

NLR-CR-2020-113 |

Inductielassen van composieten met een variabele dikte

OPDRACHTGEVER: NLR

NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Inductielassen van composieten met een variabele dikte

Het inductielassen van thermoplastische composieten met een variabele dikte



RAPPORTNUMMER NLR-CR-2020-113

AUTEUR(S) A. Wels

RUBRICERING RAPPORT ONGERUBRICEERD

DATUM 23-3-2020

KENNISGEBIED(EN) Constructie- en fabricagetechnologie Vliegtuigmaterialen

TREFWOORD(EN) inductielassen thermoplast composiet productie

NLR-CR-2020-113 |

Inductielassen van composieten met een variabele dikte

OPDRACHTGEVER: NLR

AUTEUR(S):

A. Wels

NLR

NLR – Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Niets uit dit rapport mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de eigenaar.

OPDRACHTGEVER	NLR
CONTRACTNUMMER	
EIGENAAR	NLR
NLR DIVISIE	Aerospace Vehicles
VERSPREIDING	Beperkt
RUBRICERING TITEL	ONGERUBRICEERD

GOEDGEKEURD DOOR:																		
AUTEUR					REVIEWER				BEHERENDE AFDELING									
A. Wels																		
DATUM							DATUM						DATUM					

Voorwoord

Dit rapport is een afstudeerrapport tijdens mijn afstudeerstage bij het Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum (NLR) in Marknesse. Deze afstudeerstage is het laatste onderdeel van mijn opleiding Automotive Engineering aan de Hogeschool van Arnhem en Nijmegen. Tijdens de afstudeerperiode ben ik begeleid door Jaap Janssens (HAN) en bedrijfsbegeleider Senne sterk (NLR).

Mijn onderzoek richtte zich op het lassen met thermoplastische composieten met variabele dikte door middel van het inductielas proces en draagt bij aan de kennis betreffende het lassen van composieten binnen NLR. In dit onderzoek is veel data vrijgekomen over de warmteontwikkeling in de diepte van het lasgebied in combinatie met verschillende snelheden bij het gebruik van de huidige inductielas setup bij het NLR. De resultaten van dit onderzoek zullen bijdragen aan toekomstige (vervolg)onderzoeken.

Dit rapport is gemaakt voor mensen die basiskennis hebben over composieten en engineering. Voor de bruikbaarheid van de data of de reproductie van testen moet in acht worden genomen dat de inductiespoel en het materiaal zeer bepalend is voor de bereikte temperaturen of resultaten.

Voordat begonnen wordt aan de rapportage, wil ik graag de mensen bedanken die mij geholpen en ondersteund hebben tijdens mijn afstudeerperiode. Als eerste wil ik graag mijn begeleiding vanuit NLR bedanken, Senne Sterk (afstudeerbegeleider NLR) en Joachim de Kruijk (projectleider). Zij hebben mij begeleid in het maken van keuzes en rapportagetechniek. Ondanks dat Senne mijn begeleider is, is Joachim ongeveer evenveel betrokken geweest tijdens mijn afstudeerperiode bij NLR. Luuk Straathof (operator las-setup en werkvoorbereider) heeft mij in deze periode ondersteund met alle testen en werkvoorbereiding, ook kon ik bij Luuk altijd terecht met vragen over alle overige zaken. Verder is het geweldig dat bij het NLR zo veel kennis is en dat eigenlijk iedereen de moeite wil nemen om bepaalde zaken toe te lichten of zo nodig te ondersteunen. Vanuit de HAN heb ik van Jaap Janssens feedback gehad op mijn conceptrapport en deze zo veel mogelijk verwerkt. Naast Jaap wil ik graag Tenno Kolkman bedanken voor het begeleiden van mijn vorige stageperiode. Tenno heeft er ook voor gezorgd dat ik mijn voorkeur heb laten vallen op een afstudeerproject bij het NLR.

Marknesse, maart 2020

Samenvatting

One of the recent developments in the aerospace industry is the use of thermoplastic composites. Thermoplastic composites can be welded instead of using other bonding techniques. One of the welding techniques is induction welding. Induction welded parts are already used in aerospace applications, yet the technique is quite new and not completely developed. No research has been done or is archived in induction welding of parts with variable thicknesses. Most of the welding parameters are found by "trial-and-error" and have a constant thickness.

The main goal of this project is to gather knowledge and data of welding composites with variable thicknesses. After gathering all the data, a weld can be made with a variable thickness.

The main question is specified as: What is the best way to bind thermoplastic composites by induction welding?

To get an answer to the main question, desk research has been performed to gather information about thermoplastic composites and induction welding. With the information gathered in the desk research, some sub questions ca already be answered. With the information gathered during desk research, test plans are made to get answers to the other sub questions;

Welding composites with variable thickness would require variable parameters. Tests have been performed to analyze the effect of welding speed. This test shows that different speeds can be used for induction welding of thermoplastic composites. Welds are made with three different speeds, the welds are analyzed with C-scan, microscopic research and with tensile tests.

The influence of thickness is analyzed by heating up stacked plates with thermocouples between them. This shows that the desired weld temperatures can be reached in most depths of the weld area. When this test was performed at different speeds, it was shown that different speeds would give a different depth of where the highest temperature will be reached. Weld interfaces that are located too far away from the induction coil cannot be welded with the setup that was used.

By heating up thicker laminates and combining them with thinner laminates, data from the previous test is validated. If the data from the welds are compared it shows that the temperature that will be reached is dependent on the total thickness or mass of the weld area.

After the basic tests have been performed, a test with milled plates is performed. The plates that are used in this test are milled to create scarf like steps. The scarf like steps are used to make weld interfaces at variable depths. This test shows that some edge effect is present at the scarf-like locations but without overheating material around the weld zone. After testing, the plates are welded using data from previous findings. Some parts of the weld zoned required lower speeds to reach the desired process temperature. C-scans show a good result, microscopic photo's that were taken at an intersection parallel to the weld direction show that in the middle of the weld line, almost no voids are present and the weld interface is barely visible.

The last test performed is about welding plates with multiple scarfed like steps. For this weld, previous findings are used and this test required variable speed and current settings. The used settings are found by "trial and error" and cannot be mathematically predicted yet at NLR. C-scans are performed which shows good results.

The main conclusion of this report is that parts with variable thickness are weldable by using variable speed and current settings. These settings are highly dependent of the depth of the interface relative to the induction coil. To weld parts with variable thickness, the right speed and current has to be found by trial and error and they can be derived from the tests performed in this research.

Inhoudsopgave

Afl	kortir	ngen	9
	1.1	Aanleiding	10
	1.2	Probleemstelling	10
	1.3	Doelstelling	10
	1.4	Hoofd en deelvragen	11
	1.5	Structuurbeschrijving	11
2	Lite	eratuurstudie	12
	2.1	Inleiding	12
	2.2	Inductielassen	12
	2.3	Lasopstelling	15
	2.4	Beschrijving lasproces	15
3	Kw	aliteitstesten	17
	3.1	C-scan (non-destructief)	17
	3.2	Trekproeven	18
	3.3	Microscopie	18
	3.4	Kwaliteitseisen	18
4	Tes	ten	19
	4.1	Introductielassen PPS en PEKK	21
		4.1.1 Lasparameters	21
		4.1.2 Evaluatie	23
	4.2	Lassen met verschillende snelheden	25
		4.2.1 Las process data	26
		4.2.2 Kwaliteitstesten	27
		4.2.3 Conclusie	31
	4.3	Temperaturen meten op verschillende dieptes	32
		4.3.1 Bereikte temperaturen	33
		4.3.2 Conclusie en vergelijken van resultaten	35
	4.4	Verwarmen verschillende diktes	35
		4.4.1 Bereikte temperaturen	36
		4.4.2 Conclusie	36
		Edge-effect test	37
	4.5	37	
		4.5.1 Lasparameters	38
		4.5.2 Kwaliteitstesten	40
		4.5.3 Conclusie	43
	4.6	Proefstukken met een variabele diepte van de lasinterface	43
		4.6.1 Lasparameters	44
		4.6.2 Kwaliteitstesten	46
		4.6.3 Conclusie	47

5	Conclusie	48
6	Aanbevelingen	49
7	Referenties	51
Ap	pendix A specificaties	52
	Appendix A.1 Toray/TenCate TC1320	52
	Appendix A.2 Toray/TenCate TC1100	55
	Appendix A.3 Teflon coated glasvezeltape	60
Ap	pendix B Gebruikte componenten	61
	Appendix B.1 Generator	61
	Appendix B.2 Waterkoeler	61
	Appendix B.3 Robot arm	61
	Appendix B.4 Data aquisitiesysteem	61
	Appendix B.5 Laskop-robot interface	62
	Appendix B.6 Inductiespoel	62
	Appendix B.7 Luchtbalg	62
	Appendix B.8 Heatsink	62
	Appendix B.9 Tooling	63
	Appendix B.9.1 SLS	63
	Appendix B.9.2 L-verstijver of scarf joints	63
Ap	pendix C Parameters en gegevens	64
	Appendix C.1 Snelheidlastesten	64
	Appendix C.1.1 20cm/min	64
	Appendix C.1.2 30 cm/min	67
	Appendix C.1.3 40 cm/min	70
	Appendix C.2 Temperaturen op verschillende dieptes	73
	Appendix C.3 Temperaturen bij verschillende diktes	76
	Appendix C.4 Edge effect bereikte temperaturen	77
	Appendix C.5 Variabele lasinterface	85
Ap	pendix D Kwaliteitsresultaten	87
	Appendix D.1 C-scan resultaten	87
	Appendix D.2 Microscopie foto's	121
	Appendix D.2.1 Snelheidslastesten	121
	Appendix D.2.2 Edge effect las	122
	Appendix D.3 Trektestresultaten	123
Ap	pendix E Overige	127
	Appendix E.1 Thermokoppel fabricage methode	127
	Appendix E.2 Afbeeldingen	132
	Appendix E.2.1 Warmte in diepte	132
	Appendix E.2.2 Edge effect test	134

Appendix	x E.2.3 Variabele lasinterface	140
Appendix F Bi	ijlagen	142
Appendix F.1	Bijlage 1 Door de SLB-er getekende SLB-verklaring	142
Appendix F.2	Bijlage 2 Definitief Plan van Aanpak	143
Appendix F.3	Bijlage 3 Reflectieverslag	159

Lijst met figuren

Figuur 1 Electricity generation model, overgenomen uit: Induction welding of high performance thermoplastic	
composites (Dhondt, 2019)	13
Figuur 2 Eddy Current Depth of Penetration (Depth of Penetration & Current Density, -)	13
Figuur 3 Afbeelding met voorbeeld van edge-effect overgenomen uit (Hagenbeek, Vila Bramon, & Fernandez Vi	llegas,
2018)	14
Figuur 4 Las 8044 voorbeeld edge effect	14
Figuur 5 Afbeelding van de inductielas setup	15
Figuur 6 Voorbeeld van een powercurve	16
Figuur 7 Afbeelding over de werking van een C-scan met de "Pulse Echo Method"	17
Figuur 8 Overzicht van uitgevoerde testen	20
Figuur 9 Schets van de plaatsing van thermokoppels bij de PPS introductielas	21
Figuur 10 (rechts) powercurve van 7873 PPS introductielas	22
Figuur 11 Schets van de plaatsing van thermokoppels bij de PEKK introductielas	22
Figuur 12 Powercurve van de PEKK-UD introductielas	23
Figuur 13 Plaatsing van thermokoppels voor de snelheidslastesten met PPS	25
Figuur 14 Powercurve van 7893, 20cm/min	
Figuur 15 Powercurve van 7900 40cm/min	27
Figuur 16 C-scan resultaat 7895 3e las 20cm/min	27
Figuur 17 C-scan resultaat 7897 2e las 30cm/min	27
Figuur 18 C-scan resultaat 7900 2e las 40cm/min	28
Figuur 19 Legenda voor C-scan resultaten snelheidstesten	28
Figuur 20 Afbeelding C-scan resultaat uitvergroot van 7894 20cm/min	28
Figuur 21 Afbeelding C-scan resultaat 7893 20cm/min met doorsnede locaties voor microscopie	28
Figuur 22 microscopie 7893-M1 20cm/min defecten zichtbaar onder de las	29
Figuur 23 microscopie 7983-M2 20cm/min defecten zichtbaar naast de las	29
Figuur 24 C-scan resultaat 7898 30cm/min uitvergroot met doorsnedelocatie voor microscopiemonster	29
Figuur 25 microscopie 7898 30cm/min	29
Figuur 26C-scan resultaat 7900 40cm/min uitvergroot met doorsnede locatie voor microscopiemonster	29
Figuur 27 microscopie 7900 40cm/min	30
Figuur 28 7895 20cm/min trektest monsters na trektesten	30
Figuur 29 Verhouding tussen stroom en snelheid	
Figuur 30 Schets thermokoppel plaatsing (niet op schaal)	32
Figuur 31 Thermokoppel plaatsing (niet op schaal)	32
Figuur 32 Temperatuur over diepte bij 10cm/min en 350A	33

Figuur 33 Temperatuur over diepte bij 20cm/min en 450A (zie hierbij ook het defecte thermokoppel)	34
Figuur 34 Temperatuur over diepte bij 40cm/min en 450A	34
Figuur 35 Relatie tussen temperatuur en stroom op verschillende dieptes	35
Figuur 36 grafiek met bereikte temperaturen van lassen met verschillende laminaat diktes	37
Figuur 37 Schets van de verspaande platen voor het testen van edge effect in laminaat opbouw. (niet op schaal)	37
Figuur 38 Schets van de thermokoppellocaties tijdens de edge-effect las	38
Figuur 39 Schets met schakelpunten van de variabele snelheid bij de edge-effect las	40
Figuur 40 Vergelijken van temperaturen bij verschillende weld-runs	40
Figuur 41 kleurenpallet en de instellingen voor het C-scan resultaat van de edge-effect las	41
Figuur 42 C-scan attenuation, 8044, edge-effect las	41
Figuur 42 Microscopie foto van de Edge-effect las (afbeelding is 90 graden gedraaid)	42
Figuur 44 Afmetingen en TC locaties voor lassen met variabele lasinterface	44
Figuur 45 Legenda C-scan resultaten variabele lasinterface 8044	47
Figuur 46 C-scan Attenuation resultaat 8044 variabele lasinterface	47
Figuur 47 variabele lasinterface, gelaste platen	47

Lijst met tabellen

Tabel 1 behaalde temperaturen bij 7873	22
Tabel 2 Bereikte temperaturen bij verschillende	23
Tabel 3 bereikte temperaturen [°C] van alle snelheidstest lassen	26
Tabel 4 Trektest resultaten snelheidstestlassen	30
Tabel 5 7893 20cm/min temperatuur verschillen	31
Tabel 6 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 10 cm/min	34
Tabel 7 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 20 cm/min	34
Tabel 8 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 40cm/min	34
Tabel 9 Bereikte temperaturen bij lassen met verschillende laminaten bij 400A en 20 cm/min	36
Tabel 10 Gemeten temperaturen bij de edge-effect testen	39
Tabel 11 Variabele snelheid instellen voor edge-effect las bij 450A	39
Tabel 12 Gemeten temperaturen tot 400A variabele lasinterface. Temperaturen zijn met behulp van een	
kleurenschaal te herkennen aan hoog (rood) en laag (groen). Sommige weld-runs zijn meerder malen uitgevoerd bij	j
dezelfde stroom, dit is aangegeven met een nummer achter de stroomsterkte	45
Tabel 13 Bereikte temperaturen bij gebruikte stromen variabele lasinterface TC1 en 11 zijn niet meegenomen bij	
gemiddelden en Delta T	46

Afkortingen

Afkorting of acroniem	Omschrijving
NLR	Royal Netherlands Aerospace Centre
TC	Thermokoppel
SLS	Single Lap Shear
UD	Unidirectioneel
РЕКК	Polyetherketones
PPS	Polyphenylene Sulfide
PFA	Perfluoroalkoxy alkane
ASTM	American Society for Testing and Materials
IPA	Isopropanol Alcohol
KVE	Kok en Van Engelen Composites Group

Introductie

1.1 Aanleiding

NLR draagt bij aan de ontwikkelingen binnen de vliegtuigindustrie. De afdeling Structure Technology binnen NLR levert hierin zijn bijdrage door materialen, productietechnieken en processen te onderzoeken en te ontwikkelen op het gebied van composieten en 3D geprinte metalen. Een van de recentste ontwikkelingen binnen de industrie is het toenemende gebruik van thermoplasten in plaats van thermoharders. Thermoplasten bieden verschillende voordelen, een belangrijk voordeel is de lasbaarheid van het materiaal. Door een deel van een thermoplast onderdeel opnieuw in de smelt te brengen, kan dit samengevoegd worden met een ander thermoplastisch onderdeel. Het lassen kan op meerdere manieren worden uitgevoerd zoals ultrasoon en weerstands lassen (Yousefpour, 2004). Binnen dit project is gekozen om inductielassen verder te onderzoeken en/of ontwikkelen.

1.2 Probleemstelling

Inductielassen van thermoplastische composieten is een relatief nieuwe techniek. Het wordt al wel toegepast in de vliegtuigindustrie (Gardiner, 2018)och is het proces nog niet uitontwikkeld. Delen kunnen pas gelast worden nadat er uitgebreide zogenaamde "trial-and-error" testen zijn uitgevoerd. In de meeste gevallen zijn deze gelaste delen nu vaak delen met een constante dikte en lay-up, waardoor het lasproces in de lengterichting van de las eigenlijk constant is. Naar het inductielassen van composieten met een variabele dikte, zoals verstijvingsribben aan een skin, is binnen het NLR nog weinig onderzoek gedaan. Binnen de vliegtuigindustrie is vraag naar composieten met een uni-directionele lay-up: elke laag bestaat dan uit vezels die in dezelfde richting liggen wat het lasproces bemoeilijkt (T.J. Ahmed, 2005).

1.3 Doelstelling

Het doel van dit project is kennis opbouwen aangaande het lassen van onderdelen met variabele diktes, dit is nodig om de toepasbaarheid van inductielassen te verbreden. Met behulp van verschillende testen en onderzoeken kunnen verschillende parameters van het lasproces vastgelegd worden waarmee uiteindelijk een inductielas kan worden gemaakt van composieten met een variabele dikte.

1.4 Hoofd en deelvragen

Het doel van dit project is kennis en ervaring op doen in het lassen van thermoplastische composieten. Dit doel is niet specifiek, daarom is als opdracht gekozen het lassen van thermoplastische composieten met een variabele dikte. Als hoofdvraag is opgesteld:

• Wat is de beste manier om thermoplastische composieten onderdelen met een variabele dikte doormiddel van inductielassen aan elkaar te verbinden.

