkojärjestyksellä ja kaariparametreilla



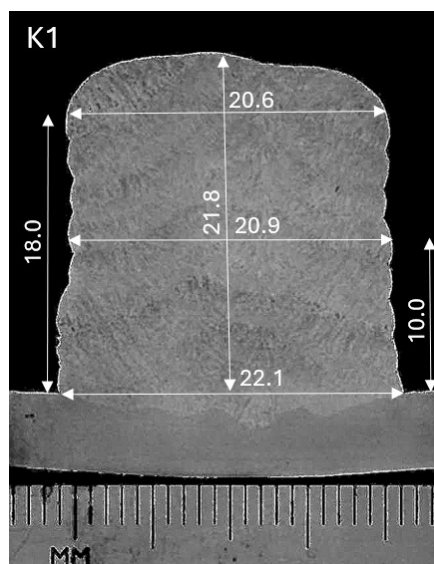
Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 17(34)
--	---	---	------------------------

pidettyä tavoitteidenlaisena. Suorakaidepoikkileikkauksen seinämäpaksuus mitattiin olevan välillä 20.6 – 22.1 mm ja korkeus keskeltä kasvatusta 21.8 mm (Kuva 7).



Kuva 7. DED-Arc suorakerrostuskoekappale K1:n poikkileikkauksesta valmistettu metallografinen makrohiekuva sekä leveys- ja korkeusdimensioita esitettynä. Esitetyt mittalukemat millimetrejä. Kuvan alaosassa näkyvän mittanauhan yksi viivaväli vastaa 1 mm:ä.

Alustavien- ja jatkokokeiden DED-Arc testauksilla kartoitettujen kerrostusparametriyhdistelmien ja kokemuksien karttuessa hankkeessa testattiin DED-Arc kerrostuksen soveltuvuutta yritysyhteistyön mukana tulleeeseen sovellusesimerkki-caseen. Tästä sovellusesimerkki-casesta on esiteltynä tietopaketti seuraavissa luvuissa.

5. Suorakerrostus-testauksien yritys-case esimerkki

5.1 Esittely ja taustaa

Tässä osiossa kuvataan DED-Arc yritys-case esimerkille suoritettut testaukset. Testaukset sisälsivät suorakerrostuksen menetelmäparametrien soveltuvuuden testaamista tavoitellun poikkileikkauksen ja rakennegeometrian saavuttamiseksi sekä ainetta rikkovaa testausta ja metallografiaa. Yhteistyössä yrityksen kanssa testattavaksi esimerkkikohteeksi valikoitui rakenneteräksestä hitsatun kaivoslaitteen kokoonpanoon liittyvä lieriömäinen varusteluosa.

Yrityksen kanssa käytyjen keskustelujen ja haastattelujen pohjalta voitiin listata seuraavia kannustumia ja motivaatioita case-esimerkin valinnan taustalla:



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 18(34)
--	---	---	------------------------

- Suorakerrostuksen (DED-Arc) soveltuvuuden testaus komponentin vaihtoehtoisena valmistusmenetelmänä verrattuna nykyiseen tapaan toimia, jossa nykyisessä kokonaisprosessissa esimerkki-casen komponentti hankitaan alihankintana (levystä polttoleikkaamalla tehty osa).
- Kokonaistyydyttävyyden vähentäminen => käytetty aika ja kustannukset
 - o Kokonaisprosessin korvaaminen yhdellä työvaiheella. Nykyisessä toimitusketjussa mm. seuraavia toimintoja:
 - Ostos, tilaus (levystä polttoleikkaamalla tehty osa)
 - Varusteluosien kuljetus
 - Varusteluosien varastointi, varaston hallinta
 - Varusteluosien asennus ja hitsaus kokoonpanoon
 - Kiertotalousnäkökanta; materiaalihävikin ja energian säästäminen
- Automaatioasteen hyödyntäminen ja nostaminen
 - o Nykyisen tuotannossa olevien hitsausrobottien ja hitsausvirtalähteiden soveltuvuus suorakerrostamiseen
- vaihtoehtoisen valmistusmenetelmän ”jalkauttaminen” suunnittelu-osastolle
 - o Tiedon hankintaa uusien valmistusmenetelmien antamista mahdollisuuksista

Ylätason tavoitteena oli selvittää, soveltuuko DED-Arc suorakerrostusmenetelmä valmistusmenetelmäksi, jolla yllä mainittujen motivaattorien mukaisesti voitaisiin korvata nykyinen käytössä olevan varusteluosakomponentin valmistustapa.

Case-esimerkin testauksissa selvitettiin suorakerrostusprosessin laatuun ja toimivuuteen liittyviä tekijöitä. Ensinnäkin oli arvioitava, voidaanko poikkileikkausgeometria tuottaa riittävällä laatuolosuhteella siten, että geometrinen laatu ja mittatarkkuus vastaavat komponentille asetettuja toiminta- ja toleranssivaatimuksia.

Lisäksi oli tarkasteltava kerrostuksessa muodostuvien hitsipalkojen laatua sekä niiden mekaanisia ominaisuuksia. Erityistä huomiota kiinnitettiin rinnakkaisten palkojen ja päällekkäisten palkokerrosten väliseen liittymiseen. Kerrostuksen tuli muodostua juohevasti ilman liitosvirheitä, halkeamia tai muita eheyttä heikentäviä epäjatkuvuuksia.

Materiaalin metallurgista eheyttä arviointiin määrittämällä muun muassa kovuus, kovuusjakauma sekä iskutietoisuussuhteet. Näiden ominaisuuksien perusteella voitiin arvioida valmistusprosessin vaikutuksia rakenteen suorituskykyyn ja käyttökelpoisuuteen.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 19(34)
--	---	---	------------------------

Alustavien testausten tuloksia hyödynnettiin suorakerrostusparametrien optimoinnissa. Optimointi kohdistui erityisesti hitsausvirtalähteen kaariparametrien säätöihin sekä työstöratojen ohjelmointiin, jotta valmistuslaatu, mittatarkkuus ja materiaalin ominaisuudet voidaan saavuttaa mahdollisimman tehokkaasti ja luotettavasti.

Suorakerrostettujen koekappaleiden ominaisuuksia arvioinnin apuna käytettiin seuraavia testaus- ja karakterisointimenetelmiä:

- Tutkimusta varten koekappaleista irrotettiin näytteet sahaamalla, minkä jälkeen ne koneistettiin muotoonsa makrohiekoekappaleiden ja iskukoekappaleiden valmistusta varten.
- Materiaalin rakenteellista laatua tutkittiin metallografisin menetelmin. Tätä varten valmistettiin poikkileikkaushieitä, joiden avulla voitiin tarkastella kerrostuneen rakenteen geometriaa, palkojen toisiinsa sulautumista sekä mahdollisia valmistusvirheitä. Poikkileikkauspinnat dokumentoitiin makrohiekuvauksen avulla analysointia varten.
- Materiaalin mekaanisia ominaisuuksia arvioitiin kovuusmittauksilla käyttäen Vickers HV10 -koemenetelmää. Kovuusmittausten avulla määritettiin sekä perusaineen että hitsiaineen materiaalin paikallinen kovuus, että kovuuden jakautuminen eri alueilla/vyöhykkeillä.
- Lisäksi materiaalin sitkeysominaisuuksia tutkittiin Charpy-V-iskusitkeys-kokeilla. Iskusitkeystulosten avulla arvioitiin kerrostetun materiaalin ja muutosvyöhykkeen kykyä vastustaa äkillisiä kuormituksia ja absorboida murtumiseen johtavaa energiaa.