De volgende deelvragen dragen elk hun deel bij tot het beantwoorden van de hoofdvraag:

- Wat is inductielassen van thermoplastische composieten?
- Wat zijn de voorwaarden om thermoplastische composieten goed te kunnen lassen?
- Wat is de invloed van verschillende soorten laminaten in het lasproces?
- Wat is de invloed van de dikte op het lasproces?
- Welke parameters kunnen variabel geprogrammeerd worden in het lasproces?
- Kan er wiskundig voorspeld al dan niet benaderd worden welke variabele parameters van toepassing zouden moeten zijn?
- Wanneer is een las van voldoende kwaliteit?

1.5 Structuurbeschrijving

Hoofdstuk 1 van dit rapport bevat de introductie met daarbij de hoofd en deelvragen. Hoofdstuk 2 beantwoord al een aantal deelvragen doormiddel van de uitgevoerde literatuurstudie. In hoofdstuk 3 is beschreven hoe de kwaliteitstesten zijn uitgevoerd van de gemaakte producten. Het uitgevoerde onderzoek is beschreven met de belangrijkste resultaten in hoofdstuk 4. De volgende testen zijn uitgevoerd in hoofdstuk 4:

- Introductielassen
- De invloed van de snelheid op de las
- Temperaturen op verschillende dieptes analyseren
- Temperaturen van lassen met verschillende diktes platen.
- Edge effect analyse en las
- Een variabele lasinterface

Van de uitgevoerde testen is per hoofdstuk beschreven wat de resultaten zijn met in elk hoofdstuk een conclusie van de uitgevoerde test.

In hoofdstuk 5 worden de belangrijkste deelconclusies samengevoegd waarbij de hoofdvraag beantwoordt word. Na het uitvoeren van alle testen en het afronden van dit onderzoek zijn er aanbevelingen voor verder onderzoek, deze zijn beschreven in hoofdstuk 6.

2 Literatuurstudie

2.1 Inleiding

Volgens (Nijssen, 2013) is de definitie van een composiet: "Een composiet is een materiaalconstructie, bestaande uit minimaal 2 macroscopisch nog te onderscheiden materialen die samenwerken om zo tot een beter resultaat te komen."

Een composiet bestaat uit de combinatie van vezels ,veelal glas en voor high-end toepassingen koolstofvezels, en een matrix welke fungeert als een lijm om de vezels met elkaar te verbinden. Voor het inductielassen is het nodig dat de vezels elektrische stroom kunnen geleiden. Inductielassen van thermoplastische composieten kan daarom met koolstofvezel versterkte thermoplasten wel uitgevoerd worden en niet met glasvezelversterkte thermoplasten.

2.2 Inductielassen

Door de basis van het inductielassen van thermoplastische composieten te onderzoeken kunnen drie van de deelvragen beantwoord worden:

- Wat is inductielassen van thermoplastische composieten?
- Wat zijn de voorwaarden om thermoplastische composieten te kunnen lassen?
- Wat is de invloed van verschillende soorten laminaten in het lasproces?

Het lassen met behulp van inductie werkt op dezelfde manier als bijvoorbeeld een inductiekookplaat. Door een spoel of speciaal gevormde draad loopt een hoogfrequente wisselstroom waardoor een magnetisch veld rondom deze draad loopt. Elektrisch geleidende materialen vangen deze velden op. In het materiaal ontstaat een wervelstroom welke wordt kortgesloten. Deze wervelstroom warmt het materiaal op, door de Jouleverliezen. Bij koolstof houdende composieten, zoals binnen dit project, gaan de wervelstromen door de vezels en worden ze overgedragen van vezel op vezel.

In Figuur 1 is een voorbeeld van het inductielas principe. Bij inductie spreekt men vaak over een spoel. Bij de setup die NLR gebruikt, en zoals in Figuur 1, wordt gebruik gemaakt van slechts een deel van de spoel die zich nabij het lasgebied bevindt. In de rest van dit rapport wordt gesproken over een inductiespoel.

Bij de setup die NLR gebruikt, wordt gebruik gemaakt van slechts een deel van de spoel die zich nabij het lasgebied bevindt.

Uit Figuur 1 is af te leiden dat vezels parallel moeten lopen aan de spoel om wervelstromen op te wekken, dit wordt de nul-richting genoemd. In de vezels die onder 90° onder de spoel liggen worden geen wervelstromen opgewekt als gevolg van het magnetisch veld. De 90° vezels zorgen echter wel voor het transport van de wervelstromen door de contactvlakken tussen de lagen of bundels in het geval van weefsels, de wervelstroom moet immers wel rond kunnen komen. Alle andere richtingen, zoals 45°, wekken wel wervelstromen op maar niet zo veel als vezels in 0°.

Bovengenoemde alinea betreft UD laminaten. Bij het gebruik van weefsels geldt hetzelfde principe. Een verschil hierbij is dat er ook contactvlakken zijn van de vezels in verschillende richtingen in elke laag.. Bij een weefsel zijn dus meer en grotere contactvlakken tussen vezels en bundels aanwezig dan bij UD materialen. Door de betere geleiding van de wervelstromen bij de weefsels is de efficiëntie van het inductielassen hoger.



Figuur 1 Electricity generation model, overgenomen uit: Induction welding of high performance thermoplastic composites (Dhondt, 2019)

In Figuur 2 is geschetst hoe het materiaal opwarmt. De diepte van het magnetisch veld is bepalend voor de hoeveelheid warmte die op een bepaalde diepte in het materiaal wordt gebracht. De diepte van die opwarming kan ook omschreven worden zoals in Vergelijking 1. Daarin kan de diepte van het magnetisch veld beschouwd worden als de diepte waarin de wervelstromen zijn afgenomen tot 1/e of 37%.



Figuur 2 Eddy Current Depth of Penetration (Depth of Penetration & Current Density, -)

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_{el}}{\pi f \mu_r}}$$

Vergelijking 1 Diepte Eddy Currents (Depth of Penetration & Current Density, -)

 δ = Diepte van het magnetisch veld[m]

 μ_r = relative magnetische permeabiliteit[H.m-1]

 ρ_{el} = elektrische weerstand[Ω .m]

f = elektromagnetisch veld frequentie[Hz]

De relatieve magnetische permeabiliteit en de elektrische weerstand van de te lassen materialen zijn afhankelijk van de lay-up, soort vezels en het soort matrix.

Bij het inductielassen is het zogenoemde edge-effect waarneembaar aan alle zijden van de platen. Het edge-effect ontstaat door wervelstromen die geconcentreerd worden langs onderbrekingen. Deze zijn aan de kopse kanten en aan de zijkanten van de platen aanwezig. Door de hogere concentratie van wervelstromen wordt een hogere temperatuur bereikt op de randen. Deze hogere temperaturen kunnen ongewenst zijn op de randen omdat het materiaal boven de maximale procestemperatuur kan komen. Als het edge-effect optreedt buiten het lasgebied kan het laminaat delamineren doordat er buiten het lasgebied geen druk uitgeoefend wordt op het product of omdat de koeling hier niet toereikend is. In Figuur 1Figuur 3 is een voorbeeld van edge-effect. Let wel, dit hoeft niet altijd parallel te zijn aan de inductie spoel. Dit kan ook een rand zijn die haaks op de inductie spoel staat, aangezien de wervelstromen een kring moeten maken en dus ook deze rand kunnen beïnvloeden. (Hagenbeek, Vila Bramon, & Fernandez Villegas, 2018)

Bij de test in Figuur 3, uitgevoerd door Hagenbeek, is het edge-effect te zien aan de linkerkant. Aan de rechterkant worden de wervelstromen (weg)geleid door een koperfolie.



Figuur 3 Afbeelding met voorbeeld van edge-effect overgenomen uit (Hagenbeek, Vila Bramon, & Fernandez Villegas, 2018)

Het edge effect geeft dus een lagere temperatuur in het lasgebied en een hoge temperatuur daarbuiten. In Figuur 4 is op het C-scan resultaat zichtbaar dat de zwarte inhammen (links onder en boven) komen door verbranding. In het midden links is het materiaal niet in de smelt geweest en dus niet (goed) gelast.



Figuur 4 Las 8044 voorbeeld edge effect

2.3 Lasopstelling

NLR Marknesse beschikt over een inductielas-test opstelling. Deze opstelling is ontwikkeld door KVE Composites group (Kok & van Engelen). Met behulp van deze opstelling kunnen diverse lasproeven gedaan worden zoals SLS, rechte scarfs en het bevestigen van L-profielen op skindelen. De beschrijving van alle onderdelen is te vinden in Appendix B.

2.4 Beschrijving lasproces



In deze paragraaf wordt beschreven hoe het lasproces verloopt op standaard SLS proefstukken.

Figuur 5 Afbeelding van de inductielas setup

De robotarm met zijn aanstuurkast voert een vooraf geprogrammeerde actie uit. In het programma beweegt de arm de inductiespoel door het frame en over de heatsink. Daarnaast regelt de Kuka robotarm ook de stroom van de Ambrell generator en de luchtdruk van de luchtbalg in de tooling.

Voordat delen gelast worden, wordt de tooling schoongemaakt door stof en losse vezels te verwijderen en de oppervlaktes schoon te maken met IPA en linnen doeken.

De thermokoppels worden op de onderste te lassen plaat geplakt met behulp van stukjes tape buiten het lasgebied. Om de thermokoppels juist te positioneren wordt gebruik gemaakt van een template zoals in Appendix E.1.

Vervolgens worden de proefstukken tegen de aanslagen in de opstelling geplaatst. Na het plaatsen en controleren worden de proefstukken vastgezet met een stukje tape buiten het lasgebied aan de opstelling en/of aanslagen.

Als alles is geassembleerd kan de slede met de opstelling in het frame worden geschoven. De slede wordt geborgd met twee snel spanners.

De thermokoppels worden aangesloten op de Eurotherm controller. De Eurotherm is vervolgens verbonden met een PC waarop de actuele data kan worden afgelezen en data kan worden geëxporteerd naar Excel en verder verwerkt worden. Voor het lassen wordt gekeken of de Eurotherm de temperaturen op de meetpunten correct weergeeft.

De Kuka robotarm pakt de Laskop robot interface doormiddel van bestaande programma's en verplaatst deze naar boven de las-setup. Als de positionering van de inductiespoel juist is, wordt het programma in de Kuka gestart zonder te lassen of verwarming om te controleren of de uitlijning van de inductiespoel ten opzichte van de las-setup juist is. Na de beweging gaat de robotarm terug naar de begin positie boven de las-setup. Deze beweging over het lasgebied, met of zonder aansturing van de Ambrell inductiegenerator, word een "weld-run" of enkel "run" genoemd.

Na het controleren van de positionering kan het materiaal opgewarmd worden maar nog niet tot de smelttemperatuur. Door een aantal weld-runs uit te voeren met lage stromen waarbij de temperatuur onder de smelttemperatuur blijft, kan een verwachte las-stroom bepaald worden aan de hand van een machtsfunctie. Het gebruik maken van deze machtsfunctie wordt " een powercurve" genoemd.

 $y = ax^b + T_{begin}$

Vergelijking 2 formule van de powercurve

In deze functie is:

- Y, de behaalde temperatuur [°C]
- a, onbekende berekend uit de machtsfunctie
- x, stroom door de inductiespoel [A]
- b, onbekende berekend uit de machtsfunctie
- T_{begin}, begin temperatuur gemeten op de thermokoppels [°C] (tussen 20 en 25°C).

Deze functie kan in Excel uitgerekend worden door een LINEST matrixfunctie te gebruiken (Excel trendline types, equations and formulas, 2019). Om deze functie te kunnen gebruiken is data nodig van minimaal drie weld-runs. Nadat de weld-runs zijn uitgevoerd voor het definiëren van de powercurve, kan met Excel de verwachte las-stroom berekend worden waarmee vervolgens daadwerkelijk gelast gaat worden. In Figuur 6 is een voorbeeld van een gemaakte powercurve te zien.



Alle data worden opgeslagen en de gelaste delen kunnen geanalyseerd worden.

Figuur 6 Voorbeeld van een powercurve

3 Kwaliteitstesten

De kwaliteit van de gelastte delen wordt beoordeeld met behulp van drie verschillende testen:

- C-scan
- Trekproeven
- Microscopie

Naast bovengenoemde testen worden de kwaliteitseisen kort doorgenomen.

3.1 C-scan (non-destructief)

Ultrasoon scannen is een geschikte inspectietechniek voor metaal en composiet componenten. Met behulp van Cscans kunnen meerdere gegevens verkregen worden van een materiaal waaronder de dikte, hoeveelheid defecten en plaats van defecten.

C-scans zullen voor alle gelaste delen gebruikt worden. Aan de hand van de resultaten van de C-scans wordt bepaald welke delen verder onderzocht worden met behulp van trekproeven en microscopie.

In deze alinea wordt kort beschreven hoe de C-scans voor dit project zijn uitgevoerd aan de hand van Figuur 7.

Een C-scan zendt een geluidssignaal uit, de reflecties van het geluidssignaal worden opgevangen door de C-scan apparatuur. De te scannen delen liggen altijd in water zodat er een goed geluidstransport is.

In dit voorbeeld wordt een ultrasoon geluid geproduceerd, een puls (a). Deze puls gaat door het water en wordt deels gereflecteerd en deels gedempt zodra deze het voorwerp raakt. De eerste puls die terugkomt en wordt opgevangen door de receiver is de oppervlakte van het voorwerp (b). Als er zich defecten in het voorwerp bevinden worden de overgebleven signalen nogmaals gedempt en deels gereflecteerd, deze komen ook terug in de receiver (c). Als er meer defecten boven elkaar zijn komen er meerdere pulsen na elkaar terug. Als het resterende signaal van de initiële puls bij de achterkant van het product komt wordt hier nog een deel gereflecteerd dat terugkomt bij de receiver als (d).

Reflectie van de oppervlakten voor (b) en (d) zijn normaal. Hoe minder reflectie van defecten (c), hoe minder defecten het materiaal bevat.



Figuur 7 Afbeelding over de werking van een C-scan met de "Pulse Echo Method"

3.2 Trekproeven

Om te kunnen valideren en controleren of een proefstuk volledig gelast is, worden de proefstukken destructief getest met behulp van een trekbank. Na het testen kan gemeten worden wat de oppervlakte van de las is en uit de data van de testopstelling kan de sterkte van de las bepaalt worden. De gelaste proefstukken worden binnen NLR met aangepaste ASTM standaarden getest. Voor de lasverbinding van een composiet is nog geen ASTM test-standaard ontwikkeld. Om vergelijkbare gegevens te krijgen, worden de ASTM standaarden van lijmverbindingen gebruikt. De belangrijkste punten uit de ASTM standaarden:

- De testcoupons hebben afmetingen van 100mm bij 25.4mm met een dikte van 2.5mm (ASTM D5868-01, 2001)
- De overlap van de las of de coupons bedraagt 25.4mm (ASTM D5868-01, 2001) tenzij deze dunner zijn dan 2mm
- Bij een coupondikte van minder dan 2mm wordt de overlap vastgesteld op 12,7mm om stockbreak te voorkomen (ASTM D1002-01, 2001)
- Lasoppervlakken worden schoongemaakt volgens (ASTM D2093-03, 2003)
- De faalmodes van de las wordt beoordeeld met (ASTM 5573-99, 1999)
- De afstand tussen de klemmen van de trekbank en het begin van de las bedraagt aan beide kanten 63mm (ASTM D1002-01, 2001)

De trekproeven worden uitgevoerd op een gekalibreerde trekbank (Instron 5900R) met een afwijking van maximaal 0.5%. Nadat de delen kapot zijn getrokken, kan aan de hand van het bind-oppervlakte en de kracht in de load-cell worden berekend wat de afschuifsterkte van de las is.

3.3 Microscopie

Een doorsnede van de las kan geobserveerd worden onder een lichtmicroscoop. Hiermee kan worden bepaald of er zich defecten bevinden in het materiaal (voids en delaminaties), dikte van de lasverbinding en de overlap van de las.

3.4 Kwaliteitseisen

Binnen dit project wordt van geode kwaliteits gesproken als het lasgebied niet meer voids bevat dan het materiaal dat niet gelast is.

Om te bepalen hoeveel voids aanwezig zijn kan dat aan de hand van de totale oppervlakte van de voids zichtbaar bij microscopie foto's. Dit valt echter buiten de scope van dit onderzoek.

4 Testen

Dit hoofdstuk beschrijft de testen die zijn uitgevoerd en de bijbehorende resultaten. De testen zijn nodig om tot het eindresultaat te komen:

Het inductielassen van composieten met een variabele dikte.

Om inzicht en kennis te krijgen over het inductielassen met een variabele dikte moeten er diverse testen worden uitgevoerd:

- Introductielassen PPS en PEKK
- Lassen met verschillende snelheden
- Temperaturen meten op verschillende dieptes in het materiaal
- Verwarmen verschillende diktes
- Edge-effect test
- Proefstukken met een variabele dikte

Elk van bovenstaande testen is in dit hoofdstuk uitgewerkt in een paragraaf.

Eerst worden introductielassen gemaakt, dit zijn twee standaard lassen met PPS-weefsel en PEKK-UD materiaal

De tweede test bevat lassen die gemaakt zijn met verschillende snelheden om te kijken wat met de huidige apparatuur de invloed van verschillende snelheden op de laskwaliteit is. Een variabele snelheid kan in combinatie met de koeling van de heatsink er voor zorgen dat de materialen op de juiste diepte de juiste temperatuur bereiken.

De derde test bevat een lasopstelling waarin de temperatuur in de diepte/dikte wordt gemeten. Hieruit wordt data vergaard over de opwarming daarvan. Deze data is nodig voor het lassen van een variabele dikte of lasintersface.

In de vierde test worden platen met verschillende diktes op elkaar verwarmd. Hiermee worden de resultaten van de derde test gevalideerd en wordt een beeld verkregen van het opwarmen van verschillende diktes.

De vijfde test bevat proefstukken met twee dikte verlopen. Op de plaatsen van de dikte verlopen worden thermokoppels geplaatst om te zien of het edge effect ook bij afbouwende lagen in laminaten optreed.

De zesde test is het lassen van een variabele dikte welke in enkele stappen verloopt, zoals een laminaat afbouw dat in realiteit ook doet.

Alle testen staan in het diagram in Figuur 8, bij elke test staat aangegeven welke kwaliteitscontroles zijn uitgevoerd.



Figuur 8 Overzicht van uitgevoerde testen

4.1 Introductielassen PPS en PEKK

Voor de start van het onderzoek zijn een aantal lassen gemaakt ter introductie van het inductie lassen van thermoplastische composieten. Hiermee is kennis opgebouwd over het proces, gereedschappen, data acquisitie en las-setup. Deze paragraaf beschrijft twee gemaakte lassen met instellingen en handelingen die gebruikt zijn.

Als introductie zijn er twee materialen gebruikt.

- Toray TC1100, PPS/ weefsel (T300-5HS,) met een lay-up van [0,90/(±45)3/0,90]
- Toray TC1320, PEKK/UD (AS4 UD) met een lay-up van [0,90,(45,-45)3]s

4.1.1 Lasparameters

Tijdens deze lassen is gebruik gemaakt van zes thermokoppels. De thermokoppels zijn geplaatst zoals in Figuur 9. De vier middelste thermokoppels zijn voor het meten van de temperatuur in het lasgebied en het maken van de powercurve. De buitenste thermokoppels zijn ter controle.



Figuur 9 Schets van de plaatsing van thermokoppels bij de PPS introductielas

Tijdens het lassen is de data van de thermokoppels uitgewerkt in Excel zoals weergegeven in Tabel 1. Uit de data van de eerste drie weld-runs is de powercurve berekend met daarbij de las-stroom. Bij de powercurve in Figuur 10 is een verschil temperatuur gebruikt, hierna deltatemperatuur genoemd. De "power" functie (machtsfunctie) in Excel gaat altijd door de oorsprong, maar in dit geval is dat niet zo. . De begintemperatuur wordt als nullijn gebruikt waardoor er een deltatemperatuur ontstaat. Bij alle volgende metingen wordt daarom ook gewerkt met de begintemperatuur. De behaalde temperaturen en stromen zijn verwerkt zoals in paragraaf 2.4, hieruit volgt dat een las-stroom van 332A nodig is om de delen te lassen.



Current [A]	Max temperature [°C]	Tb [°C]	d T [°C]
50	27	20	7
202	113	20	93
300	224	35	189
332	265	42	222

Figuur 10 (rechts) powercurve van 7873 PPS introductielas



Het PEKK proefstuk heeft afwijkende afmetingen vergeleken met het PPS proefstuk, daarom is een andere thermokoppelplaatsing gebruikt te zien in Figuur 11.



Figuur 11 Schets van de plaatsing van thermokoppels bij de PEKK introductielas

Van de PEKK introductielas is net zoals bij de voorgaande las een powercurve gemaakt. Let op dat voor PEKK-UD een hogere stroom nodig is dan voor PPS-Weefsel. Het smeltpunt van PEKK ligt op 342°C t.o.v 280°C van PPS en de UD layup geeft minder opwarming dan weefsels (Tijhuis, 2019)

Tabel 2 Bereikte temperaturen bij verschillende Weld-runs van de PEKK-UD introductielas

Current [A]	Max temperature [°C]	Tb [°C]	d Т [°C]
101	44	24	21
202	105	27	78
300	197	37	161
440	331	25	306
470	354	19	335
480	368	22	346
482	372	22	350



Figuur 12 Powercurve van de PEKK-UD introductielas

4.1.2 Evaluatie

De data van deze introductie lassen wordt niet gebruikt voor verder onderzoek, omdat de gemeten temperaturen onderling te veel afwijken en er te weinig metingen en herhalingen zijn uitgevoerd.

Tijdens de introductie lassen is niet begonnen met een constante temperatuur. Elke run is met een andere begintemperatuur gedaan en tijdens de PPS las zelfs 42°C. Door te beginnen op deze temperaturen kan er een afwijking in het proces komen en de data kan niet goed vergeleken worden met andere testen. Voor alle lassen die na de introductielas hebben plaatsgevonden, is een begintemperatuur van maximaal 25°C gehanteerd. Deze temperatuur kan behaald worden door de componenten en proefstukken te koelen met ventilatoren tussen de verschillende las runs die uitgevoerd worden voor het bepalen van de power curve. Hierdoor wordt de wachttijd verkort.

Tijdens de introductie lassen is opgevallen dat de meetwaardes veel van elkaar afwijken. Het verschil tussen de hoogste temperatuur en laagste temperatuur van de meet-thermokoppels bedraagt 19°C. Met een spreiding van 19°C kan niet gezegd worden dat het proces voldoende onder controle is of dat de metingen kloppen. De afwijking van standaard type E thermokoppels bedraagt ±1.7°C of ±0.5% (Type E Thermocouple, 2011)

In voorgaand onderzoek is aangetoond dat het plaatsen van thermokoppels 3mm buiten de hartlijn van de las, al een afwijking kan geven van 15 °C (Tijhuis, 2019). Het is daarom van belang dat de thermokoppels accuraat geplaatst worden.

De huidige fabricage en plaatsing methode van thermokoppels is niet toereikend voor deze toepassing. Thermokoppeldraden worden gedraaid en vervolgens onder een puntlasapparaat punt gelast. Kapton tape zorgt voor de elektrische isolatie en vezel versterkt PTFE tape beschermd het thermokoppel. Het meetpunt wordt bepaald door tegen het licht te kijken waar de draden contact maken. Het contactpunt wordt gemarkeerd en het thermokoppel wordt geplaatst waar de temperatuur gemeten moet worden.

De bovengenoemde methode bevat echter drie menselijke meet of plaats handelingen waar afwijkingen in kunnen zitten. Deze afwijkingen kunnen bijdragen aan een afwijkende thermokoppeltemperatuur omdat deze te ver uit de hartlijn van de las zit.

Om het proces van de thermokoppelplaatsing te vereenvoudigen en de kans op afwijking te verkleinen wordt dit proces aangepast.

- Thermokoppels worden niet gedraaid, door de draden te laten kruisen en dit kruispunt te lassen is een exact, zichtbaar meetpunt.
- De overstekende draden worden afgeknipt.
- Het thermokoppel wordt met Kapton tape geïsoleerd.
- Het contactpunt van het thermokoppel wordt op 12.7mm vanaf het einde van de vezel versterkte PTFE tape geplaatst, zie ook Appendix E.1.

Het plaatsen van de thermokoppels op het laminaat is hierdoor ook eenvoudiger doordat het uiteinde van de vezel versterkte PTFE tape nu gelijk met de zijkant van het te lassen proefstuk loopt. De beknopte beschrijving voor het produceren van de thermokoppels staat in Appendix E.1.

4.2 Lassen met verschillende snelheden

Deze paragraaf beschrijft het proces en de resultaten van de lastesten met verschillende snelheden.

Het doel van deze test is het analyseren welke invloed de lassnelheid heeft op het lasgebied en de behaalde temperaturen bij verschillende snelheden. Bij deze test wordt gebruikt gemaakt van PPS-koolstofweefsel omdat deze materialen al tijdens een vroeg stadium van dit project beschikbaar zijn. PPS heeft een smelttemperatuur van 280 graden, dit is voor deze test ook de doeltemperatuur die bereikt gaat worden.

De platen zijn op standaard afmetingen voor de tooling verspaand naar 600X101.6mm. Er wordt gelast met een overlap van 12,7 mm (1/2 inch) in plaats van de standaard 1 inch. De kortere overlap voorkomt stockbreak zodat de gewenste data verkregen kan worden uit de trekproeven.

De standaard snelheid van de setup is 20cm/min, afhankelijk van het materiaal, lay-up en omstandigheden kan deze aangepast worden. Voor deze test is gekozen om de snelheid te verhogen naar 30cm/min en 40cm/min. Bij elk van deze snelheden worden drie testen uitgevoerd.

Alle lassen worden gemaakt na bepaling van een powercurve, zodat alle lassen verder identiek aan elkaar zijn. Alle lassen zijn verder zoveel mogelijk met dezelfde parameters en onder dezelfde omstandigheden uitgevoerd.

Tijdens de lastesten met verschillende snelheden wordt gebruik gemaakt van vier thermokoppels. Deze thermokoppels zijn op een afstand van 100mm symmetrisch uit elkaar geplaatst. Bij vorige testen werd vaak gebruik gemaakt van zes thermokoppels, de buitenste twee thermokoppels brengen niet een bijdrage aan het temperatuurbeeld van de rest van de las. De vier thermokoppels die gebruikt zijn vallen allemaal binnen het lasgedeelte waar het edge-effect, zie paragraaf 2.2 en het opstarten of stoppen van lassen niet meer optreedt.

In Figuur 13 is de plaatsing van de thermokoppels schematisch uitgebeeld, deze afbeelding is ook gebruikt in de werkinstructies die opgesteld worden voor het lassen.



Figuur 13 Plaatsing van thermokoppels voor de snelheidslastesten met PPS

De thermokoppels worden gemaakt zoals beschreven in paragraaf 4.1.2 maar dan voor een overlap van 12.7mm in plaats van 25.4mm.

4.2.1 Las process data

De proces data kan gevonden worden in Tabel 3, hierin staan de uitgevoerde runs met de daarbij behaalde temperaturen.

Weld-number	7893	7894	7895	7896	7897	7898	7899	7900	7901
Weld-speed [cm/min]	20	20	20	30	30	30	40	40	40
Weld current: [A]									
153	88	90	87	77	80	77	67	71	64
201		138	138	117	119	117	-	-	-
250	199	201	196	-	-	-	140	144	137
317	280	281	281	237	239	236	202	209	200
347	-	-	-	-	-	-	-	-	-
355	-	-	-	293	282	278	-	-	-
372	-	-	-	-	-	-	256	262	256
395	-	-	-	-	-	-	282	288	281

Tabel 3 bereikte temperaturen [°C] van alle snelheidstest lassen

In Tabel 3 is ook te zien dat voor een hogere snelheid een hogere stroom nodig is, daarom is ook voor elke snelheid een nieuwe powercurve gemaakt om de las-stroom te berekenen. Figuur 12 en Figuur 13 laten twee voorbeelden van deze powercurves zien bij snelheden van 20cm/min (7893) en 40cm/min (7900) respectievelijk genoemd.



Figuur 14 Powercurve van 7893, 20cm/min



Figuur 15 Powercurve van 7900 40cm/min

4.2.2 Kwaliteitstesten

4.2.2.1 C-Scan

Van de lastesten op verschillende snelheden zijn C-scans gemaakt om het verschil in defecten te kunnen observeren. De belangrijkste resultaten worden in dit hoofdstuk getoond, het volledige C-scan rapport is te vinden in Appendix D.1.1.1. Als deze resultaten vergeleken worden, kan gezegd worden dat het resultaat van de C-scans van de hogere snelheden meer defecten vertonen en een smaller lasgebied lijken te hebben dan de langzamere lassen. Aan de hand van de legenda in Figuur 19 kan bepaald worden hoeveel demping ongeveer in het materiaal te vinden is, eenvoudig gezegd: wit is een enkele plaat (zonder lasoverlap), rood is goed, geel redelijk en de rest bevat defecten. In het lasgebied zijn de thermokoppels nog zichtbaar als de blauwe gebieden, deze zijn tijdens het lassen aanwezig

geweest om de temperatuur te kunnen monitoren.



Figuur 16 C-scan resultaat 7895 3e las 20cm/min



Figuur 17 C-scan resultaat 7897 2e las 30cm/min



Figuur 18 C-scan resultaat 7900 2e las 40cm/min



Figuur 19 Legenda voor C-scan resultaten snelheidstesten

Een voorbeeld van delen die niet goed verbonden lijken te zijn is zichtbaar in Figuur 20. Hier zijn in het lasgebied de blauwe gebieden die veroorzaakt worden door defecten blauw omcirkeld. Van deze locaties zijn microscopiemonsters genomen om deze verder te onderzoeken. Naast de gebieden met zichtbare defecten, worden ook microscopie monsters gemaakt van goed ogende stukken. De microscopieresultaten worden beschreven in de volgende paragraaf.



Figuur 20 Afbeelding C-scan resultaat uitvergroot van 7894 20cm/min.

4.2.2.2 Microscopie

Aan de hand van de C-scan resultaten zijn de locaties voor microscopisch onderzoek vastgesteld zoals beschreven in paragraaf 4.2.2.1.

In onderstaande afbeelding is in het C-scan resultaat waar de microscopiemonsters genomen zijn. De linker doorsnede op een locatie met veel defecten (7893-M1). De rechter locatie met minder defecten (7893-M2).



Figuur 21 Afbeelding C-scan resultaat 7893 20cm/min met doorsnede locaties voor microscopie

In onderstaande afbeeldingen zijn de resultaten zichtbaar van de microscopiemonsters uit las 7893 20cm/min. In de lasinterface van beide microscopie monsters zijn geen defecten zichtbaar. In de microscopiefoto van 7893-M1

20cm/min, te zien in Figuur 22, zijn voids aanwezig in het onderste laminaat (blauw omcirkelt). Deze worden veroorzaakt door een te hoge temperatuur in de onderste plaat en in combinatie met een lokaal te lage druk. Door de uitgeoefende kracht van de balg en de flexibiliteit van de siliconen strip zijn hars en vezels uit het laminaat geperst (geel omcirkeld). Naast het lasgebied is het laminaat beschadigd door een te hoge temperatuur en druk van de balg(rood omcirkeld). In dat gebied is delaminatie opgetreden en/of zijn er kleine scheuren zichtbaar. Bij de snelheidstesten zijn de defecten voor elke snelheid vergelijkbaar.



Figuur 22 microscopie 7893-M1 20cm/min defecten zichtbaar onder de las



Figuur 23 microscopie 7983-M2 20cm/min defecten zichtbaar naast de las

Bij las 7898 30cm/min is in het midden, zoals in Figuur 24 te zien is, een microscopiemonster genomen. Op de C-scan van deze locatie lijken zich weinig defecten te bevinden.



Figuur 24 C-scan resultaat 7898 30cm/min uitvergroot met doorsnedelocatie voor microscopiemonster

De microscopiefoto van 7898 30cm/min is in Figuur 25 zichtbaar. In deze doorsnede zijn wat kleine defecten in het onderste laminaat aanwezig maar niet in dezelfde mate als bij las 7893 20cm/min. Daarnaast is er minder effect van vervorming door de druk in het onderste laminaat. Hars en vezeluitpersing zijn nog wel aanwezig.



Figuur 25 microscopie 7898 30cm/min

Van 7900 40cm/min is een doorsnede genomen voor de microscopiemonsters van een locatie met weinig zichtbare defecten in de C-scan resultaten, zie Figuur 26. Als dit wordt bekeken in Figuur 27 kan dit vergeleken worden met die van 7898 30cm/min Figuur 25. Harsuitpersing links van de las, defecten rechts van de las en voids in het onderste laminaat.



Figuur 26C-scan resultaat 7900 40cm/min uitvergroot met doorsnede locatie voor microscopiemonster



Figuur 27 microscopie 7900 40cm/min

4.2.2.3 Trektestresultaten

Van lasstukken waar in de C-scan geen vreemde waarnemingen zijn gedaan, zijn trekproeven uitgevoerd. Van elke uitgevoerde serie trektesten zijn 5 proefstukken per las getest. Van de testwaardes is een gemiddelde bepaald dat wordt weergeven in Tabel 4, samen met de bereikte temperatuur en de gebruikte las snelheid. Uit deze data valt niet af te leiden of de snelheid een daadwerkelijke rol heeft gespeeld in de sterkte van de las. Daarnaast is het niet gelukt om alle monsters op dezelfde temperatuur te lassen wat op zijn beurt ook een afwijkend beeld kan geven op de resultaten.

Tabel 4 Trektest resultaten snelhei	dstestlassen
-------------------------------------	--------------

Number -	Speed [cm/min]	Reached temp. [°C]	Shear stress [Mpa]
7895	20	281	19.68
7896	30	293	19.77
7897	30	282	18.88
7898	30	278	19.06
7900	40	288	17.54

Alle trektest resultaten hebben een zelfde beeld van falen zoals in Figuur 28. Hierin is te zien dat er zowel delaminatie is opgetreden maar dat er ook delen zichtbaar zijn op de lasinterface zijn bezweken.

De delaminatie wordt veroorzaakt door de defecten/voids in de onderste plaat, in dat geval is de lasinterface sterker dan het gebied er onder en treedt deze delaminatie op. De rest van de las is gefaald op de matrix, fiber tearout heeft niet plaatsgevonden, enkel een cohesie/adhesie falen.

Het delamineren van de onderste plaat geeft vermoedelijk in de trektesten lagere treksterktes dan de lasinterfaces daadwerkelijk hebben. Hier moet verder onderzoek aan gedaan worden om dit te onderbouwen maar valt buiten het huidige onderzoek.

Figuur 28 7895 20cm/min trektest monsters na trektesten



4.2.3 Conclusie

Tijdens de las-testen is gebruik gemaakt van de verbeterde thermokoppel aanpak en nauwkeurigere plaatsing, de resultaten daarvan zijn te zien in Tabel 5. Bij de smelttemperatuur is het grootste verschil tussen de thermokoppels nu nog 8°C in plaats van 19°C zoals bij de eerste introductielas in paragraaf 4.1.

Current [A]	tc1 [°C]	tc2 [°C]	tc3 [°C]	tc4 [°C]	d tc's [°C]	% difference (lowest, highest)
153	88	88	88	90	2	2.3
254	199	198	199	202	4	2.0
302	260	255	256	263	8	3.0
317	279	278	278	286	8	2.8

Tabel 5 7893 20cm/min temperatuur verschillen.

Tijdens deze test is gebruik gemaakt van drie verschillende snelheden. Om tijdens het lassen toch de eindtemperatuur te behalen van 280°C is de lasstroom hierop aangepast. De stromen zijn tegen de snelheid uitgezet in Figuur 29, hierin is zichtbaar dat er een (lineair) verband is. Gezien het kleine aantal testen dat is uitgevoerd met slechts drie verschillende snelheden kan niet direct gezegd worden dat dit voor alle lassen zo zal zijn. Daar komt nog bij dat deze lassen zijn uitgevoerd op PPS-Weefsel met een lay-up van [0,90/(±45)3/0,90] en een overlap van 12.7mm. Deze snelheidslastesten duiden wel aan dat het mogelijk is om met verschillende snelheden een zelfde lasresultaat te behalen. Tabel 4 geeft aan dat de behaalde treksterktes vergelijkbaar met elkaar zijn. Betere testen zouden uitgevoerd moeten worden waarin minder vervorming plaatsvindt van de onderste plaat om dit definitief te kunnen bevestigen



Figuur 29 Verhouding tussen stroom en snelheid

4.3 Temperaturen meten op verschillende dieptes

In deze paragraaf wordt gekeken naar de temperatuur op verschillende dieptes in het lasgebied. Om materialen te verbinden met een variabele dikte is het noodzakelijk dat er een beeld is van temperaturen op verschillende dieptes. Dit kan gedaan worden door platen te lassen waar een variabele dikte in zit maar ook door meerdere platen op elkaar te stapelen. Door op elke interface in de stapel platen een thermokoppel te plaatsen kan de temperatuur gemonitord worden. Het doel van deze test is niet om te lassen maar om de opwarming door de dikte van het materiaal te bekijken.