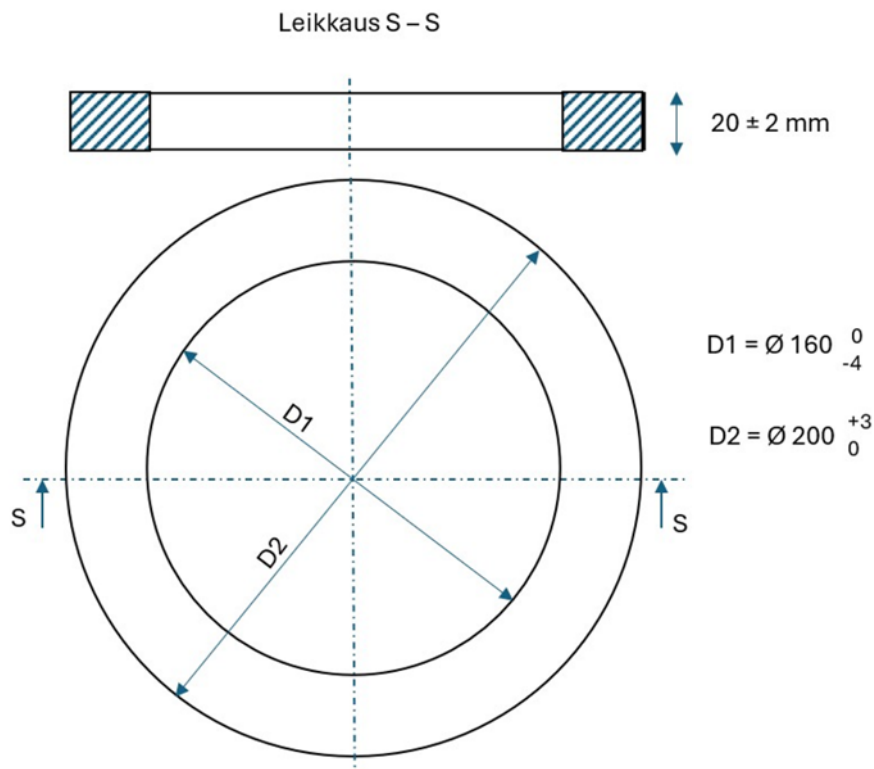
Case-esimerkin lieriömäiselle koekappaleella annettiin kuvassa 8 esitetyt tavoitegeometrit. Sisä- ja ulkohalkaisijoiden toleranssitavoitteista, voitiin laskea, että suorakerrostuksen seinämäpaksuus tulisi olla välillä 20 – 23.5 mm. Kerrostetun rakenteen korkeus puolestaan välillä 18 – 22 mm.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



Kuva 8. Lieriömäiselle testikoeappaleelle määritetyt tavoitegeometriat.

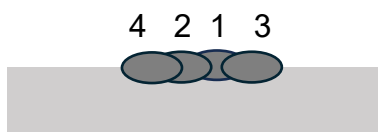
5.2 Suorakerrostustestaukset L-sarjan suorilla koekappaleilla

Testaukset aloitettiin valmistamalla kaksi suorakerrostettua testikappaletta, jotka nimettiin tunnuksilla L1 ja L2. Testikappaleiden valmistuksessa tarkasteltiin välipalkokerroksen lämpötilan vaikutusta kerrostusprosessiin ja lopputuotteen ominaisuuksiin. Testikappale L1 valmistettiin ilman välipalkokerroksen lämpötilarajoitusta, jolloin kerrostusta jatkettiin ilman ennalta määriteltyä maksimilämpötilaa palkokerrosten välillä. Testikappaleen L2 valmistuksessa puolestaan rajoitettiin välipalkokerroksen lämpötila enintään 175 °C:een. Tällä pyrittiin hallitsemaan materiaalin lämpöhistoriaa sekä vähentämään korkealämpötila-aika-altistuksen mahdollista haitallista vaikutusta rakenteen muodostumiseen, mikrorakenteeseen ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Näiden kahden L1 ja L2 testikappaleen vertailun avulla voitiin arvioida välipalkokerroksen lämpötilan vaikutusta suorakerrostetun rakenteen geometriseen laatuun, metallurgiseen eheyteen sekä mekaanisiin ominaisuuksiin.

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 21(34)
--	---	---	------------------------

Alla on nähtävissä listattuna koekappaleiden L1 ja L2 kerrostuskokeessa käytetyt parametritiedot:

- Kosketussuutinetäisyys (L_{KSE}): 17 mm
- Suojakaasu: Woikoski SK-18 ($Ar+18 CO_2$), kaasuvirtausnopeus = 17 l/min
- Poltinkulma: "neutraali", kuljetuskulma kohtisuoraan (90°) työkappaleen pintaan nähden
- Hitsauspolttimen ohjelmointiradan vaakasuora etäisyys (x-suunta) ns. offset-arvo kerrostettavien palkojen välillä: $L_{HBO} = 4.3$ mm (palon nimellisleveys = 7 mm)
- Hitsauspolttimen ohjelmointiradan pystysuora etäisyys (z-suunta) ns. offset-arvo kerrostettavien palkokerrosten välillä: $L_{VBO} =$ palon nimelliskorkeus (2.5 mm)
- Polttimen kuljetusnopeus: $v_W = 6.5$ mm/s
- Lisäainelangan syöttönopeus: $v_F = 4.7$ m/min (20.5 – 20.6 V / 167 – 170 A)
- Hitsauksen aloitus- ja lopetusarvot Kempissä/UR-cobotissa
 - Hot Start: Level 10%, Time 0,5s
 - Crater Fill: Start 80%, End 50%, Fill time 1,5s
- Suorakerrostus 4 rinnakkaista palkoa (palkojärjestys ks. kuva 9 alla) per kerros, yhteensä 10 kerrosta
- Yksittäisen palon pituus: 270 mm



Kuva 9. Yksittäisen palkokerroksen palkojen hitsausjärjestys.

Käytetyt koemateriaalit, perusaine ja lisäaine alla luetteloituna:

- Perusaine: rakenneteräs S355K2, levyn mitat paksuus 25 mm x leveys 100 mm x pituus 300 mm
- Lisäainelanka: Lincoln SupraMig Ultra 46 3 C1 4Si1, halkaisija $\varnothing 1.2$ mm (Lot number: E1MG190420)

Koekappaleiden L1 ja L2 suorakerrostettujen rakenteiden valmistuksen aikana kelloitettiin robotin sivuaikoja (esim. polttimen siirtymisajat) ja L2 tapauksessa myös odotusajat välipalkokerrosten lämpötilan laskua odottaessa ennen seuraavan kerroksen aloitusta. Kummassakin koekappaleen rakenteessa oli yhteensä 40 palkoa ja yksittäisen palon pituus oli 270 mm. Valmistusajat suorakerrostusrakenteille olivat seuraavat: L1 = 42 minuuttia ja L2 = 47 minuuttia.

Kuvassa 10 on nähtävissä esimerkkinä koekappaleen L2 suorakerrostettu rakenne pelasteltuna tarkempaa makrohie-, -kovuus ja iskusitkeyskaracterisointia varten.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



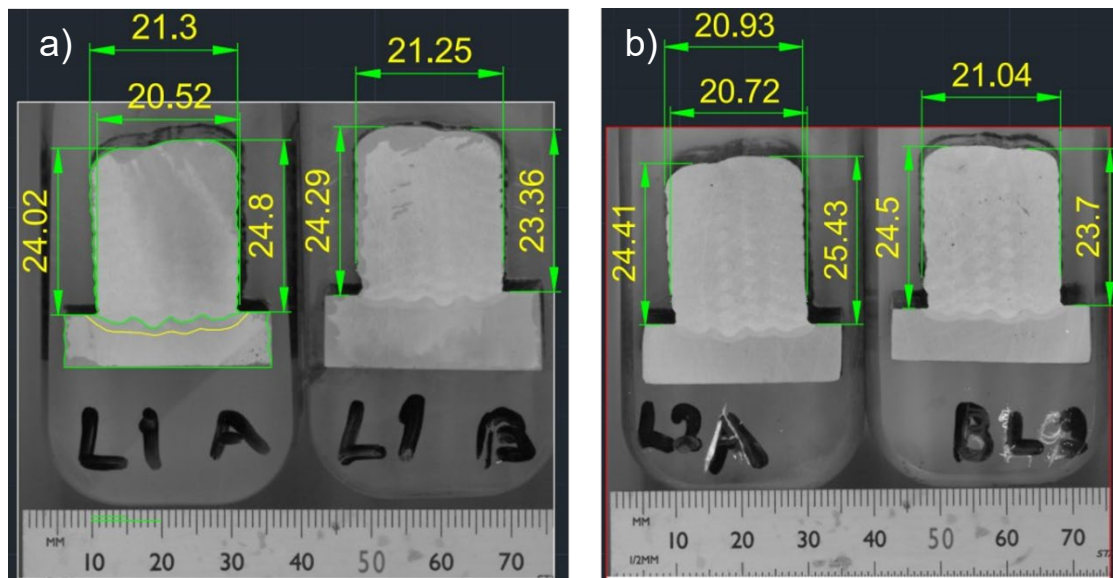
**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



Kuva 10. L-sarjan koekappale DED-Arc kerrostuksesta. Kappaleen palastelu metallografiaa, kovuus- ja iskutitkeys-kokeiden testikappaleiden valmistusta varten. Hitsaussuunta vasemmalta oikealle.

5.3 Koekappaleiden L1 ja L2 metallografian tulokset

Kuvassa 11 on nähtävissä makrohiepoikkileikkaukset koekappaleista L1 ja L2. Vasemmanpuoleisessa kuvassa (11a) on L1A makrohiekuva, joka valmistettu on kerrostettavan koekappaleen aloituspään poikkileikkauksesta ja L1B (kuva 11b), joka on puolestaan valmistettu kerrostettavan koekappaleen lopetuspään poikkileikkauksesta. Vastaavalla esityksperiaatteella on nähtävissä oikeanpuoleisessa kuvassa (11b) myös L2A ja L2B makrohiekuvat.



Kuva 11. Makrohiepoikkileikkaukset koekappalenäytteet: a) L1A ja L1B ja b) L2A ja L2B.

Kuvan 11 makrohieistä on mitattuna poikkileikkauksien äärirajojen mukaiset korkeus- ja leveysmitat. Poikkileikkaustiedot ovat kerättynä taulukkoon 6.

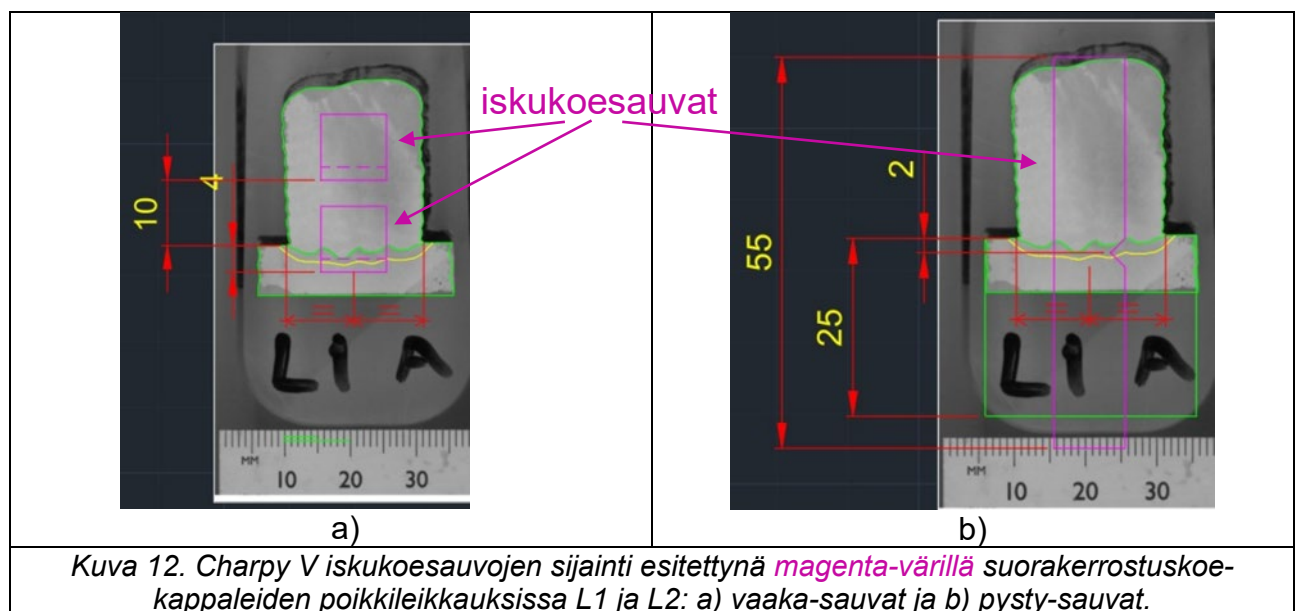
Taulukko 6. Suorakerrostetuista koekappalepoikkileikkauksista mitatut korkeus- ja leveystiedot.

Poikkileikkaus id	Leveys [mm]	Korkeus [mm]
L1A	20.52 – 21.30	24.02 – 24.80
L1B	21.25	23.36 – 24.29
L2A	20.72 – 20.93	24.41 – 25.43
L2B	21.04	23.70 – 24.50

Poikkileikkauksien äärirajojen mukaisia (Taulukko 6) mittausarvoja verrattaessa varsinaisessa lieriötestauskappaleessa tarvittaviin seinämämittojen toleranssitavoitteisiin, havaittiin että neljällä rinnakkaisella palolla per kerros voitiin päästä toleranssialueen sisälle kerrostetun seinämän paksuusmitassa. Kerrostetun poikkileikkauksen korkeuden suhteen voitiin tehdä johtopäätös, että testatun 10 kerrosmäärän sijasta 9 kerrosta antaa riittävän korkeuden lieriötestauskappaleessa.