Bij deze test is gebruik gemaakt van UD-PEKK materiaal met een dikte van 2,4mm en een opbouw van [(0,90)₈0]. UD-PEKK wordt voor deze test gebruikt omdat UD PEKK ook gebruikt gaat worden bij het lassen van variabele diktes. Tijdens deze test zijn snelheden van 10,20 en 40 cm/min gebruikt om te valideren dat er ook verschil is in de warmte op verschillende interfaces bij verschillende snelheden net als bij PPS weefsel.

In Figuur 30 is te zien hoe de thermokoppels en de platen gepositioneerd zijn in de setup.



Figuur 30 Schets thermokoppel plaatsing (niet op schaal)

Per interface tussen de platen liggen twee thermokoppels, in de lengterichting van de las. Deze zijn niet recht boven elkaar geplaatst zodat de platen iets kunnen vervormen en contact kunnen maken onderling. De thermokoppels zijn op een afstand van 25mm van elkaar geplaatst. In Figuur 31 is een schematische tekening van de ligging van de thermokoppels in de lengterichting van de las (tekening is niet op schaal).



Figuur 31 Thermokoppel plaatsing (niet op schaal)

Door het verschuiven van de thermokoppel posities is de vertraging van het opwarmen niet in één oogopslag zichtbaar. Om de resultaten ten opzichte van tijd weer te kunnen geven dient de data verschoven te worden ten opzichte van elkaar. Bij een afstand van 25mm en een snelheid van 40cm/min (6.7mm/s) resulteert dat in een verschuiving van 3.7 seconden. Het data acquisitie systeem staat ingesteld op een resolutie van 1 seconde, de data van de middelste thermokoppels wordt 4 seconden opgeschoven en de onderste thermokoppels 8 seconden.

Voor de testen met 20 cm/min en 10cm/min kunnen de verschuivingen verdubbeld en verviervoudigd worden om de vertraging van de temperaturen op verschillende interfaces goed in beeld te krijgen.

4.3.1 Bereikte temperaturen

Bij deze metingen zijn stroomsterktes gebruikt van 150, 250, 350 en 450 A. In Figuur 32, Figuur 33 en Figuur 34 is te zien hoe de opwarming per interface er uit ziet bij een vaste stroomsterkte. In de gebruikte data van de grafieken is de plaatsing van de thermokoppels al gecorrigeerd door ze in tijd te verschuiven. Hierin is zichtbaar dat de temperatuur van de middelste en bovenste thermokoppel redelijk gelijk oplopen bij 10cm/min maar de onderste niet. Tijdens de las wordt de meeste warmte opgewekt in het materiaal het dichtst bij de inductiespoel (Depth of Penetration & Current Density, -). Aan de bovenste oppervlakte wordt door de heatsink warmte onttrokken om degraderen of verbranding van het materiaal tegen te gaan. Het effect van de heatsink dringt dus door tot minimaal de bovenste interface. Bij de hogere snelheden 20 en 40cm/min is zichtbaar dat de bovenste interface een hogere temperatuur bereikt dan de middelste interface. Dit wordt veroorzaakt door de hogere stroom en omdat de heatsink in die tijd minder warmte op kan nemen. Dit duidt ook aan dat de bovenste lagen meer door de wervelstromen (inductie) worden opgewarmd. Deze effecten hoeven niet nadelig te zijn en kunnen juist gebruikt worden om de hoogste temperatuur op een gewenste diepte te krijgen.

Bij de thermokoppels op de onderste interface is duidelijk zichtbaar dat deze de hoogste temperatuur bereiken op een later moment dan de middelste en bovenste interface en dat deze hoogste temperatuur ook veel lager ligt dan die van de andere interfaces. De onderste interface wordt niet opgewarmd door het inductieveld en de wervelstromen maar door conductie van uit het bovenliggende materiaal. Bij de snelheid van 10cm/min is de test uitgevoerd tot en met 350A. Bij 10Cm/min worden hogere temperaturen bereikt door de tijd die het materiaal krijgt om op te warmen. Bij Figuur 33 is zichtbaar dat een thermokoppel defect is. Tijdens de meting is al zichtbaar dat de data van de onderste interface niet heel erg van belang is.



Figuur 32 Temperatuur over diepte bij 10cm/min en 350A



Figuur 33 Temperatuur over diepte bij 20cm/min en 450A (zie hierbij ook het defecte thermokoppel)

In de resultaten van de meting bij 40cm/min, weergegeven in Figuur 34, lopen de temperaturen niet volgens een logisch patroon zoals bij de vorige metingen. Misplaatsing van thermokoppels of fouten in de thermokoppels kunnen deze afwijking geven. Van het resultaat is het gemiddelde genomen, als de data gebruikt dient te worden is het verstandig om deze test nog een keer uit te voeren.

Figuur 34 Temperatuur over diepte bij 40cm/min en 450A

Van de gemeten waarden zijn per interface de gemiddelden genomen en weergegeven in Tabel 6, Tabel 7 en Tabel 8. Tabel 6 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 10 cm/min.

stroom	boven	midden	onder	verschil min en max	tussen boven en midden
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150	65.5	66.2	53.6	12.6	0.7
250	135.3	137.2	108.3	28.9	1.9
350	219.4	223.0	173.5	49.5	3.6

Tabel 7 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 20 cm/min.

stroom	boven	midden	onder	verschil min en max	tussen boven en midden
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150	47.4	48.1	40.2	7.9	0.7
250	96.7	96.4	75.7	21.0	0.3
350	143.9	157.2	123.7	33.5	13.3
450	230.6	215.8	169.5	61.2	14.9

Tabel 8 Bereikte temperaturen bij verschillende stromen en dieptes, 40cm/min

stroom	boven	midden	onder	dt tussen min en max	tussen boven en midden
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150	42.6	42.4	34.8	7.8	0.3
250	80.2	79.8	61.1	19.1	0.4
350	129.4	125.5	94.7	34.7	3.9
450	183.2	165.9	135.7	47.5	17.3
4.3.2 Conclusie en vergelijken van resultaten

Als de resultaten van de drie verschillende snelheden naast elkaar worden gelegd, is duidelijk zichtbaar dat de temperatuur van de onderste interface erg laag blijft terwijl het materiaal nog niet eens in de smelt is geweest. De lagere temperatuur van de onderste interface is voor alle drie geteste snelheden lager dan de middelste en bovenste. Het grote temperatuurverschil zou betekenen dat met de huidige setup en instellingen, een las op deze diepte niet gelast zou kunnen worden zonder materiaal aan de bovenzijde buiten de opgegeven procestemperaturen te laten treden. De opgegeven procestemperaturen van PEKK TC1320 zijn tussen 370°C en 400°C zie Appendix A1.

De invloed van de snelheid op de bovenste en middelste interface is wel interessant. Tijdens de metingen op 10cm/min is de temperatuur het hoogst in de middelste interface. Tijdens de metingen bij 40cm/min is duidelijk zichtbaar dat de temperatuur in de bovenste interface hoger is dan de temperatuur in de middelste interface. Deze resultaten zijn zichtbaar gemaakt in Figuur 35.



Figuur 35 Relatie tussen temperatuur en stroom op verschillende dieptes

Aan de hand van de resultaten kan geconcludeerd worden dat bij het gebruik van de standaard setup, bovenliggende interfaces met een hoge snelheid gelast zouden moeten worden en interfaces die dieper liggen met een lage snelheid.

4.4 Verwarmen verschillende diktes

In dit hoofdstuk worden de testen en de resultaten beschreven van lastesten met verschillende diktes. Bij deze testen worden platen met verschillende diktes verwarmd en niet gelast. Aan de hand van de metingen kan genoeg gezegd worden over de opwarming van het materiaal.

Tijdens deze test worden de volgende testen uitgevoerd:

- 2.4 op 4.7 mm
- 4.7 op 2.4 mm
- 4.7 op 4.7 mm

De 2.4mm platen zijn van PEKK-UD [(0,90)₈,0]

De 4.7mm platen zijn van PEKK-UD $[(0,90)_{16},0]$

Tijdens deze testen worden de delen niet gelast en wordt een temperatuur van maximaal 250 tot 275°C gebruikt. Bij deze testen zijn stromen gebruikt van 150, 250, 350 en 400 A. De gekozen stromen komen overeen met de gebruikte stromen van de testen die beschreven zijn in paragraaf 4.3. Tijdens deze test wordt gebruikt gemaakt van de standaard snelheid van 20cm/min. Ter referentie zijn twee extra thermokoppels onder en boven het lasgebied aangebracht ten opzichte van de locaties in Figuur 13 om de temperatuur tussen het bovenste laminaat en de heatsink te monitoren en die tussen het onderste laminaat en de siliconen strip.

4.4.1 Bereikte temperaturen

In Tabel 9 zijn de bereikte temperaturen bij 400A weergegeven. Hierin is zichtbaar dat er slechts een klein verschil is tussen de bereikte temperaturen van 2.4 op 4.7 mm en 4.7 op 2.4 mm. De run met dikkere laminaten van 4.7mm op elkaar, bereikt een lagere temperatuur door de hogere totale massa die verwarmd moet worden. De thermokoppels zijn op een onderlinge afstand van 100mm symmetrisch uit elkaar geplaatst

Tabel 9 Bereikte temperaturen bij lassen met verschillende laminaten bij 400A en 20 cm/min

Test	Тор ТС	TC1	TC2	ТСЗ	TC4	Bottom TC	Average TC 1 t/m 4
-	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
4.7op2.4	149	235	237	234	236	196	235
2.4op4.7	177	243	245	234	247	178	242
4.7op4.7	55	195	195	194	196	114	195

4.4.2 Conclusie

Bij deze test is aangetoond dat de totale dikte of massa die opgewarmd moet worden in het lasgebied medebepalend is voor de bereikte temperatuur bij een vaste stroomsterkte. Zo is in Figuur 36 goed zichtbaar dat de temperatuur van dunnere laminaten op elkaar hoger is dan dat van dikkere laminaten op elkaar bij dezelfde stroomsterkte.

Ter referentie zijn de resultaten van paragraaf 4.3 toegevoegd. Deze resultaten (4 platen van 2.4 mm op elkaar, bovenste en middelste interface) komen sterk overeen met de resultaten van 4.7 op 4.7mm. Ondanks het kleine verschil in dikte van ±0.14mm, dat overeenkomt met een enkele laag in het laminaat, kan gezegd worden dat bij een gelijke massa/dikte gelijke temperaturen gehaald worden voor dezelfde type laminaten (materiaal en lay-up). Bij het gebruik van andere lay-up of materialen kan dit afwijken.



Figuur 36 grafiek met bereikte temperaturen van lassen met verschillende laminaat diktes

4.5 Edge-effect test

Bij het lassen van composieten met een variabele dikte kan de laminaat afbouw gezien worden als een rand waar het edge-effect zou kunnen optreden. Voordat er een las test gedaan wordt met variabele dikte, is het belangrijk om de gevolgen van eventuele edge-effecten op variabele dikte van een onderdeel uit te sluiten of mee te nemen in de benadering van het proces.

Om het edge-effect te analyseren worden PEKK-UD platen $[(0,90)_{16},0]$ verspaand zoals in Figuur 37 te zien is. De afbouw met een helling van 1:20 is bedoeld om de edge-effecten van een dergelijke dikte afbouw te kunnen analyseren.



Figuur 37 Schets van de verspaande platen voor het testen van edge effect in laminaat opbouw. (niet op schaal)

Tijdens de test is het materiaal meerdere keren opgewarmd tot onder de smelttemperatuur. Dit is gedaan om een beeld van de verwarming te krijgen op verschillende punten op de lasinterface en om eventuele edge-effecten te kunnen waarnemen.

Tijdens de test zijn thermokoppels geplaatst naast de hartlijn van de las en buiten het lasgebied op de af en oplopende stukken. Op de aflopende stukken zijn geen significante edge-effecten waargenomen zoals die op het einde van de plaat wel zichtbaar zijn.

4.5.1 Lasparameters

Nadat de testen aangaande edge-effecten zijn uitgevoerd is besloten om de platen te lassen. Hierdoor kan data verkregen worden over het lassen van een variabele diepte van de interface.Om de temperaturen goed vast te kunnen leggen zijn 12 punten gedefinieerd waar de thermokoppels geplaatst kunnen worden. Tussen de weld-runs door zijn de thermokoppels opnieuw geplaatst op andere locaties omdat er geen 12 meetkanalen voor E-thermokoppels beschikbaar zijn. De thermokoppels zijn geplaatst op een van de onderstaande punten te zien in Figuur 38. Zoals te zien, zijn er meer thermokoppels rond de op-en-afbouw om de temperaturen goed te kunnen monitoren.



Figuur 38 Schets van de thermokoppellocaties tijdens de edge-effect las

De temperaturen zijn vastgelegd en weergegeven in Tabel 10. Tabel 10 is een overzicht van de temperaturen die gemeten zijn bij meerdere weld-runs op 450A. De gemiddelden van de gemeten waardes laten behoorlijk wat spreiding zien tussen de verschillende meet locaties, namelijk 29°C.

Meetlocatie nummer	Meetlocatie vanaf begin las	Run 9.1	Run 9.2	Run 9.3	Run 9.4	Gemiddelde 20cm/min
-	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
PO	75	288	287			288
P1	100	293	292	287		291
P2	125	285	287			286
Р3	150	280	278			279
P4	175	290	293			292
Р5	200	294	294	291		293
P6	247.5			291	297	294
P7	320			284	285	285
P8	345			280	279	280
Р9	370			297	291	294
P10	395				308	308
P11	420				296	296
Totaal gemiddeld						293
Delta T max						29

Tabel 10 Gemeten temperaturen bij de edge-effect testen.

Door de lassnelheid als variabele parameter te gebruiken, kunnen de piektemperaturen afgevlakt worden. Zo is bij een hoge temperatuur bijvoorbeeld de snelheid verhoogd om de temperatuur omlaag te krijgen en vice versa. In Tabel 11 zijn de temperaturen te zien waar naar toe gestuurd is. Vervolgens is dit herhaald tot op alle plaatsen een kleine afwijking in temperatuur is. De uiteindelijk gekozen schakelpunten en snelheden zijn vastgelegd en te zien in Figuur 39.

Tabel 11 Variabele snelheid instellen voor edge-effect las bij 450A

meetlocatie	afstand	10. 1	10. 2	10. 3	10. 4	10. 5	10. 6	10. 7	10. 8	10. 9	10.1 0	uiteindelijke temperatuur
-	[mm]	[°C]	[°C]									
PO	75											
P1	100	301	291	294	296							296
P2	125	293	287	291	292							292
Р3	150	281	287	288	288						288	
P4	175	292	298	294	295	295	295					295
P5	200	296	298	289	293	292	293					293
P6	247.5	290	287	277	289	296	296	299	296	298	297	297
P7	320					286	293	287		297	297	297
P8	345					276	287	290	279	282	284	284
Р9	370					286	299	299	282	285	297	297
P10	395							304	293	296	298	298
P11	420					291	286	290	290	290		
Totaal gemiddeld	deld						293					
Delta T max												14



Figuur 39 Schets met schakelpunten van de variabele snelheid bij de edge-effect las

Na het vaststellen van de snelheden zijn de stromen verhoogd en is de powercurve gemaakt om de stroom te bepalen waarmee gelast gaat worden. Om te voorkomen dat de gebieden rondom de thermokoppels niet goed gelast worden zijn er slechts vier thermokoppels gebruikt bij de hogere stromen. In Figuur 40 is te zien welke stromen gebruikt zijn, hiervan zijn de stromen van 466, 500 en 540 A gebruikt voor de powercurve. De las-stroom is 580 A.



Figuur 40 Vergelijken van temperaturen bij verschillende weld-runs

4.5.2 Kwaliteitstesten

Van de gelaste delen zijn C-scans en microscopiemonsters genomen voor de analyse van de kwaliteit van de las interface. Trektesten zijn niet meer uitgevoerd binnen de looptijd van dit project. De beoordeling van de las kwaliteit wordt vooral bepaald aan de hand van C-scan resultaten, microscopie en bereikte temperatuur in het lasgebied (thermokoppel data).

4.5.2.1 C-Scan

Nadat de platen gelast zijn is de C-scan uitgevoerd. Op het C-scan resultaat in Figuur 42 lijkt de las op het schuine gedeelte goed gelukt en zijn er geen of weinig defecten te zien. Bij de overgang van schuin naar recht, lijkt een defect te zitten wat veroorzaakt zou kunnen zijn door een niet perfecte passing, te zien in de geel omcirkelde gebieden in Figuur 42. Buiten de schuine gedeelten waren thermokoppels geplaatst in het lasgebied, deze zijn duidelijk zichtbaar in de rood omcirkelde gebieden in Figuur 42



Figuur 41 kleurenpallet en de instellingen voor het C-scan resultaat van de edge-effect las.



Figuur 42 C-scan attenuation, 8044, edge-effect las

4.5.2.2 Microscopie

Van de gelaste plaat is een microscopie monster gemaakt, de doorsnede is in de richting van de las genomen, om op deze manier te kunnen analyseren of de las goed gelukt is.

In Figuur 42 is de microscopie foto getoond, deze is gedraaid om het resultaat zo gedetailleerd mogelijk te laten zien. In Figuur 42 staat twee keer dezelfde afbeelding. Het is niet helemaal zichtbaar waar de lasinterface zich bevindt, daarom is in de rechterafbeelding deze lasinterface aangegeven met eeen rode lijn. In het lasgebied bevinden zich weinig voids en is de las interface niet goed te zien. Hierdoor kan gezegd worden dat in het midden van het lasgebied de kwaliteit goed is.



Figuur 43 Microscopie foto van de Edge-effect las (afbeelding is 90⁴² graden gedraaid)

4.5.3 Conclusie

Deze las is uitgevoerd om in eerste instantie de edge-effecten te onderzoeken die zouden kunnen ontstaan in de op of afbouw van een laminaat. Naast het lasgebied zijn geen hoge temperaturen gemeten op de plaatsen waar dit edge-effect zou kunnen optreden. In het lasgebied is echter wel een iets lagere temperatuur zichtbaar rond de schuine gedeeltes wat aantoont dat het edge-effect wel degelijk aanwezig is. Dit is duidelijk te zien in Figuur 40, hier zijn de temperaturen rond de locaties 150 en 350mm, lager dan in de rest van de las.

Aan het beeld van het C-scan resultaat kan niet gezegd worden of de iets lagere temperatuur invloed heeft gehad op de kwaliteit van de las doordat de thermokoppels een (te) groot gebied verstoren.