5.4 Koekappaleiden L1 ja L2 iskutitkeys- ja kovuuskokeiden tulokset

Aiemmin esitettyssä kuvassa 10, on nähtävillä L-koesarjakappaleiden koesauvojen valmistuskohtien periaate, josta A ja B kirjaimin osoitettujen kohtien poikkileikkauksista tehtiin aiemmin esitetty metallografiset makrohiekuvat sekä samoista poikkileikkauksista Vickers- kovuusmenetelmällä tehtävät kovuusmittauskokeet. Lisäksi kuvassa 10 on nähtävissä myös alueet, joista irrotettiin koekappaleaihiot Charpy V-iskutitkeys- kokeiden iskusauvojen (poikkileikkaus 10 mm x 10 mm x 55 mm) koneistusta varten. Periaatekuva iskukoe-sauvojen sijainnista kerrostetuista poikkileikkauksista L1 ja L2 on nähtävissä kuvassa 12a ja 12b. Iskukoe-sauvat nimettiin vaaka-sauvoiksi (kuva 12a) ja pysty-sauvoiksi (kuva 12b). Kaikkia iskukoesauvatyypppejä valmistettiin 4 kappaletta per kerrostettu koekappale L1 ja L2. Kuvassa 12a on nähtävissä vaaka-iskukoesauvan sijainnit: Alempi koesauva, jossa V-loven paikka on muutosvyöhykkeessä, 2 mm perusaineen levytason alapuolella ja ylempi koesauva, jossa V-lovi on hitsauslisäaineessa. Edellä mainitut koesauvat ovat sijoittuneena vaakasuunnassa suorakerrostetun rakenteen pituussuuntaisesti. Kuvassa 12b on puolestaan nähtävissä pysty-iskukoesauvojen sijainti: V-loven paikka on muutosvyöhykkeessä, 2 mm perusaineen levytason alapuolella. Edellä mainitut koesauvat ovat pystysuunnassa, poikittain suorakerrostetun rakenteen pituussuuntaan nähden.



Iskutitkeys- kokeita varten asetettiin case-sovelluskohteen toimintojen puolelta seuraavanlaiset testausvaatimukset: Testauslämpötila -20 °C, jossa



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

iskusitkeysvaatimuksena testaustulosten keskiarvon tulee olla vähintään 60 Joulea ja yksittäisen testaustuloksen minimi vähintään 42 Joulea. Vertailun vuoksi perusainemateriaalilevyn, jonka päälle suorakerrostustestaukset tehtiin, iskusitkeysarvot olivat: koesauvan lovi 90 astetta poikittain levyn valssaussuuntaan nähden => 6:n toiston keskiarvo 101 J ja koesauvan lovi levyn valssaussuuntaan => 6:n toiston keskiarvo 142 J. Testauslämpötilana oli -20 °C. Suorakerrostuskoekappaleista tehtyjen Iskusitkeys-kokeiden kootut tulokset ovat nähtävissä taulukossa 7.

Taulukko 7. Suorakerrostuskoekappaleiden L1:n ja L2:n Charpy-V iskusitkeys-kokeiden kootut tulokset. Testauslämpötilana oli -20 °C.

ISKUKOKEET		MUE	16.12.2025		Zwick/Roell HIT450P	Turun AMK	QTT	
Kankala, Rautava					450J iskuvasara			
Isku no.	Tunnus	Paikka	Suunta	Hitsi	Alku/Loppu		Isku (J)	
1	11W	Hitsi	Vaaka	L1A	Alku		127,70	
2	12W	Hitsi	Vaaka	L1B	Loppu		127,91	
3	21W	Hitsi	Vaaka	L2A	Alku		120,79	
4	22W	Hitsi	Vaaka	L2B	Loppu		118,25	
						keskiarvo	123,66	
5	11	-2	Vaaka	L1A	Alku		90,78	
6	12	-2	Vaaka	L1B	Loppu		77,56	
7	21	-2	Vaaka	L2A	Alku		81,80	
8	22	-2	Vaaka	L2B	Loppu		90,22	
						keskiarvo	85,09	
9	13	-2	Pysty	L1	Keski		25,84	lähes katki
10	13	-2	Pysty	L1	Keski		22,18	lähes katki
11	13	-2	Pysty	L1	Keski		20,32	katkesi
12	13	-2	Pysty	L1	Keski		14,65	katkesi
						keskiarvo	20,75	
13	23	-2	Pysty	L2	Keski		32,35	lähes katki
14	23	-2	Pysty	L2	Keski		28,49	lähes katki
15	23	-2	Pysty	L2	Keski		26,80	lähes katki
16	23	-2	Pysty	L2	Keski		23,94	lähes katki
						keskiarvo	27,90	

Taulukon 7 tuloksista voidaan havaita, että molempien suorakerrostuskoekappaleiden L1 ja L2 vaakasauvojen tulokset täyttävät asetetut vaatimukset. Puhtaan hitsiaineen alueelta tehtyjen vaakakoesauvojen iskukoetulokset (Taulukko 7: Isku no. 1-4, keskiarvo 123,66 J) osoittavat parempaa sitkeyttä verrattuna vaakakoesauvojen tuloksiin (Taulukko 7: Isku no. 5-8, keskiarvo 85,09 J), joissa koesauvan lovi sijaitsee muutosvyöhykkeellä perusaineessa suorakerrostuksen alapuolella. Sen sijaan molempien suorakerrostuskoekappaleiden L1 (Taulukko 7: Isku no. 9-12, keskiarvo 20,75 J) ja L2 (Taulukko 7: Isku no. 13-16, keskiarvo 27,90 J) pystysauvojen tulokset eivät täyttävät asetettuja vaatimuksia. Edellä mainitun

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 26(34)
--	---	---	------------------------

iskusitkeyseroavaisuuden voidaan arvioida johtuvan siitä, että molempien koekappaleiden L1 ja L2 pystykoesauvojen loven sijainti on perusmateriaalilevyn valssaussuuntaan nähden poikittain, joka on sitkeyden kannalta heikompi tilanne verrattuna siihen, jos iskusauvan lovi on valssaussuunnan suuntaisesti. Lisäksi pystykoesauvojen iskukokeessa murtuma etenee kokonaan muutosvyöhykkeessä (HAZ). Edellä mainittu muutosvyöhyke on ensimmäisen palkokerroksen alapuolella noin 2–2.5 mm syvyydellä perusainelevyn alapuolella. Suorakerrostuksessa palkojen hitsauslämpösykli on muuttanut hienorakeisen perusaineen rakennetta sekä mikrorakenteeltaan että raekooltaan hauraammaksi, jolloin perusaineen iskusitkeys on merkittävästi huonontunut ja iskukokeiden tulokset osoittivat haurasta murtumaa. Vaakakoesauvojen (isku no. 5-8, Taulukko 7) osalta muutosvyöhykkeen alueella sijaitsevan loven suunta on sellainen, että iskukokeessa murtuma kulkee vain osittain muutosvyöhykkeessä ja pääosin suorakerrostetussa hitsiaineessa, jolloin muodonmuutoskykyä iskumaisessa kuormituksessa oli enemmän kuin pystykoesauvojen (isku no. 9-12 ja no. 13-16) sarjan iskusauvoilla. Vaakakoesauvojen isku no. 5-8, (Taulukko 7) iskukokeiden tulosten perusteella sauvat murtuivat sitkeästi. Samoin kokonaan hitsiainetta olevat vaakasauvat ja joissa lovi sijaitsi kokonaan hitsiaineessa (Taulukko 7: Isku no. 1-4, keskiarvo 123.66 J) murtuivat sitkeästi. Koekappaleiden L1 ja L2 pystykoesauvojen koetuloksia vertaillen voidaan arvioida, että koekappale L2:n tapauksessa, jossa hitsauslämpöä kontrolloitiin välipalkokerrosten välillä siten, että uutta palkokerrosta ei aloitettu vasta kun kappaleen pintalämpötila oli laskenut 175 °C asteeseen, iskusitkeystulosten keskiarvo oli noin 8 Joule-yksikköä (~25 %) parempi kuin koekappale L1:llä, jolla välipalkokerrosten hitsauslämpöä ei rajoitettu. Perusmateriaalilevyn suorakerrostuksessa tuotu hitsauslämpömäärä sekä hitsauslämpösykli aiheuttaa perusmateriaalilevyn pinnan alle muutosvyöhykkeen, joka iskukokeiden tulosten perusteella osoittautui hauraammaksi kuin kerrostamaton perusmateriaali.

Iskukoetulosten lisäksi haluttiin tarkastella myös hitsiaineesta kerrostetun osuuden ja hitsauslämmöstä muuttuneen perusmateriaalin vyöhykkeiden kovuusarvoja ja kovuusprofiileja, jotta saataisiin lisäkäsitystä kerrostettujen rakenteiden materiaaliominaisuuksista iskusitkeyskokeiden lisäksi.

Kovuuskokeet suoritettiin Vickersin menetelmällä käyttäen HV10 mittayksikköä. Kovuusprofiilimittauksissa käytettiin mittapisteiden välinä 1 mm:ä.

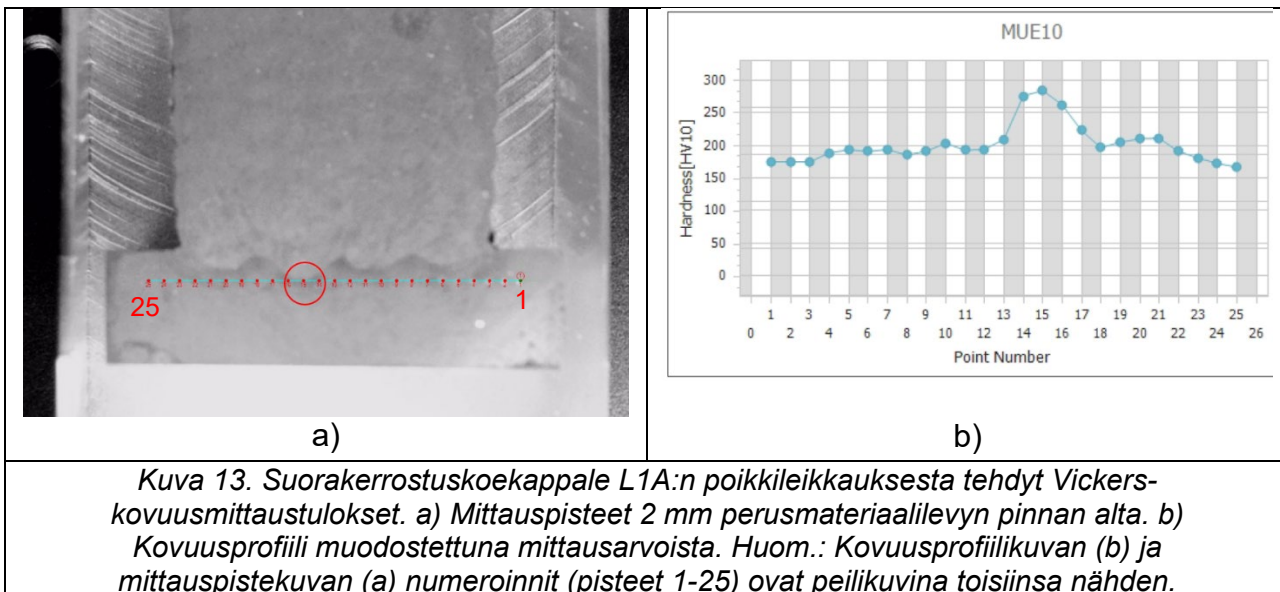
Kuvassa 13a on nähtävissä suorakerrostuskoekappale L1A:n poikkileikkauksesta tehty kovuusmittauspisteiden sijainnit. Kuvassa 13b on esitettyä kovuusprofiili, jossa pystyakselilla on yksittäisten mittapisteiden HV10 kovuudet ja vaaka-akselilla mittauspisteiden numeroinnit. Kovuusmittaukset tehtiin janalta, joka oli 2 mm kerrostettavan perusmateriaalilevyn pinnan alta.



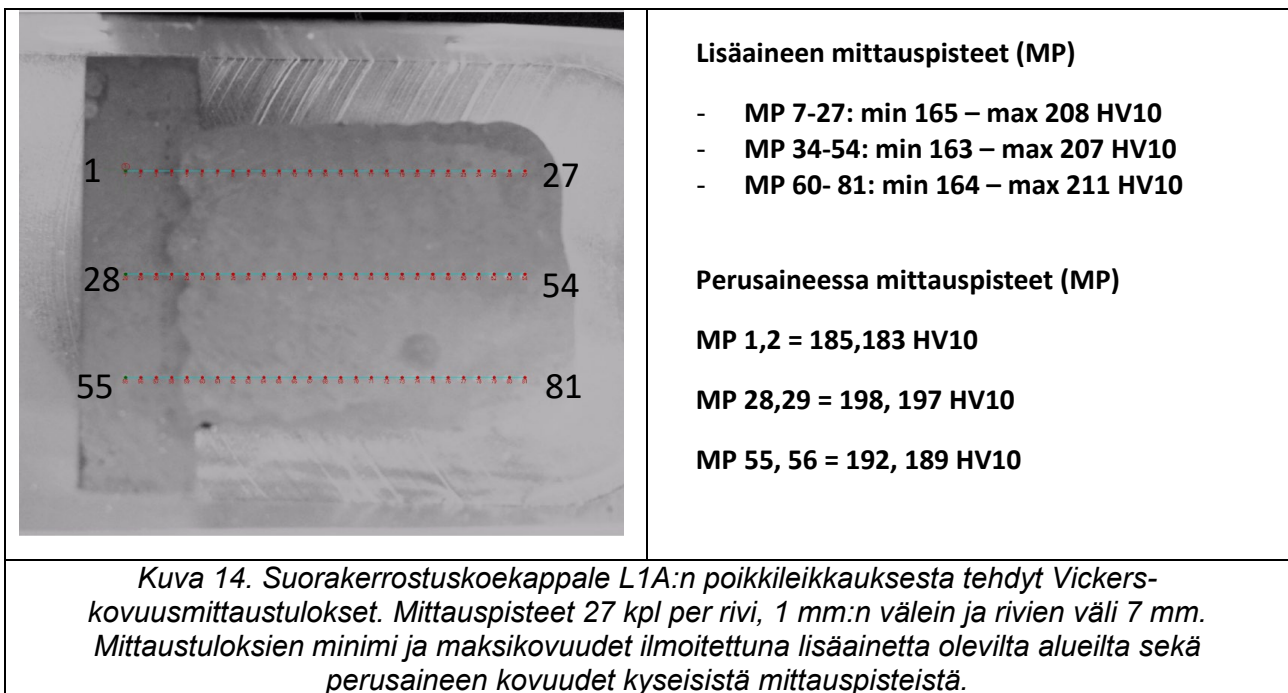
**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**