4.6 Proefstukken met een variabele diepte van de lasinterface

Dit hoofdstuk beschrijft de parameters en resultaten van de lassen met een variabele diepte van de lasinterface. Er is gekozen voor een variabele diepte van de lasinterface omdat er met de beschikbare tooling geen eenvoudige mogelijkheid is om lassen met een daadwerkelijk variabele totale dikte van de proefstukken uit te voeren. Lassen buiten de setup levert nog problemen op zoals aangetoond in een onderzoek naar reparatiemethodes voor inductie en weerstandslassen (Wiebenga, 2020) en aanpassen van las tooling is complex, kostbaar en valt buiten de scope van dit onderzoek.

Voor de test met een variabele diepte van de lasinterface zijn platen met een lay-up van $[(0,90)_{16},0]$ verspaand waarin drie op/af-bouwen zitten. De afmetingen van deze platen zijn te zien in



Figuur 44. Deze platen zijn hetzelfde verspaand en passen op elkaar zoals te zien in de gelaste delen in Figuur 47. De vlakke delen van deze platen hebben op de interface de vezels in de 0-richting lopen om deze vergelijkbaar te maken met de las interface van eerder uitgevoerde lassen. In



Figuur 44 zijn de locaties van de thermokoppels aangegeven, de thermokoppels liggen in het midden van de laslijn.



Figuur 44 Afmetingen en TC locaties voor lassen met variabele lasinterface

4.6.1 Lasparameters

Om de temperaturen goed te kunnen analyseren zijn meerdere runs uitgevoerd, beginnend bij een lage stroom en daarbij een lage eindtemperatuur. In onderstaande Tabel 12 zijn de behaalde temperaturen zichtbaar bij de lagere stromen tot 400A en ongeveer 280°C. Tot en met 399A is gelast met een constante snelheid van 20cm/min, deze snelheid is de basissnelheid.

[°C] [°C]
275 279
276 279
260 273
256 270
230 242
20 9

Tabel 12 Gemeten temperaturen tot 400A variabele lasinterface. Temperaturen zijn met behulp van een kleurenschaal te herkennen aan hoog (rood) en laag (groen). Sommige weld-runs zijn meerder malen uitgevoerd bij dezelfde stroom, dit is aangegeven met een nummer achter de stroomsterkte.

In Tabel 12 is zichtbaar dat de temperaturen op thermokoppellocatie 1 en 11 veel lager zijn dan de thermokoppels daartussen. Deze lagere temperaturen komen door edge-effecten en worden niet meegenomen voor de gemiddelden en resultaten. De temperaturen tot en met de kolom "399A 2" hebben een groot verschil tussen maximum en minimum temperaturen, dit verschil is 27°C. In de kolommen vanaf "400 1.1" zijn de snelheid en stroom aangepast om de temperaturen binnen een acceptabele range van 11°C te krijgen. Om dit te bereiken is voor het eerste deel bij thermokoppel locatie twee en drie de snelheid verlaagt naar 17,5 cm/min, om een hogere temperatuur te krijgen in de lager liggende interface. Het laatste deel bij thermokoppel locatie negen en tien, is uitgevoerd met een hogere snelheid, 25cm/min, en een hogere stroom van 450A.

De keuzes voor de parameters zijn gebaseerd op de resultaten uit paragraaf 4.3. Om te bevestigen dat de instellingen in het laatste gebied zorgen voor een hogere interface temperatuur en niet een hogere temperatuur onder de interface is het laatste deel van de las gedaan met terugkoppeling van een thermokoppel onder het lasgebied. De temperatuur onder het lasgebied was 5°C koeler met de hogere snelheid en hogere stroom dan bij de standaard snelheid en stroom, terwijl de temperatuur op de interface 15°C toeneemt.

Nadat de variabele stroom en snelheid zijn vastgesteld is ter controle nog een aantal metingen verricht op 450A, zie

Tabel 13. Na het controleren is de powercurve gemaakt en zijn de platen gelast met een stroom van 540A (590A op het laatste deel) en hebben ze een temperatuur bereikt van 379°C. Bij de laatste runs zijn minder thermokoppels gebruikt omdat deze een grote verstoring geven bij de C-scan resultaten, zie paragraaf 4.5.2.1.

meetlocatie	afstand	450 A 2.1	450 A 2.2	450 A 2.3	470A	520A	540A
-	[mm]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	55	292			310		
2	75	314					
3	115	315					
4	165	313			322	368	379
5	217.5	311					
6	247.5	312	314	314			
7	277.5		315	317			
8	330		311	314			
9	380		272	309	322	365	379
10	410		283	311			
11	440		246	278	288		
Delta T max		4	44	8	0	3	0
gemiddeld		313	299	313	322	367	379

Tabel 13 Bereikte temperaturen bij gebruikte stromen variabele lasinterface TC1 en 11 zijn niet meegenomen bij gemiddelden en Delta T

4.6.2 Kwaliteitstesten

Van de gelaste delen zijn C-scans en microscopiemonsters genomen voor de analyse van de kwaliteit van de las interface. Trektesten zijn niet meer uitgevoerd binnen de looptijd van dit project. De beoordeling van de las kwaliteit wordt vooral bepaald aan de hand van C-scan resultaten, microscopie en behaalde temperatuur in het lasgebied (thermokoppel data).

De resultaten van het microscopie onderzoek zijn op het moment van schrijven nog niet beschikbaar.

4.6.2.1 C-scan

De C-scan resultaten van deze gemaakte las is zichtbaar in Figuur 46, met de daarbij behorende legenda in Figuur 45. Op het resultaat is te zien dat er zeer weinig verstoring zit ter hoogte van de op/af bouw van de laminaten. Het effect dat zichtbaar was op de rand van de afbouwen zoals in Figuur 42 is in Figuur 46 niet zichtbaar.

Palette No.	1 -	0100%	-100% +
Entries	16		-90%
Charles	··· ·	• 80%	-80%
Scale Type	100% FSH -	• 72%	-70%
Graph Type	Total 💌	057%	-60%
Style	Blended -	048%	-50%
oque	,	0 40%	-40%
Mode	Step •	¢32% ¢25%	-30%
StonSizo	5.3 %	813%	-20%
StepSize	-	810%	-10%
Top Level	85.3 %	0%	-0%

Figuur 45 Legenda C-scan resultaten variabele lasinterface 8044

In het C-scan resultaat in Figuur 46 lijkt het lasgebied smaller aan de rechterzijde dan aan de linkerzijde. Aan de hand van microscopisch onderzoek kan vastgelegd worden of dit daadwerkelijk het geval is. Daarnaast word in de lengterichting van de las een microscopiefoto gemaakt om deze te kunnen vergelijken met de resultaten van paragraaf 1.1.



Figuur 46 C-scan Attenuation resultaat 8044 variabele lasinterface

4.6.3 Conclusie

Tijdens deze test zijn de juiste temperaturen behaald, ook verschillen de behaalde temperaturen onderling weinig. Hierdoor kan gezegd worden dat in de lengte van de las het materiaal een juiste temperatuur heeft behaald. In de Cscans lijken de delen goed verbonden met weinig zichtbare defecten.

Deze resultaten geven aan dat, tot zover zichtbaar, delen met een variabele dikte te lassen zijn met inductielassen. Om de juiste temperatuur op de juiste diepte te krijgen moet gebruik worden gemaakt van een variabele snelheid en een variabele stroomsterkte. De gebruikte instellingen zijn niet wiskundig vastgelegd en zijn met de huidige kennis ook nog niet wiskundig te bepalen. Door een "trial and error" proces kunnen de parameters aangepast worden totdat de gewenste temperaturen behaald zijn.

Als het C-scan resultaat bekeken word in Figuur 46 lijkt het lasgebied smaller aan de rechterzijde. Met behulp van de microscopie kan dat bevestigd of ontkracht worden. De microscopie foto's zijn op moment van schrijven nog niet beschikbaar.



Figuur 47 variabele lasinterface, gelaste platen

5 Conclusie

In dit rapport is het onderzoek beschreven waarin wordt onderzocht hoe composieten met een variabele dikte gelast kunnen worden. De hoofdvraag van dit onderzoek luidt dan ook: Wat is de beste manier om thermoplastische composieten onderdelen met een variabele dikte doormiddel van inductielassen aan elkaar te verbinden? Door een variabele snelheid en stroomsterkte te gebruiken kunnen delen met variabele diktes aan elkaar gelast worden.

Composieten warmen op door de wervelstromen die veroorzaakt worden door het magnetische veld. Om de composieten goed te kunnen lassen moet op zijn minst de smelttemperatuur bereikt worden, en moet tijdens het lassen druk aanwezig zijn om te voorkomen dat voids ontstaan of dat voids groter worden. Binnen de context van dit project zijn er twee soorten laminaten: laminaten met UD lagen en laminaten met weefsels. Laminaten met weefsels hebben een efficiëntere verwarming door de grotere kruispunten van de vezelbundels dan UD laminaten. In het geval van UD en weefsel laminaten geldt in beide gevallen dat een opbouw van 0,90 graden de meest effectieve opwarming heeft. Een laminaat met ±45 lamellen geeft minder opwarming voor zowel UD als weefsel.

Tijdens dit project is onderzoek gedaan naar de opwarming van laminaten met verschillende diktes. De dikte van het totaal te lassen deel bepaald hoeveel energie nodig is om al het materiaal op te warmen. Een dik laminaat op een dun laminaat geeft een vergelijkbare opwarming als een dun laminaat op een dik laminaat. Voorwaarde hierbij is uiteraard wel dat laminaten van hetzelfde materiaal en vergelijkbare lay-up gebruikt worden.

Testen zijn uitgevoerd waarin verschillende parameters getest zijn. Aan de hand van deze testen kan gezegd worden dat met de huidige setup, de snelheid en de stroomsterkte variabel geprogrammeerd kunnen worden.

Met de huidige kennis kan nog niet wiskundig bepaald worden wat de benodigde instellingen zijn. Door zogenoemde weld-runs uit te voeren waarbij materiaal niet in de smelt wordt gebracht, kan een powercurve gemaakt worden waarmee een benodigde las-stroom benaderd kan worden. Dit is nog een trial en error proces.

Materialen zijn van goede kwaliteit als deze minder dan 2% voids bevatten. De gebruikte PEKK-UD panelen die gebruikt zijn in de testen bevatten ongeveer 0,5% voids. Bij het lassen is het de bedoeling dat de lasinterface goed verbonden is en minder dan 2% voids bevat. Naast dat de interface gelast wordt, is het moeilijk te voorkomen dat er materiaal buiten het lasgebied ook op smelttemperatuur komen. Bij het materiaal rondom de las is het ook van belang dat hier niet meer dan 2% voids zitten.

6 Aanbevelingen

Dit onderzoek toont aan dat onderdelen met een variabele dikte gelast kunnen worden waarbij aan de hand van Cscan resultaten en microscopie gezegd kan worden dat de resultaten tot zo ver goed zijn. Voordat lassen met een variabele dikte toegepast kunnen worden is meer onderzoek nodig.

Breedte lasgebied

In dit onderzoek is geen aandacht besteed aan de breedte van het lasgebied bij variabele en verschillende diktes. Om een goede lasverbinding te maken is het noodzakelijk dat de breedte van het lasgebied voorspelbaar is zodat er een goed verbinding is.

Koeling

Voor het testen is de testopstelling van KVE gebruikt. Om bij de testen zoveel mogelijk omstandigheden constant te houden is de setup tussen weld-runs door gekoeld met ventilatoren. Zelfs met het gebruik van deze ventilatoren duurt het nog te lang om snel testen uit te kunnen voeren en is de opstelling nog niet geheel afgekoeld. Om testen sneller, efficiënter en consistenter te kunnen uitvoeren is een betere koeling nodig. Denk bij betere koeling aan koelkanalen door de setup of aluminium heatsinks met ventilatoren.

Edge-effect

Tijdens dit onderzoek is gekeken of het edge effect aanwezig is waarbij is gebleken dat er geen significante verhoging van het materiaal naast het lasgebied is. In het lasgebied is de temperatuur op de afbouwende delen lager, dit zou kunnen komen door het edge-effect en zou verder geanalyseerd moeten worden. Tijdens deze test zijn verspaande delen gebruikt en niet afbouwen die er in gelamineerd zijn. Is het edge-effect ook zichtbaar tijdens het lassen van zulke delen?

Druk

Tijdens de lassen is een constante druk van ongeveer zes bar gebruikt om de-consolidatie tegen te gaan. Om het gehele inductielasproces breder inzetbaar te maken zou er onderzocht moeten worden of deze druk lager kan. Om de druk lager te krijgen zou bijvoorbeeld het materiaal geproduceerd moeten worden onder een lagere druk. Hierbij is de uitdaging om laminaten te maken met niet te veel voids.

Inductiespoel geometrie

Tijdens dit onderzoek is gebruik gemaakt van de inductiespoel geleverd door KVE. Deze heeft een voorspelbaar gedrag en is geschikt voor de SLS proefstukken en rechte lassen. Daarnaast is de vezel oriëntatie erg van belang bij het gebruik van dit ontwerp. Om proefstukken met andere lay-ups te kunnen lassen of waarbij de lay-up minder invloed heeft op het opwarmbeeld, zou onderzoek moeten worden gedaan naar het gebruik van andere inductiespoelen.

Lassen buiten de setup

De lassetup beperkt zich tot rechte lassen met delen die samen een gelijke dikte hebben. In praktijk komt dit niet altijd voor en zou er onderzoek moeten worden gedaan naar het lassen buiten de setup. Bij het lassen buiten de setup kan gedacht worden als onder vacuüm, eenvoudig gereedschap dat druk uitoefent of een consolidatieroller zoals in een automated fiber placement machine.

Breedte lasgebied bij variabele dikte

Aan de hand van de C-scan resultaten kan niet gezegd worden of het lasgebied een constante breedte heeft. Er zou onderzoek gedaan moeten worden of het lasgebied daadwerkelijk een andere breedte of kwaliteit heeft.

7 Referenties

ASTM 5573-99. (1999, 4). Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints. West Conshohocken.

ASTM D1002-01. (2001, 10 10). Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal). West Conshohocken: ASTM.

ASTM D2093-03. (2003, 5). Standard Practice for Preparation of Surfaces of Plastics Prior to Adhesive Bonding.

ASTM D5868-01. (2001, 3 10). Standard Test Method for Lap Shear Adhesion for Fiber Reinforced Plastic (FRP) Bonding. ASTM.

Depth of Penetration & Current Density. (-, - -). Opgeroepen op 12 10, 2019, van nde-ed.org: https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/EddyCurrents/Physics/depthcurrentdensity.htm

Dhondt, M. (2019). *induction welding of high performance thermoplastic composites*. Delft: TU Delft.

Excel trendline types, equations and formulas. (2019, 6 14). Opgeroepen op 12 18, 2019, van ablebits: https://www.ablebits.com/office-addins-blog/2019/01/16/excel-trendline-types-equations-formulas/#power-trendline

Gardiner. (2018, 19). *Welding thermoplastic composites*. Opgeroepen op 12 20, 2019, van Compositeworld: https://www.compositesworld.com/articles/welding-thermoplastic-composites

Hagenbeek, M., Vila Bramon, K., & Fernandez Villegas, I. (2018). *Controlling the edge effect using a bypass conductor for induction welding of carbon fibre*. Delft.

Nijssen, R. (2013). Composieten Basiskennis (2 ed.).

T.J. Ahmed, D. S. (2005). Induction welding of thermoplastic composites—an overview. delft: sciencedirect.

Tijhuis, L. (2019). Induction welding of thermoplastic composites. Marknesse: NLR.

Type E Thermocouple. (2011). Opgeroepen op 2019, van Thermocoupleinfo:

https://www.thermocoupleinfo.com/type-e-thermocouple.htm

Wiebenga, A. (2020). Induction and resistance welded repairs on thermoplastic composites. Marknesse: NLR.

Yousefpour, A. (2004). Fusion Bonding/Welding of Thermoplastic Composites. *Thermoplastic Composite Materials vol.17*, 303-340.

Appendix A specificaties

Appendix A.1 Toray/TenCate TC1320

Toray Cetex® TC1320 PEKK



Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray Cetex® TC1320 is a high-end thermoplastic composite material, utilizing the semi-crystalline thermoplastic polymer PEKK for excellent elevated service performance.

Qualified for use in aerostructures, this material has a proven applicability in aerospace. Toray Cetex® TC1320 offers outstanding mechanical performance and good hot/wet strength. The semi-crystalline nature of the resin ensures an excellent resistance to chemicals and solvents, and an equally superior performance in flammability properties.

Toray Cetex® TC1320 is available as a UD tape, a fabric prepreg, and as reinforced thermoplastic laminates (RTLs) of varying thicknesses. RTLs can be equipped with lightning strike protection, and carbon reinforced RTLs can be supplied with a thin glass top layer to protect a partly metallic assembly against galvanic corrosion. Glass scrim is also applicable in structures made from UD tape.