Perusaineen kovuus alueella, jolla hitsauslämpö ei ole aiheuttanut rakennemuutoksia on noin tasolla 183–198 HV10. Kuvassa 13b on kovuusprofiilissa havaittavissa kovuuspiikki mittauspisteiden 14,15 ja 16 kohdilla. Kuvassa 13a edellä mainittu kohta on ympyröitynä punaisella viivalla. Kyseinen alue sijaitsee sularajan reunalla ja muutosvyöhykkeellä karkearakeisella alueella, kovuustulosten ollessa 263–284 HV10. Ensimmäisen palkokerroksen hitsauksessa kyseisellä kohdalla lämpösykli on aiheuttanut alapuoleiseen muutosvyöhykkeeseen kareneen alueen. Tämä vastaava osittain karennut muutosvyöhykkeen alue on juuri sama kohta, jossa Charpy V - iskukokeiden pystysauvojen loven paikat sijaitsevat. Tämä osaltaan voisi selittää em. sauvatyypin testaustuloksista saatujen iskusitkeysarvojen romahtamisen, koska iskukokeessa murtumalinja kulkee em. kareneen ja hauraan vyöhykkeen läpi, joka ei pysty sitomaan iskuenergiaa yhtä hyvin kuin testatut vaakasauvat, jotka ovat sitkeän hitsiaineen kohdalta valmistetut. Kuvassa 14 on esitetty koekappale L1A:n kovuusmittausrivien paikat kolmelta eri alueelta käsittäen suorakerrostetun alueen joka koostuu pääasiassa lisäaineesta (mittausrivi pisteet 7-27, 34-54 ja 60-81) ja osittain perusaineesta (mittausrivi pisteet 1-2, 28-29 ja 55-56). Kuvassa 14 esitettyjen kovuusmittaustulosten perusteella arvioituna suorakerrostetussa osassa rakennetta, joka on lisäaineella tehtyä, ei esiinny kovuušuippuja kovuustasojen ollessa välillä 163 - 211 HV10.

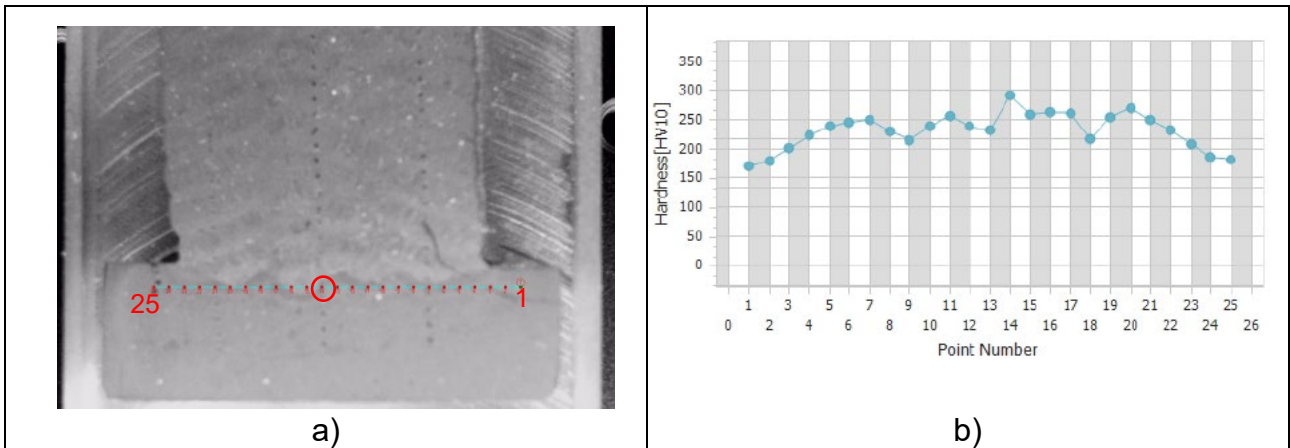


Kuvassa 15a on nähtävissä suorakerrostuskoekappale L2A:n poikkileikkauksesta tehty kovuusmittauspisteiden sijainnit. Erona L1 koekappaleeseen oli se että L2 koekappaleen suorakerrostuksen hitsauksessa välipalkokerroksen lämpötila rajoitettiin max. 175 °C. Kuvassa 15b on esitetty kovuusprofiili, jossa pystyakselilla on yksittäisten mittauspisteiden HV10 kovuudet ja vaaka-akselilla mittauspisteiden numeroinnit. Kovuusmittaukset tehtiin janalta, joka oli 2 mm kerrostettavan perusmateriaalilevyn pinnan alta.

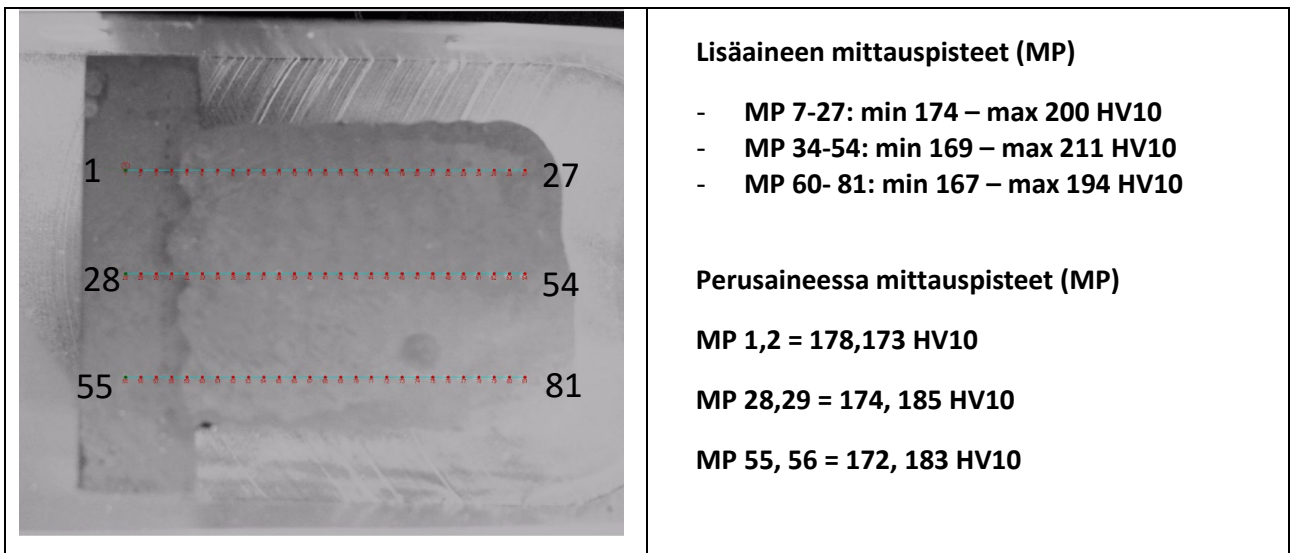
Perusaineen kovuus alueella, jolla hitsauslämpö ei ole aiheuttanut rakennemuutoksia on noin tasolla 170–186 HV10. Kuvassa 15b on kovuusprofiilissa havaittavissa kovuuspiikki mittauspisteen 14 kohdilla. Kuvassa 15a edellä mainittu kohta on ympyröitynä punaisella viivalla. Kyseinen alue sijaitsee sularajan reunalla ja muutosvyöhykkeellä karkearakeisella alueella, kovuuden paikallisesti ollessa 292 HV10. Samoin kuin koekappaleen L1 suorakerrostuksessa myös koekappaleen L2 ensimmäisen palkokerroksen hitsauksessa lämpösykli on aiheuttanut alapuoleiseen muutosvyöhykkeeseen kareneen alueen edellä mainitulla alueella.

Kuvassa 16 on esitetty koekappale L2A:n kovuusmittausrivien paikat kolmelta eri alueelta käsittäen suorakerrostetun alueen joka koostuu pääasiassa lisäaineesta (mittausrivi pisteet 7-27, 34-54 ja 60-81) ja osittain perusaineesta (mittausrivi pisteet 1-2, 28-29 ja 55-56). Kuvassa 16 esitettyjen kovuusmittaustulosten perusteella arvioituna suorakerrostetussa

osassa rakennetta, joka on lisäaineella tehtyä, ei esiinny kovuushuippuja kovuustasojen ollessa välillä 167 - 211 HV10.



Kuva 15. Suorakerrostuskoekappale L2A:n poikkileikkauksesta tehty Vickers-kovuusmittaustulokset. a) Mittauspisteet 2 mm perusmateriaalilevyn pinnan alta. b) Kovuusprofiili muodostettuna mittausarvoista. Huom.: Kovuusprofiilikuvan (b) ja mittauspistekuvan (a) numeroinnit (pisteet 1-25) ovat peilikuvina toisiinsa nähden.



Kuva 16. Suorakerrostuskoekappale L2A:n poikkileikkauksesta tehty Vickers-kovuusmittaustulokset. Mittauspisteet 27 kpl per rivi, 1 mm:n välein ja rivien väli 7 mm. Mittaustuloksien minimi ja maksikovuudet ilmoitettuna lisäainetta olevilta alueilta sekä perusaineen kovuudet kyseisistä mittauspisteistä.

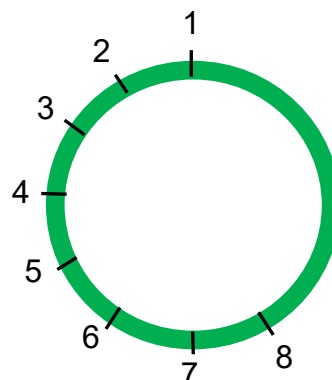
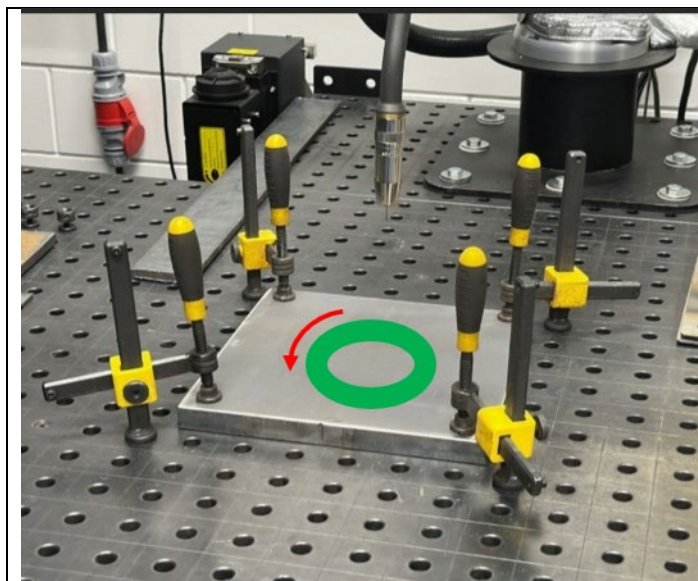
 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 30(34)
--	---	---	------------------------

L1 ja L2 kovuusprofiileja verrattaessa kuvista 13b ja 15b, voidaan tulkita, että L1 koekappaleen suorakerrostuksen lämpösykli on aiheuttanut kerrostuksen alapuoleiseen perusaineen muutosvyöhykkeeseen suuremman kovuustason verrattuna L2 koekappaleen vastaavaan rakenteeseen. Tämä selittyy sillä, että koekappaleen L1 kerrostuksessa L2:sta korkeampi kumuloitunut lämpösyklin (aika korkealämpötiloissa) aiheuttama hehkutus lämpökäsittellee eli päästää voimakkaammin muutosvyöhykkeen ja alemmat palkokerrokset mikä näkyy kovuustasoja vertailtaessa. Iskuitkeyskokeiden tuloksia verratessa taulukosta 7, L1 koekappaleen iskuitkeystulokset ovat huonommat pystysauvojen osalta verrattuna L2:n vastaaviin tuloksiin. Tämä on seurausta siitä, että L1:n suoratulostuksessa rakenne, jonka välipalkokerros­lämpötilaa ei kontrolloitu, altistuu L2 koekappaleelta suuremmalle ja pitkäkestoisemmalle lämpösyklihehkutukselle, joka johtaa L1:n perusaineen muutosvyöhykkeellä hauraampaan mikrorakenteeseen kuin L2:n koekappaleen tilanteessa, jossa välipalkokerroksen lämpötila rajoitettiin max. 175 °C ennen seuraavan palkokerroksen hitsausta. Vaikkakin L1 koekappaleen tilanteessa maksimikovuudet pysyivät alhaisempana, iskuitkeyden kannalta kuitenkin kerrostuksen alapuolinen perusaineen muutosvyöhyke on jäänyt hauraammaksi kuin koekappaleen L2 muutosvyöhykkeen rakenne.

5.5 Lieriömäisen case-koekappaleen DED-Arc suorakerrostus

Case-esimerkin lieriömäisen koekappaleen suorakerrostukseen sovellettiin edellisessä L-koesarjassa käytettyjä kerrostusparametrejä (ks. tekstikappale 4.2). Kerrostukset tehtiin mitoiltaan 300 mm x 300 mm x 30 mm S355K2 rakenneterästä olevan koelevyn päälle. Kerrostuksessa tavoitteena oli toteuttaa lieriökoekappale ja testata miten aiemmin kuvassa 8 esitetyt tavoitegeometriat/toleranssivaatimukset saadaan täytettyä. Hitsausliikkeen kiertosuunta oli vastapäivään ympyrä-hitsausradan kehällä. Rakenteen kerrostuksessa hitsattiin 8 palkokerrosta siten, että yhteen palkokerrokseen tuli 4 palkoa aiemmin kuvassa 9 esitetyllä tavalla. Uusi palkokerros aloitettiin 30 astetta myötäpäivään edellisen palkokerroksen aloituskohdasta, kuva 17.





Kuva 17. Vasemmalla: Perusmateriaalilevyn kiinnitysjärjestelyt lieriökoekappaleen suorakerrotusta varten, sekä vihreällä esitettyä periaate lieriön sijoituksesta. Punainen nuoli osoittaa hitsausliikkeen kiertosuunnan. Oikealla: Palkokerrosten (1-8) aloituskohtien sijainti kerrostettavan kappaleen kehällä.