FEATURES

- Qualified and certified to aerospace OEM specifications
- Excellent toughness and impact resistance
- Excellent mechanical performance, also at elevated temperatures
- Low moisture uptake for good hot/wet strength retention
- Inherently flame retardant
- Outstanding chemical and solvent resistance
- Indefinite shelf life at ambient temperature storage

PRODUCT TYPE

PEKK (PolyEtherKetoneKetone) Thermoplastic Resin System

TYPICAL APPLICATIONS

- Primary and secondary aircraft structures
- High load aircraft interiors applications
- Access panels, rib stiffeners, brackets, conduit, flooring

SHELF LIFE

C

ut Life:	Indefinite at ambient temperature storage			
rozen Storage Life:	Not applicable—product does not			

Density (specific gravity)	1.30 g/cm ³ (80.5 lb/ft ³)
T _g (glass transition)	160°C (320°F)
T _m (melt)	337°C (639°F)
T _c (crystallinity)	265°C (509°F)
T _p (processing)	370-400°C (700-750°F)

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES



Contact us for more information: North America/Asia/Pacific e explore@toraytac-usa.com t +1 408 465 8500

Europe/Middle East/Africa e explore@toraytac-europe.com t +31 (0) 548 633 933



Toray Cetex® TC1320 PEKK



PRODUCT DATA SHEET

PHYSICAL PROPERTIES

Property	Standard Modulus Carbon UD Tape
Fiber areal weight (FAW)	145 g/m² (4.28 oz/yd²)
Weight per ply (PAW)	221 g/m² (6.52 oz/yd²)
Resin content by weight (RC)	34%
Consolidated ply thickness (CPT)	0.14 mm (0.006″)
Density	1.59 g/cm ³ (99.3 lb/ft ³)
Width	305 mm (12″)*

*Narrower widths are available through secondary slitting For the availability of other reinforcements, please contact Toray Advanced Composites

MECHANICAL PROPERTIES

Standard Modulus Carbon 145gsm UD Tape 45% RC					
Property	Condition	Test Method	Results		
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	2410 MPa	350 ksi	
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	135 GPa	19.5 Msi	
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D 3039	86 MPa	12.5 ksi	
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	10 GPa	1.4 Msi	
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	1300 MPa	189 ksi	
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	124 GPa	18 Msi	
Compression Strength 0°	ETD	ASTM D 6641	1222 MPa	177 ksi	
Compression Modulus 0°	ETD	ASTM D 6641	124 GPa	18 Msi	
In-Plane Shear Strength	RTD	ASTM D 3518	152 MPa	22 ksi	
In-Plane Shear Strength 2% Offset	RTD	ASTM D 3518	50.5 MPa	7.3 ksi	
In-Plane Shear Modulus	RTD	ASTM D 3518	5.2 GPa	0.75 Msi	
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D 790	152 MPa	22 ksi	
Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/90°	RTD	ASTM D 2344	96.5 MPa	14 ksi	
Fiber type AS-4D ETD is 121°C (250°F) CTD is 18°C (65°F)					

ETW is 6°C (140°F), after 85% relative humidity until saturation, soaked at 71°C (160°F) Laminate $T_{\rm s}$ by DMA is 160°C (320°F)

Continued on page 3



Toray Cetex® TC1320 РЕКК



PRODUCT DATA SHEET

			Cont	inued from page 2
Standard	d Modulus Carbon 1	45gsm UD Tape 45% RC		
Property	Condition	Test Method	Res	
Open-Hole Tensile Strength	RTD	ASTM D 5766	420 MPa	61 ksi
Open-Hole Tensile Strength	CTD	ASTM D 5766	422 MPa	61 ksi
Open-Hole Tensile Strength	ETW	ASTM D 5766	410 MPa	60 ksi
Open-Hole Compression Strength	RTD	ASTM D 6484	331 MPa	48 ksi
Open-Hole Compression Strength	ETD	ASTM D 6484	282 MPa	41 ksi
Open-Hole Compression Strength	ETW	ASTM D 6484	268 MPa	39 ksi
Compression After Impact Strength 30.5 J (270 in/lb) Impact Energy	RTD	ASTM D 7136/7137	303 MPa	44 ksi
Mode I Interlaminar Fracture Toughness (G _{IC} Strain Energy Release Rate)	RTD	ASTM D 5528	1.6 kJ/m ²	9.0 in-lb/in ²
Mode II Interlaminar Fracture Toughness (G _{IIC} Strain Energy Release Rate)	RTD	ASTM D 7905	2.3 kJ/m ²	13.0 in-lb/in ²
Fiber type AS-4D Fiber type AS-4D ETD is 121°C (250°F) CTD is 18°C (65°F) ETW is 60°C (140°F), after 85% relative humidity until saturation, soaked at 71°C (160°F) Laminate T. by DMA is 160°C (320°F)				

HEALTH & SAFETY

Health and safety information on handling and processing Toray composite materials is described in the Safety Data Sheet available from Toray Advanced Composites. To obtain this or any other information about Toray Cetex® PEKK thermoplastic composite materials, please contact Toray Advanced Composites.

Revised 11/2019

TC1320_PDS_v3_2019-11-20 Page 3/3

© 2019. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and Toray Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties. Toray[®], (Toray) Amber Tool[®], (Toray) Cetex[®], (Toray) MicroPly[®], and all other related characters, logos, and trade names are claims and/or registered trademarks of Toray Industries Inc. and/or its subsidiary companies in one or more countries. Use of trademarks, trade names, and other IP rights of Toray Industries Inc. without prior written approval by such is strictly prohibited.

TORAY





18255 Sutter Blvd. Morgan Hill, CA 95037, USA t +1 408 465 8500 G. van der Muelenweg 2 7443 RE Nijverdal, The Netherlands t +31 (0) 548 633 933 www.toraytac.com explore@toraytac-usa.com (North America/Asia/Pacific) explore@toraytac-europe.com (Europe/Middle East/Africa)

Appendix A.2 Toray/TenCate TC1100

Toray Cetex[®] TC1100 PPS



PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray Cetex®TC1100 is a high-end but cost-effective thermoplastic composite material, utilizing a semi-crystalline PPS polymer for excellent mechanical properties and an outstanding chemical and solvent resistance.

With over 7 million parts in flight and gualified for structural application at Airbus, Boeing, and many other airframe OEMs, Toray Cetex® TC1100 offers a great balance between cost and performance, both mechanical and chemical. The material is inherently flame resistant (< 35/35 OSU) with low smoke emission.

Besides application in aerospace, Toray Cetex® TC1100 is often the material of choice for demanding industrial applications.

Toray Cetex® TC1100 is available as a UD tape, a fabric prepreg, and as reinforced thermoplastic laminates (RTLs) of varying thicknesses. RTLs can be equipped with lightning strike protection, and carbon reinforced RTLs can be supplied with a thin glass top layer to protect a partly metallic assembly against galvanic corrosion.

FEATURES

- Qualified and certified to aerospace OEM specifications
- Outstanding performance-to-cost ratio
- Service temperature can exceed T_g depending on part design
- > Lightning strike material as well as galvanic corrosion protection can be incorporated on laminates
- Inherently flame retardant
- Outstanding chemical and solvent resistance
- Indefinite shelf life at ambient temperature storage

PRODUCT TYPE

PPS (PolyPhenyleneSulfide) Thermoplastic Resin System

TYPICAL APPLICATIONS

- Primary and secondary aircraft structures: wing leading edges, engine pylon structures, clips and cleats for fuselage structure
- > Aircraft interiors: acoustic structures, structural components of seats, galleys, stowage boxes
- High-end industrial applications where corrosive environments, dimensional stability, or vibration dampening play a role

SHELF LIFE

Out Life:	Indefinite at ambient temperature storage			
Frozen Storage Life:	Not applicable—product does not			

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Density (specific gravity)	1.35 g/cm ³ (84.3 lb/ft ³)
T _g (glass transition)	90°C (194°F)
T _m (melt)	280°C (536°F)
T _p (processing)	300-330°C (570-625°F)

MAIN QUALIFICATIONS

- ► ABS 5045
- ► ABS 5222
- ▶ MEP 15-052
- NTA 62901 (Type II)



Contact us for more information: North America/Asia/Pacific e explore@toraytac-usa.com +1 408 465 8500

Europe/Middle East/Africa e explore@toraytac-europe.com t +33 (0)548 633 933



Toray Cetex® TC1100 PPS



Continued from page 2

PRODUCT DATA SHEET

Standard Modulus T300JB 3K Carbon 280gsm FAW 5HS Woven Fabric Reinforced Laminate 43% RC				
Property	Condition	Test Method	Res	ults
Tensile Strength 0°	ETW*	EN 2597 B	736 MPa	107 ksi
Tensile Modulus 0°	ETW*	EN 2597 B	56.0 GPa	8.1 Msi
Tensile Strength 90°	ETW*	EN 2597 B	818 MPa	119 ksi
Tensile Modulus 90°	ETW*	EN 2597 B	56.0 GPa	8.1 Msi
Compression Strength 0°	ETW*	EN 2850 B	522 MPa	76 ksi
Compression Modulus 0°	ETW*	EN 2850 B	52.0 GPa	7.5 Msi
Compression Strength 90°	ETW*	EN 2850 B	481 MPa	70 ksi
Compression Modulus 90°	ETW*	EN 2850 B	52.0 GPa	7.5 Msi
In-Plane Shear Strength ±45°	ETW*	AITM 1-0002	112 MPa	16 ksi
In-Plane Shear Modulus ±45°	ETW*	AITM 1-0002	2.7 GPa	0.4 Msi
Flexural Strength 90°	ETW*	EN 2562 A	743 MPa	108 ksi
Flexural Modulus 90°	ETW*	EN 2562 A	44.0 GPa	6.4 Msi
Compression After Impact Strength	ETW*	AITM 1-0010, issue 3	220 MPa	32 ksi

50% fiber by volume (Vf) *ETW is tested at 80°C (76°F)/dry after 1000 hours of conditioning at 70°C (158°F)/85% RH

Standard Modulus Carbon 221gsm FAW UD Tape Laminate 34% RC				
Property	Condition	Test Method	Res	ults
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	2020 MPa	294 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	134 GPa	19.5 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D 3039	39 MPa	5.7 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	10 GPa	1.4 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	1100 MPa	160 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	117 GPa	17 Msi
In-Plane Shear Strength ±45°	RTD	ASTM D 3518	82 MPa	11.9 ksi
In-Plane Shear Modulus ±45°	RTD	ASTM D 3518	3.5 GPa	0.5 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D 7264	68 MPa	9.9 ksi
Open-Hole Compressive Strength	RTD	ASTM D 6484	267 MPa	38.7 ksi
Compression After Impact Strength 30.5 J (270 in/lb) Impact Energy	RTD	ASTM D 7137	216 MPa	31.4 ksi
Fiber type AS4A 59% fiber by volume (Vf)				



Toray Cetex® TC1100 PPS



PRODUCT DATA SHEET

Standard Modulus T300JB 3K Carbon 200gsm FAW PW Woven Fabric Reinforced Laminate 43% RC				
Property	Condition	Test Method	Res	ults
Tensile Strength 0°	RTD	EN 2597 B	753 MPa	109 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	EN 2597 B	55.9 GPa	8.1 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	EN 2597 B	716 MPa	104 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	EN 2597 B	54.4 GPa	7.9 Msi
Compression Strength 0°	RTD	EN 2850	571 MPa	83 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	EN 2850	51.9 GPa	7.5 Msi
Compression Strength 90°	RTD	EN 2850	586 MPa	85 ksi
Compression Modulus 90°	RTD	EN 2850	51.6 GPa	7.5 Msi
In-Plane Shear Strength ±45°	RTD	AITM 1-0002	124 MPa	18 ksi
In-Plane Shear Modulus ±45°	RTD	AITM 1-0002	3.9 GPa	0.6 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	EN 2562 A	897 MPa	130 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	EN 2562 A	49.0 GPa	7.1 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	EN 2562 A	839 MPa	122 ksi
Flexural Modulus 90°	RTD	EN 2562 A	49.3 GPa	7.2 Msi
Open-Hole Tensile Notched Strength	RTD	EN 6035	264 MPa	38 ksi
Open-Hole Tensile Unnotched Strength	RTD	EN 6035	527 MPa	76 ksi
Open-Hole Compression Notched Strength	RTD	EN 6036	262 MPa	38 ksi
Open-Hole Compression Unnotched Strength	RTD	EN 6036	428 MPa	62 ksi
Bearing Strength	RTD	EN 6037	824 MPa	120 ksi
Bearing Strength Modulus	RTD	EN 6037	406 GPa	58.9 Msi
Tensile Strength 0°	CD**	EN 2597 B	755 MPa	109 ksi
Tensile Modulus 0°	CD**	EN 2597 B	54.0 GPa	7.8 Msi
Tensile Strength 90°	CD**	EN 2597 B	737 MPa	107 ksi
Tensile Modulus 90°	CD**	EN 2597 B	53.3 GPa	7.7 Msi
Open-Hole Tensile Notched Strength	CD**	EN 6035	288 MPa	42 ksi
Compression Strength 0°	ETW*	EN 2850	528 MPa	77 ksi
Compression Modulus 0°	ETW*	EN 2850	52.1 GPa	7.6 Msi
Compression Strength 90°	ETW*	EN 2850	530 MPa	77 ksi
Compression Modulus 90°	ETW*	EN 2850	52.9 GPa	7.7 Msi
Compression After Impact Strength	RTD	AITM 1-0010, issue 3	265 MPa	38 ksi
Flexural Strength 0°	ETW*	EN 2562 A	821 MPa	119 ksi
Flexural Modulus 0°	ETW*	EN 2562 A	49.5 GPa	7.2 Msi
Flexural Strength 90°	ETW*	EN 2562 A	821 MPa	119 ksi
Flexural Modulus 90°	ETW*	EN 2562 A	48.8 GPa	7.1 Msi

Continued on page 6

Cetex° TC1100_PDS_v5_2019-11-20 Page 5/6

Toray Cetex[®] TC1100 PPS



PRODUCT DATA SHEET

Continued from page 5 Standard Modulus T300JB 3K Carbon 200gsm FAW PW Woven Fabric Reinforced Laminate 43% RC Property Condition Test Method Results In-Plane Shear Strength ±45° ETW* AITM 1-0002 110 MPa 16 ksi In-Plane Shear Modulus ±45° AITM 1-0002 2.7 GPa 0.4 Msi ETW* **Open-Hole Compression Notched** ETW* EN 6036 215 MPa 31 ksi Strength **Bearing Strength** ETW* EN 6037 805 MPa 117 ksi **Bearing Strength Modulus** ETW* EN 6037 362 GPa 52.5 Msi

50% fiber by volume (Vf) *ETW is tested at 80°C (176°F)/dry after 1000 hours of conditioning at 70°C (158°F)/85% RH **CD is tested at -55°C (-67°F)/dry

Intermediate Modulus Carbon 146gsm FAW UD Tape Laminate 34% RC				
Property	Condition	Test Method	Resu	ılts
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	2760 MPa	400 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	152 GPa	22.1 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D 3039	39 MPa	5.7 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	10 GPa	1.4 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	1280 MPa	186 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	124 GPa	18 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D 7264	65 MPa	9.5 ksi
Fiber type IM7 59% fiber by volume (Vf)				

HANDLING SAFETY

Health and safety information on handling and processing Toray composite materials is described in the Safety Data Sheet available from Toray Advanced Composites. To obtain this or any other information about Toray Cetex® PPS thermoplastic composite materials, contact Toray Advanced Composites.

Revised 11/2019

TC1100_PDS_v5_2019-11-20 Page 6/6

© 2019. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and Toray Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties. Toray[®], (Toray) Amber Tool[®], (Toray) Cetex[®], (Toray) MicroPly[®], and all other related characters, logos, and trade names are claims and/or registered trademarks of Toray Industries Inc. and/or its subsidiary companies in one or more countries. Use of trademarks, trade names, and other IP rights of Toray Industries Inc. without prior written approval by such is strictly prohibited.

TORAY

Cetex

18255 Sutter Blvd. Morgan Hill, CA 95037, USA t +1 408 465 8500

2450 Cordelia Road Fairfield, CA 94534, USA t +1 707 359 3400

Toray Advanced Composites

G. van der Muelenweg 2 7443 RE Nijverdal, NL t +33 (0)548 633 933

www.toraytac.com

explore@toraytac-usa.com (North America/Asia/Pacific) explore@toraytac-europe.com (Europe/Middle East/Africa)

Toray Cetex® TC1100 PPS



PRODUCT DATA SHEET

MECHANICAL PROPERTIES

EC9 Glass 300gsm FAW 8HS Woven Fabric Reinforced Laminate 34% RC				
Property	Condition	Test Method	Res	ults
Tensile Strength 0°	RTD	EN 2747-III	494 MPa	72 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	EN 2747-III	21.2 GPa	3.1 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	EN 2747-III	369 MPa	53 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	EN 2747-III	20.0 GPa	2.9 Msi
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	470 MPa	68 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	26.2 GPa	3.8 ksi
Compression Strength 90°	RTD	ASTM D 6641	316 MPa	46 ksi
Compression Modulus 90°	RTD	ASTM D 6641	24.3 GPa	3.5 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ISO 178	659 MPa	96 ksi
Flexural Modulus 90°	RTD	ISO 178	23.1 GPa	3.4 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	ISO 178	467 MPa	68 ksi
Flexural Modulus 90°	RTD	ISO 178	19.3 GPa	2.8 Msi
In-Plane Shear Strength ±45°	RTD	AITM 1-0002	98 MPa	14 ksi
In-Plane Shear Modulus ±45°	RTD	AITM 1-0002	4.1 GPa	0.6 Msi
Open-Hole Tensile Strength 0°	RTD	AITM 1-0007 iss. 2	180 MPa	26 ksi
Open-Hole Compressive Strength 0°	RTD	AITM 1-0007 iss. 2	192 MPa	28 ksi
Bolt Bearing	RTD	ITM 1-0009	596 MPa	86 ksi
Compression After Impact Strength	RTD	AITM 1-0010 at 1 mm indent	150 MPa	22 ksi
Tensile Strength 0°	ETW*	EN 2747-III	349 MPa	51 ksi
Tensile Modulus 0°	ETW*	EN 2747-III	20.8 GPa	3.0 Msi
Tensile Strength 90°	ETW*	EN 2747-III	294 MPa	43 ksi
Tensile Modulus 90°	ETW*	EN 2747-III	19.1 GPa	2.8 Msi
Compression Strength 0°	ETW*	ASTM D 6641	278 MPa	40 ksi
Compression Modulus 0°	ETW*	ASTM D 6641	23.9 GPa	3.5 Msi
Compression Strength 90°	ETW*	ASTM D 6641	204 MPa	30 ksi
Compression Modulus 90°	ETW*	ASTM D 6641	22.2 GPa	3.2 Msi
Flexural Strength 0°	ETW*	ISO 178	433 MPa	63 ksi
Flexural Modulus 90°	ETW*	ISO 178	22.3 GPa	3.2 Msi
Flexural Strength 0°	ETW*	ISO 178	309 MPa	45 ksi
Flexural Modulus 90°	ETW*	ISO 178	18.7 GPa	2.7 Msi
In-Plane Shear Strength ±45°	ETW*	AITM 1-0002	74 MPa	11 ksi
In-Plane Shear Modulus ±45°	ETW*	AITM 1-0002	1.9 GPa	0.3 Msi
Open-Hole Tensile Strength 0°	ETW*	AITM 1-0007 iss. 2	126 MPa	18 ksi
Open-Hole Compressive Strength 0°	ETW*	AITM 1-0007 iss. 2	127 MPa	18 ksi
50% fiber by volume (Vf) Fabric style 7781				



Appendix A.3 Teflon coated glasvezeltape





Levensmiddel toegestaan

Dit product is conform:

- Verordening (EG) nr. 1935/2004
- Verordening (EU) Nr. 10/2011
- FDA 21CFR, Sectie 177.1550

Algemene eigenschappen

Dikte	120 µm
Gewicht (± 5%)	240 g/m²
Kleur	Bruin

Coating

Coating	PTFE
Coating percentage	55 %

Weefsel

Binding	Linnen binding
Materiaal ketting	Glas
Materiaal inslag	Glas

Mechanische eigenschappen

Treksterkte ketting	1200 N/5cm
Rek bij breuk	
Minimale keerrol diameter	

Thermische eigenschappen

Maximale continue temperatuur	260 °C
Minimale continue temperatuur	-170 °C

Lijmlaag

```
Kleefkracht
```

Lijmdikte

Disclaimer Alle technische gegevens zijn gebaseerd op gemiddelde waarden. Zij komen overeen met onze huidige kennis en zijn niet juridisch bindend. Alle gegevens kunnen zonder voorafgaande kennisgeving worden

Versie: 1.0 (20170104)

Hardick by • Postbus 281 - 7500 AG Enschede NL • Thermen 5 - 7521 PS Enschede NL T +31 53 435 32 35 • F +31 53 433 61 37 • E info@hardick.nl KvK. Enschede nr. 06032773 • BTW nr. NL 0014 01 336 801

www.hardick.nl

Appendix B Gebruikte componenten

Appendix B.1 Generator

Als lasgenerator is gebruik gemaakt van een Ambrell EASYHeat 83100 LI met 10kW bij 150-400kHz. De generator is watergekoeld en kan analoog aangestuurd en gemonitord worden.