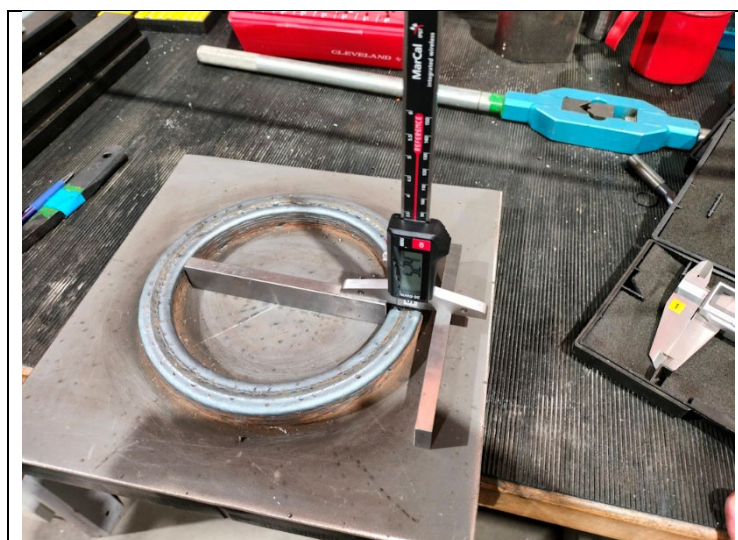
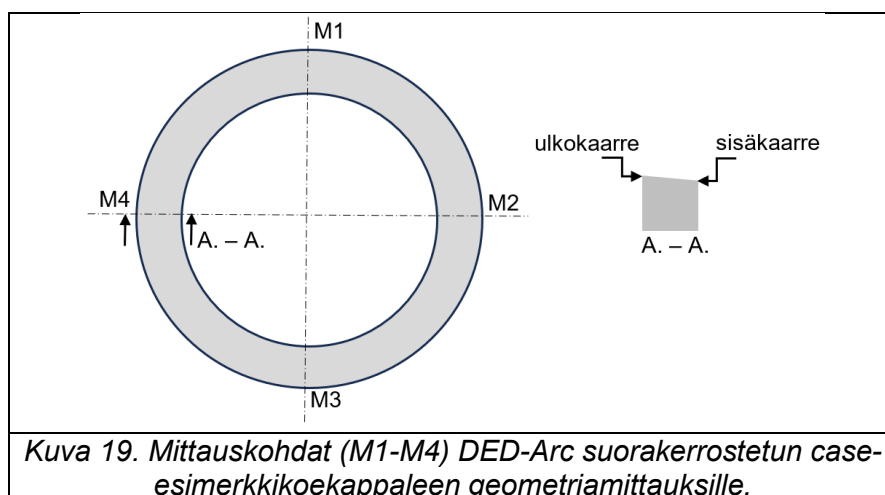
Kuvassa 18 on nähtävissä case-esimerkin lieriömäisen koekappale valmiina suorakerrostettuna.



Kuva 18. DED-Arc suorakerrostettu case-esimerkin lieriökoekappale.

 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 32(34)
--	---	---	------------------------

Kerrostuksen jälkeen kappaleen ulkogeometriaa mitattiin digitaalityöntömitan avulla ja verrattiin aiemmin kuvassa 8 esitettyihin tavoitegeometria/toleranssivaatimuksiin. Kuvassa 19 on esitetty mittauskohdat (M1-M4), joista koekappaleen geometriatietoja mitattiin. Työntömitalla (kuva 20) mitattiin kohtisuoraan rakenteen korkeus pohjalevyn yläpinnasta kerrostetun rakenteen yläpintaan ulko- ja sisäkaarten kohdilta sekä ristikkäiset sisä- ja ulkohalkaisijat sekä seinämäpaksuudet. Yhteenveto mittauksista on nähtävissä taulukossa 8.



Kuva 20. DED-Arc suorakerrostetun case-esimerkkikoekappaleen mittaus digitaalityöntömitalla.



Euroopan unionin
osarahoittama



Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund

Taulukko 8. DED-Arc suorakerrostetun case-esimerkkikoekappaleen geometriamittaukset.

Mittauskohta	Mittaustulos [mm]	Mittavaatimus [mm]
Rakenteen korkeus M1	ulkokaarre ≈ 18.1 / sisäkaarre ≈ 17.7	Korkeus 18 – 22
Rakenteen korkeus M2	ulkokaarre ≈ 18.7 / sisäkaarre ≈ 17.7	
Rakenteen korkeus M3	ulkokaarre ≈ 18.8 / sisäkaarre ≈ 17.6	
Rakenteen korkeus M4	ulkokaarre ≈ 18.5 / sisäkaarre ≈ 17.9	
Rakenteen seinämäpaksuus M1	≈ 22.6	Paksuus 20 – 23.5
Rakenteen seinämäpaksuus M2	≈ 22.6	
Rakenteen seinämäpaksuus M3	≈ 22.6	
Rakenteen seinämäpaksuus M4	≈ 22.5	
Rakenteen sisähalkaisija M1-M3	≈ 156.4	Sisä Ø 156 – 160
Rakenteen sisähalkaisija M4-M2	≈ 156.5	
Rakenteen ulkohalkaisija M1-M3	≈ 201.5	Ulko Ø 200 – 203
Rakenteen ulkohalkaisija M4-M2	≈ 201.6	

Taulukon 8 mittaustuloksia tarkastellessa, voidaan todeta, että case-koekappaleen suorakerrostuksessa lieriögeometria saatiin pääosin kasvatettua onnistuneesti. Lieriön korkeuden suhteen mittavaatimuksen alarajana oli 18 mm. Mittauksissa todettiin päällimmäisen kerroksen sisäkaarteessa noin 0.1–0.3 mm vajoitus vaaditusta minimi kokonaiskorkeudesta. Kasvatuskerroksia oli nyt tehdyssä testauksessa yhteensä 8 palkokerrosta. Yksittäisen palkokerroksen kerrostuskorkeutta kasvattava vaikutus on noin 2.3 mm, joten lisäämällä palkokerrosten määrää yhdellä kerroksella, yhteensä 9 palkokerrokseen saadaan korkeus nostettua noin 20 mm:iin, joka on sopivasti mittavaatimusalueen (18–22 mm) keskivälissä. Testauksessa käytetyillä kerrostusparametreillä edellä mainitun lieriökappaleen geometrian tuotantoajaksi saatiin määritettyä noin 80 minuuttia.

5.6 Yhteenveto

Hankkeessa tehtyjen DED-Arc testausten perusteella saatiin kartoitettua ja lisättyä parametritietoutta suorakerrostusprosessin käyttöön ja suoritustekniikkaan liittyen sekä kokeellista testaustietoa suorakerrostuksen soveltamisesta teollisuudessa materiaaliteknisestä sekä prosessi- ja valmistusteknisestä näkökulmasta. Yhteenvetona voidaan nostaa esille seuraavat asiat:

- Työasemana yhteistyörobotti eli kobotti ja ns. tavallinen hitsausvirtalähde ovat suoraan sovellettavissa DED-Arc suorakerrostukseen. Kerrostettavien geometrioiden monimutkaistuessa esim. yhdistämällä työasemaan



 TURKU AMK TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES	 UNIVERSITY OF TURKU	Dokumentin nimi Metallituotteiden uusi elämä (MUE) – hanke / DED-Arc kokeiden raportti	Sivu 34(34)
--	---	---	------------------------

hitsauskääntöpöytä, jolla voidaan pyörittää ja kallistaa työkappaletta optimaaliseen asentoon, helpottaa sulan hallintaa ja kerrostusta.

- Hitsisulan hallinta ja kerrostettavan sulan volyymi asettavat reunaehdot käytettävälle hitsausparametreille ja kerrostuksen hitsausjärjestykseen, jotta kerrostukselle haluttu muoto ja geometriatarkkuusvaatimukset voidaan saavuttaa
- Suorakerrostuksessa toteutuva kokonaishitsauslämmöntuonti, lämpösykli vaikuttavat muodostuvan kerrostuksen mikrorakenteeseen ja raerakenteeseen, joilla on puolestaan vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin kuten mm. kovuuteen ja iskusitkeyteen.
- Suorakerrostuksessa on otettava kokonaisuutena huomioon edellä mainittu kerrostettavan sulan hallinta sekä muodostuvan kerrostuksen mikrorakenne kerrostusparametrien säätämisellä ja optimoinnilla.
- Käytetyn perusmateriaalin mukaan, erityismerkitys on ensimmäisen kerrostetun palkokerroksen alapuolella, eli perusaineen puolella muutosvyöhykkeessä ja sularajan välittömässä läheisyydessä, jossa karkenevuus ja niistä seurausta olevat hauraat rakenteet voivat heikentää suorakerrostetun komponentin mekaanisia ominaisuuksia, kuten iskusitkeyttä.



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Varsinais-Suomen liitto
Egentliga Finlands förbund**