Appendix B.2 Waterkoeler

De waterkoeler, ook Chiller genoemd, wordt gebruikt om de coil, de remote heat station en de generator te koelen. De chiller houdt de watertemperatuur onder de 15°C. Dit houdt de parameters tijdens de lassen constant.



Appendix B.3 **Robot arm**

De lasopstelling is gemaakt en bedoeld om gebruikt te worden door een robot arm. Door het gebruik van een robotarm is het mogelijk om te lassen met een constante snelheid, instelbare parameters en een repeteerbaar proces.

Bij deze opstelling wordt gebruikt gemaakt van een KUKA KR 240 R2700 PRIME

Specification	Value
Axis of rotation	6
Axis 1 rotation (pedestal)	340 degrees or larger
Axis 6 rotation (wrist)	720 degrees or larger
Pay load (weld head)	>20 kg
Repeatability	0.1 mm or smaller
Reach	2000 mm or larger
Sensitive collision detection	If required
Constant path function (speed from A-B)	If required

Appendix B.4 Data aquisitiesysteem

Voor het monitoren van de temperatuur wordt gebruik gemaakt van standaard type E thermokoppels. Type E thermokoppels worden gebruikt door het niet opvangen van magnetisch veld, temperatuurbereik en nauwkeurigheid

(±1.7°C of 0.5%). De gebruikte thermokoppels zijn van het formaat AWG32, dit komt overeen met 0,032mm². De thermokoppels zijn geïsoleerd met een PFA omhulsel en als paar getwist. <u>https://www.polyfluor.nl/nl/materialen/pfa/</u> Het thermokoppeldraad is geleverd door TC direct (<u>https://www.tcdirect.nl/</u>)

De thermokoppels zijn verbonden met een Eurotherm 6100A data logger welke verbonden is met een PC waarmee alle data opgeslagen en geëxporteerd kan worden.

De geëxporteerde data heeft een resolutie van 1 seconde.

Specificaties:

https://www.eurotherm.com/en/products/recorders-and-data-acquisition-en/graphic-recorders-en/6100a-6180a-paperless-graphic-recorder/

Appendix B.5 Laskop-robot interface

De laskop-robot-interface verbindt de Ambrell inductiegenerator aan de inductiespoel. De laskop-robot interface zit bevestigd aan een snelkoppeling aan de Kuka robotarm. In deze interface komen de kabels en koelslangen van de Ambrell inductiegenerator binnen, welke nodig zijn om de inductiespoel te voeden en te koelen.

Appendix B.6 Inductiespoel

De inductiespoel is geleverd door KVE en is gemaakt voor het gebruik in de huidige setup. De inductiespoel van de huidige opstelling betreft eigenlijk slechts een enkele draad. Het gedeelte dat parallel en nabij het lasgebied ligt, wekt het elektromagnetische inductieveld op dat het materiaal opwarmt.

Appendix B.7 Luchtbalg

Aan de onderzijde van de las zit een silicone strip met daaronder een luchtbalg. De luchtbalg is nodig om druk uit te oefenen op de las om consolidatie tegen te gaan. De siliconen strip dient ter bescherming van de luchtbalg. Druk van 6 bar is nodig. De platen die gelast worden zijn geconsolideerd onder 6 bar druk en vacuüm. Onderzoek van Lance Tijhuis heeft aangetoond dat lassen op 4 bar al een negatieve invloed heeft op de kwaliteit van de las.

Appendix B.8 Heatsink

De heatsink voert de warmte af uit de bovenste oppervlakte van de las. De bovenste oppervlakte ligt het dichtst bij de inductiespoel waar ook meer wervelstromen worden opgewekt. De hogere concentratie van wervelstromen zorgen voor een hogere temperatuur nabij de inductiespoel. De heatsink onttrekt deze warmte om te voorkomen dat het laminaat te warm wordt aan de oppervlakte.

De heatsink is gemaakt en geleverd door KVE en is gemaakt van een keramisch materiaal.

64

Appendix B.9 Tooling

Voor de inductielassetup zijn 2 verschillende toolings beschikbaar. Één om SLS proefstukken te maken en één voor Lprofiel verstijvers op vlakke platen.

Appendix B.9.1 SLS

SLS staat voor single-lap-shear. De setup is bedoeld om sls proefstukken te maken die geschikt zijn voor trekproeven volgens astm standaarden.

In deze setup komen de platen 25.4mm over elkaar heen te liggen als de standaard afmetingen van 609.6x101.6mm



Sketch tooling Single lap joint

Appendix B.9.2 L-verstijver of scarf joints

Deze setup is gemaakt voor L-verstijvers, voorgaande onderzoeken hebben aangetoond dat het ook geschikt kan zijn om scarfs te lassen. Hierbij liggen de platen vlak.



Appendix C Parameters en gegevens

Appendix C.1 Snelheidlastesten

Appendix C.1.1 20cm/min

Appendix C.1.1.1 7893

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔТ	from powercurve	
153.3	88.4	Real	19.60	68.8		
254.1	199.4	Real	22.83	176.6		
302.4	258.5	Real	26.04	232.4		
317	280	Estimated	24.49	255.6	280.00	0%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (2tm5)
153.3	0.00	88.26	88.01	87.85	89.64	0.00	88.44
254.1	0.00	199.28	197.76	198.76	201.74	0.00	199.38
302.4	0.00	259.66	255.23	256.15	262.84	0.00	258.47
317	0.00	279.04	277.78	277.81	285.71	0.00	280.08



Appendix C.1.1.2 7984

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from powercurve	
151.2	89.8	Real	22.15	67.7		
201.6	137.8	Real	25.81	112.0		
252	201.2	Real	24.79	176.4		
317	281	Estimated	26.76	254.4	287.38	- 2 %

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (3,4)
151.2	0.00	89.77	39.79	90.35	89.26	0.00	89.80
201.6	0.00	136.11	139.41	139.03	136.82	0.00	137.84
252	0.00	198.25	204.03	202.66	199.80	0.00	201.19
317	0.00	275.64	282.07	285.63	281.18	0.00	281.13



Appendix C.1.1.3 7895

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from powercurve	
151.2	87.1	Real	20.38	66.8		
201.6	138.1	Real	24.01	114.1		
249.9	196.1	Real	21.31	174.8		
317	281	Estimated	22.11	258.8	295.95	-5%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (2tm5)
151.2	0.00	85.91	87.54	86.88	88.21	0.00	87.13
201.6	0.00	135.52	138.89	137.92	140.23	0.00	138.14
249.9	0.00	192.68	198.55	195.42	197.77	0.00	196.11
317	0.00	274.45	282.16	281.33	285.76	0.00	280.92



Appendix C.1.2 30 cm/min

Appendix C.1.2.1 7896

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from powercurve	
151.2	76.6	Real	22.15	54.4		
201.6	117.1	Real	24.11	93.0		
249.9	165.4	Real	22.07	143.3		
317.1	236.6	Real	21.28	215.3	246.35	-4%
346.5	269.9	Real	22.89	247.1	280.69	-4%
355	293	Estimated	25.10	267.6	289.23	1%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	
151.2	0.00	76.01	76.66	76.49	74.66	0.00	76.58
201.6	0.00	116.70	117.22	116.99	114.01	0.00	117.11
249.9	0.00	165.51	166.33	164.51	160.46	0.00	165.42
317.1	0.00	232.35	238.22	235.00	233.63	0.00	236.61
346.5	0.00	262.98	272.93	266.95	269.73	0.00	269.94
355	0.00	291.28	300.09	295.23	284.16	0.00	292.69



Appendix C.1.2.2 7897

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from powercurve	
151.2	80.0	Real	21.93	58.1		
201.6	119.3	Real	24.05	95.2		
317.1	239.1	Real	25.95	213.1		
355	282	Estimated	22.35	260.1	281.05	0%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (2tm5)
151.2	0.00	80.67	81.83	78.14	79.53	0.00	80
201.6	0.00	119.53	121.35	116.53	119.64	0.00	119
317.1	0.00	241.49	243.29	232.34	239.26	0.00	239
355	0.00	302.35	285.08	266.26	275.95	0.00	282



Appendix C.1.2.3 7898

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from powercurve	
151.2	77.4	Real	24.48	52.9		
201.6	116.8	Real	24.84	91.9		
317.1	236.1	Real	24.35	211.7		
352	278	Estimated	25.44	252.1	280.00	-1%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (2tm5)
151.2	0.00	78.21	77.79	76.57	76.97	0.00	77
201.6	0.00	117.58	118.06	116.05	115.32	0.00	117
317.1	0.00	236.75	238.27	232.76	236.46	0.00	236
352	0.00	277.27	279.00	274.04	279.99	0.00	278


Appendix C.1.3 40 cm/min

Appendix C.1.3.1 7899

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from power	curve
151.2	67.0	Real	20.38	46.7		
249.9	139.6	Real	31.07	108.5		
317.3	201.9	Real	24.34	177.5		
371.7	256.4	Real	21.78	234.7	250.99	2%
398	282	Estimated	24.79	257.1	287.46	- 2 %

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (3,4)
151.2	66.51	67.17	67.08	67.40	0.00	0.00	67
249.9	0.00	132.33	141.33	141.99	142.69	0.00	140
317.3	0.00	198.99	202.79	203.81	205.00	0.00	202
371.7	249.44	256.91	255.38	264.02	0.00	0.00	256
398	274.36	283.12	278.43	291.68	0.00	0.00	282



Appendix C.1.3.2 7900

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from power	curve
151.2	71.0	Real	24.04	47.0		
249.9	144.0	Real	24.63	119.4		
317.1	209.0	Real	24.99	184.0		
371.7	261.8	Real	26.18	235.6	273.53	-4%
390	288	Estimated	18.55	269.5	281.23	2%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (3,4)
151.2	0.00	69.94	71.26	71.66	71.20	0.00	71
249.9	0.00	141.10	143.80	145.63	145.61	0.00	144
317.1	0.00	204.63	209.26	211.12	210.81	0.00	209
371.7	0.00	258.55	262.37	262.60	263.73	0.00	262
390	0.00	289.56	283.89	288.58	290.30	0.00	288



Appendix C.1.3.3 7901

Amperage (A)	Max temperature (°C)	Real /Estimated	Begin Temp	ΔT	from power	curve
151.2	63.6	Real	19.21	44.4		
249.9	137.0	Real	23.78	113.2		
317.1	199.8	Real	20.86	179.0		
371.2	255.8	Real	24.62	231.2	264.31	-3%
392	281	Estimated	20.62	260.7	280.62	0%

Amperage (A)	Thermocouple 1	2	3	4	5	6	Average (3,4)
151.2	0.00	61.02	64.36	63.62	65.33	0.00	64
249.9	0.00	131.19	139.02	137.12	140.70	0.00	137
317.1	0.00	191.38	203.62	198.75	205.59	0.00	200
371.2	0.00	246.85	259.26	255.52	261.60	0.00	256
392	0.00	274.39	281.83	282.15	286.72	193.17	281



Appendix C.2 Temperaturen op verschillende dieptes

In dit deel staan de gemaakte tabellen en grafieken van de testen waarbij temperaturen gemeten zijn op verschillende dieptes.

40	/ .
incm	min
TOCILI	/
	,

stroom	1e boven	2e boven	1e midden	2e midden	1e onder	2e onder
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150A	64.2	66.8	65.2	67.3	53.4	53.9
250A	133.0	137.6	136.2	138.2	108.1	108.5
350A	216.2	222.6	222.2	223.9	173.7	173.4

Gemiddeld stroom boven midden onder verschil min en max tussen boven en midden [A] [°C] [°C] [°C] [°C] [°C] 150 65.5 66.2 53.6 12.6 0.7 250 135.3 137.2 108.3 28.9 1.9 350 219.4 223.0 173.5 49.5 3.6



20cm/min

stroom	1e boven	2e boven	1e midden	2e midden	1e onder	2e onder
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150A	46.7	48.1	48.0	48.2	40.2	38.5
250A	95.7	97.8	95.7	97.2	75.7	51.7
350A	145.8	142.0	155.4	158.9	123.7	91.5
450A	227.6	233.7	214.3	217.2	169.5	97.8
500A	270.9	277.7	263.2	265.7	187.4	186.1

Gemiddeld

stroom	boven	midden	onder	verschil min en max	tussen boven en midden
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150	47.4	48.1	40.2	7.9	0.7
250	96.7	96.4	75.7	21.0	0.3
350	143.9	157.2	123.7	33.5	13.3
450	230.6	215.8	169.5	61.2	14.9
500	274.3	264.4	187.4	86.9	9.8



40cm/min

stroom	1e boven	2e boven	1e midden	2e midden	1e onder	2e onder
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150A	42.0	43.3	44.6	40.1	35.2	34.4
250A	78.5	81.8	85.4	74.2	62.2	60.0
350A	126.2	132.6	133.6	117.3	96.6	92.7
450A	176.2	190.1	177.2	154.6	139.0	132.4

Gemmiddeld

stroom	boven	midden	onder	dt tussen min en max	tussen boven en midden
[A]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
150	42.6	42.4	34.8	7.8	0.3
250	80.2	79.8	61.1	19.1	0.4
350	129.4	125.5	94.7	34.7	3.9
450	183.2	165.9	135.7	47.5	17.3



Appendix C.3 Temperaturen bij verschillende diktes

150A							
	top tc	tc1	tc2	tc3	tc4	bottom tc	average 1tm4
33op17	46	59	0	62	60	52	45
33op33	105	80	95	98	32	57	76
17op33	50	57	59	61	57	48	58

250A

	top tc	tc1	tc2	tc3	tc4	bottom tc	average 1tm4
33op17	77	115	120	122	116	98	118
33op33	73	101	107	106	103	69	104
17op33	98	121	124	128	119	96	123

350A

	top tc	tc1	tc2	tc3	tc4	bottom tc	average 1tm4
33op17	122	190	195	196	192	161	193
33op33		160	161	160	159	96	160
17op33	112	186	188	194	187	144	189

400A

Column1	top tc	tc1	tc2	tc3	tc4	bottom tc	average 1tm4
33op17	149	235	237	234	236	196	235
17op33	177	243	245	234	247	178	242
33op33	50	195	195	194	196	114	195

Overzicht met referentie naar lastesten met temperatuur meten in diepte



Appendix C.4 Edge effect bereikte temperaturen

Appendix C.4.1.1 350A constante snelheid

meetlocatie	diepte	meetlocatie	test1	test 2	test 3	4.1	4.2	4.3	5.1	5.2	6	7.1	7.2	gemiddelde	variantie	Delta max
-	mm	mm	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	S^2 [°C]	[°C]
P0	2	75										190	191	191	0.5	
P1	2	100	189	190		192	195	194						192	6.5	6.00
P2	2	125	195	194			199	198	199	199	190			196	11.9	5.00
P3	3.35	150	196	194	194	195	198	195	197		196	199	200	196	4.3	4.00
P4	4 7	175	200	198		201	203	201	203	204	196	204	205	202	83	6.00
D5	4.7	200	200	150		100	203	201	100	200	185	101	102	19/	35.0	1.00
	4.7	200	177		100	100	100	107	155	200	105	151	152	101	01.0	21.00
P6	4.7	247.5	1//		180	196	199	197			196			191	91.2	21.61
P7	4.7	320			194				195	196			194	195	0.9	2.00
P8	3.35	345	189		191									190	1.5	1.76
P9	2	370			198									198	#DIV/0!	0.00
P10	2	395			196									196	#DIV/0!	0.00
P11	2	420					-	-	-	-	-	200	202	201	2.0	





meetlocatie	diepte	meetlocatie	8.1	8.2	8.3	8.4	8.5	8.6	gemiddelde	variantie	Delta max
-	mm	mm	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	S^2 [°C]	[°C]
P0	2	75	232	235				238	235	8.6	5.87
P1	2	100	252	254	244.6	244	247		248	20.5	10.33
P2	2	125	238	243				240	240	6.5	5.10
Р3	3.35	150		242		243	237		241	9.9	6.00
P4	4.7	175	243	244		236	249		243	28.6	13.00
P5	4.7	200	245			242	249		245	12.5	7.00
P6	4.7	247.5				251	246		249	12.5	5.00
P7	4.7	320			239.6	250	242		244	29.7	10.41
P8	3.35	345			237.5			234	236	6.3	3.55
Р9	2	370			243.8			247	245	5.2	3.23
P10	2	395			248.2			250	249	1.6	1.78
P11	2	420						252	252		0.00

Appendix C.4.1.2 400A constante snelheid





meetlocatie	meetlocatie	9.1	9.2	9.3	9.4	gemiddelde	gemiddeld variabel
-	mm	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P0	75	288	287			288	
P1	100	293	292	287		291	296
P2	125	285	287			286	292
Р3	150	280	278			279	288
P4	175	290	293			292	295
P5	200	294	294	291		293	293
P6	247.5			291	297	294	297
P7	320			284	285	285	297
P8	345			280	279	280	284
Р9	370			297	291	294	297
P10	395				308	308	298
P11	420				296	296	290
gemiddeld		288	289	288	293	293	293
verschil min en n	าลx	14	16	17	29	29	14

Appendix C.4.1.3 450A constant snelheid





Appendix C.4.1.4 450A variabele snelheid



(meest rechtse runs zijn de definitieve temperaturen per locatie)

Appendix C.4.1.5 Vergelijken van verschillende stromen en instellingen



Pieken duidelijk afgevlakt bij variabele snelheid







Punten voor powercurve TC locatie 1

Amperage (A)	Max temperature (°C)
450	296.0
466	308.0
500	330.0
540	355.0
577	0



Punten voor powercurve TC locatie 5

450	293.0
466	301.0
500	322.0
540	354.0
581	#REF!



Punten voor powercurve TC locatie 10

450	298.0
466	309.0
500	314.0
540	351.0
605	#REF!

Appendix C.5 Variabele lasinterface

TC tm 400A



Laatste metingen en las bij 540A (590A op laatste gedeelte)

Weld-run 2.2 is gedaan op standaard instellingen ter validatie, duidelijk zichtbaar wat de instellingen doen op het laatste deel.

meetlocatie	meetlocatie	450 2.1	450 2.2	450 2.3	470	520	540
-	mm	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
1	55	292			310		
2	75	314					
3	115	315					
4	165	313			322	368	379
5	217.5	311					
6	247.5	312	314	314			
7	277.5		315	317			
8	330		311	314			
9	380		272	309	322	365	379
10	410		283	311			
11	440		246	278	288		
verschil tussen mi	n en max, TC 1 en 1	1 uitgesloten					
		4	44	8	0	3	0





Appendix D Kwaliteitsresultaten

Appendix D.1 C-scan resultaten

Appendix D.1.1.1

Snelheidslastesten

ST1402-06-WI-001-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation (nlr

1

			Project data					
Proj	ect name/nu	mber	ST1402 LIFTT					
NLR	order numb	er	2048211.2.1					
Cust	omer (exteri	nal)						
Project manager			Joachim De Kruijk / Luuk Straathof					
Auth	nors (min. NE	DI level 2)						
Ope	rator	Dion Bapti	sta	Checked by (min. NDI level 2):				
Insti	ruction no.	ST1402-06-	WI-001-0-DEB (C-scan	Approval by project manager:				
		inspection	composite welded					
<u> </u>		single lap s	shear samples).docx					
Issu	e date	30-01-2020						
Subj	ect	Ultrasonic	C-scan inspection of nine	e welded panels				
	Material / la	y-up / thickr	1ess: CF-PPS/[0,90/±45/±4	5/45/0,90] / 1.6(3.2 mm at weld				
Ë	overlap)/ Sir	igle Lap						
Ğ	Dimensions	(L x W x H) :	600 x 190 mm					
npo	Inspection a	rea: Welding	g area (55 x 190 mm)					
Ite	Use of IRP: -							
=	Remarks:							
:SC	- Dofo	ro start play	asa kaad this work instru	stion corofully				
tior	• Delo	re start, pier	ase reau this work instru	nersion				
ara	• clear	i anu uegre	ase the plates before init	nersion				
ep								
ā								
÷								
Ise	• •	PS Precisio	n clean					
Je I								
to								
sle								
eri								
٨at								
2								

Activities finished:		
Date: -	_	Signature:
Dute.		Signature.
Approved project m	anager (aft	er accomplishment WI):
Date: –	-	Signature:
Approved departme	ent manage	r:
	0	
Date : –	-	Signature:

ST1402-06-WI-001-0-DEB (C-scan inspection composite welded single lap shear samples).docx



AV - Structures Testing & Evaluation

Index Index 2 1 Ultrasonic Inspection 3 Pulse Echo method (PE) 3 2 3 **Immersion Technique** 3 4 Attenuation measurement 3 5 **Reflection measurement** 3 6 Reflector plate method (DTT) 4 7 **Required Qualifications** 4 Equipment 8 4 9 Inspection parameters 5 10 Calibration 5 11 Reporting 5 12 Test results 6

ST1402-06-WI-001-0-DEB (C-scan inspection composite welded single lap shear samples).docx

AV - Structures Testing & Evaluation



1 Ultrasonic Inspection

Ultrasonic inspection (conventional) is a primary technique for the inspection of composite and metal aircraft components. The technique makes use of high-frequency sound waves that are introduced into the material of interest. Because air is not an adequate transmitting medium for ultrasonic waves, a coupling medium such as water or gel has to be used between the transducer and the material. At interfaces of different materials a part of the sound beam is reflected and the other part is transmitted into the material. The reflection and transmission signals can be displayed and analysed on a scope. Depending on the material condition attenuation of the sound beam due to the microstructure or local defects can occur. The time difference between reflected signals gives information about the "defect" depth in the material.

2 Pulse Echo method (PE)

One transducer acts both as transmitter and receiver.

With this method the ultrasonic signal transmits the full specimen thickness twice. When a defect is present in the material (most cases) there will be a reduction of the backwall amplitude.



3 Immersion Technique

The test specimen is herewith totally immersed in water. The water provides a good and constant coupling between transducer and the test specimen. This technique provides the highest sensitivity of inspection because of the possibility of applying focused transducers.

4 Attenuation measurement

Hereby the amplitude differences of the transmitted signal are monitored and an electronic gate is positioned on this signal. Attenuation measurements can be performed during pulse echo-, reflector plate- and through transmission methods.

5 Reflection measurement

Hereby the amplitude of the reflected signal(s) is monitored. The electronic gate is placed between the front reflection (FR) and the backwall reflection (BR). At areas of sound material there are only some "noise" signals but no relevant reflection signals within the gate. When a defect is present in the material there will be a clear reflection peak, which triggers the gate. The reflection measurements are less suitable to determine the overall quality of the material but give good results for local defect detection, characterisation and sizing.



AV - Structures Testing & Evaluation

6 Reflector plate method (DTT)

One transducer acts both as transmitter and receiver. Behind the specimen of interest a glass plate is positioned. The reflection signal received from the glass plate can be clearly separated from the signals of the specimen. This results in an easier set-up and transducer optimisation. With this method a double through transmission of the ultrasound beam is established. This results in a full coverage throughout the thickness of the specimen, including flaws close to the front or back surface.



7 Required Qualifications

The inspector performing the ultrasonic examination prescribed in this procedure shall be qualified and certified at least to level 2 in the discipline Ultrasonic Testing. The certification must be in accordance to at least one of the following: EN 4179 / NAS-410 / EN473; or conforms to the guidelines of ASNT Recommended practice SNT-TC-1A; or applicable customer requirements.

8 Equipment

Equipment	Number
Ultrasonic Sciences Ltd. C-scan system	S 618/1
USL Scanner	4.46
Transducer	
Ultrasonic Transducer	Imasonic IM-5-19-F76 (S/N: 2753 0101)

ST1402-06-WI-001-0-DEB (C-scan inspection composite welded single lap shear samples).docx

4



AV - Structures Testing & Evaluation

9 Inspection parameters

	Settings
Frequency	5 MHz
Focus distance	76 mm
Focus target	RP
Index	1 mm
Scan size	615 x 55 mm
Scan speed	250 mm/s

10 Calibration

Settings were adjusted on the best area of the specimen.

No rejection or acceptance criteria are defined. Therefore the test results are relative. The logarithmic dB scale (0dB, -3dB, -6dB, -12dB and -20dB) shows the relation of signal amplitude and corresponding colours.

11 Reporting

C-scan results shall be reported with the specimen number in chapter test results of this work instruction.

The following inspection results shall be supplied:

- Ultrasonic settings
- Colour palette
- A 16 coloured attenuation C-scan of the welded section
- A 16 coloured reflection C-scan of the welded section
- A 16 coloured attenuation C-scan of the skins
- A 16 coloured reflection C-scan of the skins
- Time of Flight C-scan

nlr

ST1402-06-WI-001-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation

12 Test results

Utrasonics				×
Pre Amp Gain Mode Demping Pulse Width Pulse Voltage PRF / Slot Amplifier Transmitter Receiver	10dB Pulse Echo 200R 350 400V 335 Rectified Right Right	Fibers Low Pass Type Low Pass Range 10 NHz Centre 5.00 MHz Cur Off 0.5 MHz Linear Gain Gain 6.0 dB Rectifier Full Wave Ervelope 100 %	DAC Off Mode Off Trigger Interface Blanking 18.0 µs Tracehold 28% Delay Gain 0.00 0.00 1.27 3.00 0.00 37.00 0.00 37.00 0.00 4.80	Amplitude Gate Reflector plate Mode Interface Delay 5.27 µs Wrdth 5.70 µs Threshold 10 TOF Mode Off

Ultrasonic settings welded section (RP signal set to 70% FSH)

Ultrasonics			×
Pre Amp Gain 10dB Node Pulse Echo Demping 200R Pulse Voltage 400V PRF / Slot 335 Amplifier Rectified Transmitter Right Receiver Right	Fillers Type Low Pass Range 10 MHz Centre 2.14 MHz Cut Off 0.5 MHz Linear 6cin Gein 5.0 dB Renshifter Full Wave Envelope 100 %	CAC Mode Off Trigger Main Bang Delay 0.0 µs Threshold 0% Delay Gain ↑ 2.00 50.00 3.00 0.00 3.00 0.00 3.00 0.00 3.00 0.00 3.00 0.00	Amplitude Gate Interface ▼ Mode Main Bang Delay 90.01 µs Width 5.71 µs Threshod 20 TOF Mode Off

Ultrasonic settings skins (RP signal set to 70% FSH)

Palete No. 1 0100% -100% -00% Entries 15 - 80% -50% -40% Scale Type 100% FSH 72% -70% -66% -70% Graph Type Total 57% -60% -50% -60% -70% Mode Stop 25% -30% -60% -00% -70% StepSize 53% 19% -70% -60dB -	Last				×
Amplitude Thickness Palette No. 1 • 0100% -00% -00% All • All • Scale Type 100% FSH • 60% -70% • Make it so Thresholds • Thresholds • 00% • • 00% • • 00% • 0% 0% 0% 0% 0	🍺 🖼 💹 🗆	>			
Palete No. 1 • 0100% -100% • Copy to Entries 16 • 90% -90% -90% -90% -80% -90% -80% -90% -80% -90% -80% -90	Amplitude Thickne	ss			
Top Leve 77.0 %	Palette No. Entries Scale Type Graph Type Style Mode StepSize Top Leve	1 ▼ 15 ▼ 100% FSH ▼ Total ▼ Blended ▼ Stop ▼ 53 % ÷ 70.0 %	0100% 80% 72% 65% 57% 48% 40% 25% 25% 13% 13% 13% 13% 84% 50%	100% -90% -80% -70% -60% -50% -40% -30% -20% -10% -0%	Copy to All Make it so Thresholds Off 100% • 6.0dB •

16 colour palette



Last		×
D 🖶 🔛 🖉 D		
Amplitude Thickness		
Mode	Linear -5.00	
StepSize	1.0 mm +	
Range	5.0 mm 🔺	
Minimum	0.0 mm ·3.00	
Entries	16 - 2.00	
	1.00	
	0.00	

16 colour TOF palette



7873 Attenuation C-scan of the welded section



7873 Reflection C-scan of the welded section



7873 Attenuation C-scan of the skins

File Zoom Tools Films Web	ma Ciacinostica		26				
Backwal gate Refection gate	Reflector plate Public Echo Right TC	ori Swates [flat dow] Rears					
		anti-contribute	and subscript.	CHRISTIN THE LAND	-	1000-004	

7873 Reflection C-scan of the skins

7071 Profile	felama - Cianananea					×
	- A + 1	0 B & & B & B - # X	<u>.</u>			
Lieckwall gato Indication gate	Horisotor plate Jave Echo Right R	FT BWakes Het size H*size				
Contraction of the second s				A STANDAR A	and the second second	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·



7893 Attenuation C-scan of the welded section



7893 Reflection C-scan of the welded section



7893 Attenuation C-scan of the skins

7003 Prefile	Name Branches					×
Eauk volligate Pelleuturigate	다 김 수 옷 () 티 옷 이 태 /	A 🖟 🕐 🥭 🕼 🖉 🖉 🗮 🔛				
		anter ande	Manual Conte	Second and Committee	and the second second	
		0.7.7.8.93				<u>.</u>

7893 Reflection C-scan of the skins





7894 Attenuation C-scan of the welded section



7894 Reflection C-scan of the welded section



7894 Attenuation C-scan of the skins

7894 Prefile File Zeom Tools Print 1	et wans Denoted	0
Eesknelligste Pelleuturgete	Han AL O N C) 181 00, 00 mil A Q N	
		and management
200		

7894 Reflection C-scan of the skins





7895 Attenuation C-scan of the welded section



7895 Reflection C-scan of the welded section



7895 Attenuation C-scan of the skins

7005 PreFile File Zeom Tools Print	Volume Diagnostics					
1 E 12	- 4 0 × 0 1 4 0 M A	B 18 8 8 8 8 8 2				
Eauk wall gate Peter Junga	ate Reletion vide Pabe Edito Tigle TOF 81% date Rel. and	R ^o shia				
		Menaliza conserva-	The second second	Martin and	COMPACTION OF STATE	
			TALENCE THE MERICENCE IN DRIVING HER	and we have a second or a second s		100

7895 Reflection C-scan of the skins





AV - Structures Testing & Evaluation



7896 Attenuation C-scan of the welded section



7896 Reflection C-scan of the welded section



7896 Attenuation C-scan of the skins

7005 Prefilio Féla Zeom Tools Print	t vouma Dagnetica					
単田牧	いま ら水ら 日 を発展	A 🗉 🖓 🥵 🖅 🐂 🚢				
Beskmelligete Pelleutur	rade Rolbum Jolo, Paloo Edito Figlic TOP." 819 Ales - Hollow	12 R ^o stia				
	Antendersteine Konscrager	and an and and	-	CARLE CARLON CAR	and Paperson and	

7896 Reflection C-scan of the skins









7897 Reflection C-scan of the welded section



7897 Attenuation C-scan of the skins

7007 Prefile File Zeom Tooti Print	Vouma Dagnotto:					>
Eauk valluste Pelleuturge	e Releare date : Pade Edito Tigle TOF 817 date : Reliato	A B N B X X N B B B R sta				
	uthraney (an anney	-	CONVERSION	- Transaulasia	a thatas constration	
	3,2020,349,22					a,

7897 Reflection C-scan of the skins





AV - Structures Testing & Evaluation



7898 Attenuation C-scan of the welded section



7898 Reflection C-scan of the welded section



7898 Attenuation C-scan of the skins

7008 PreFile						
File Zeom Tooli Prin	t Volume Degratitat					
1 E 12	- <u>A</u> ¢ <u>%</u> 0 <u></u> EQQ	A 🗈 🙀 🖉 🖉 🖉 🖊 🐂 🚨				
Eauk-rall sale Pellouiu	ade Rolouwulato, Paleo Euro Role TOF 817 Ales - Hollow	11 R ^o skin				
	A DE LE STREET AND A DE LE STREET	California California California		The true and		i i i
	MARCHINE AN ADDRESS	CANTRA OF THE A	all share shalls	Stor - North Constant	and a state of the second second	
1 1 1 1 1 1 1			The stand de la contraction de la	the second second second	Contraction of the second s	1
1000000						

7898 Reflection C-scan of the skins





7899 Attenuation C-scan of the welded section



7899 Reflection C-scan of the welded section



7899 Attenuation C-scan of the skins

7899 P ulle File Zeom Tools Print Yolame Diagnestic	5					×
■ 8 %	₩40%08000	A 🕼 🚧 🥵 🖓 🖉 🐱 🛄				
Endowlight Belle in gete Belle in ide 2	der 5. in 3gle 2051 819 dan 19953	Association				
-		"Back of which backs"	-	-	symmetry and and the	

7899 Reflection C-scan of the skins



(快)								
par Telecompar (Telesta class Price Fran Rytz TCF 1 Sol stars Ref. stars SP stars							
	N N N N N N N N N N N N N N N N N N N							- 17
à	and the second sec	Sec. 19	1 1 1					•
-	the second s	side a state of the second		-			Notes and the second second	
See. 1	Manufacture and a statement of the second statement of	AND A REAL PROPERTY	SALVING BEING	Carl of the A	Sector Cont		A DE LA DELAND	
								1.1
						+ 4	1	
								×

7901 Attenuation C-scan of the welded section



7901 Reflection C-scan of the welded section



7901 Attenuation C-scan of the skins

7901 P offic Companie was fire Power Tank Power	ded single lappro Volume - Dispussions			×
	**************************************	ि <mark>(</mark> क∰)ल × ≝		
THE CHICKLE IN THE CHICK OF	fan i verenstene i kone nos inde (ord) i sovere i verens	-la sul		-
1.1				

7901 Reflection C-scan of the skins



7901 TOF

Appendix D.1.1.2

Edge-effect las

ST1402-06-WI-002-0-DEB



AV - Structures Testing & Evaluation

Project data								
Project name/number		ST1402 LIFTT						
NLR order number		2048211.2.1						
Cust	tomer (extern	nal)						
Proj	ect manager		Joachim De Kruijk / Luu	Joachim De Kruijk / Luuk Straathof				
Auth	hors (min. NE)I level 2)						
Operator Dion Baptis		sta	Checked by (min. NDI level 2):					
Inst	ruction no.	ST1402-06-	WI-002-0-DEB (C-scan	Approval by project manager:				
		inspection	composite welded					
		shear sam	ple 8056).docx					
Issu	e date	02-03-2020						
Subj	iect	Ultrasonic	C-scan inspection of wel	ded panel 8056				
	Material / la	y-up / thickr	ness: CF-PPS/[0,90/±45/±4	45/45/0,90] / 1.6(3.2 mm at weld				
Ë	overlap)/ Sin	igle Lap						
cti	Dimensions	(L x W x H) :	500 x 110 mm					
npo	nspection area: Welding area (515 x 110 mm)							
Ite	Use of IRP: -	se of IRP: -						
=	Remarks:							
is:	- Dofo	vo stavt pla	aaa waad thia waxk inatw					
tior	• Belo	re start, pied	ase read this work instru	mersion				
ara	• clear	i anu uegre	ase the plates before in					
ep								
4								
÷								
Ise	• I	PS Precision	n clean					
Je (
to								
als								
eri								
Mat								
_								

Activities finished:							
Date	Signature						
Dute.	Sibilitatic.						
Approved project manager (after accomplishment WI):							
Date: – –	Signature:						
Approved department manager:							
Date : – –	Signature:						

ST1402-06-WI-002-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8056).docx

1



AV - Structures Testing & Evaluation

Index Index 2 1 Ultrasonic Inspection 3 Pulse Echo method (PE) 3 2 3 **Immersion Technique** 3 4 Attenuation measurement 3 5 **Reflection measurement** 3 6 Reflector plate method (DTT) 4 7 **Required Qualifications** 4 Equipment 8 4 9 Inspection parameters 5 10 Calibration 5 11 Reporting 5 12 Test results 6

AV - Structures Testing & Evaluation



1 Ultrasonic Inspection

Ultrasonic inspection (conventional) is a primary technique for the inspection of composite and metal aircraft components. The technique makes use of high-frequency sound waves that are introduced into the material of interest. Because air is not an adequate transmitting medium for ultrasonic waves, a coupling medium such as water or gel has to be used between the transducer and the material. At interfaces of different materials a part of the sound beam is reflected and the other part is transmitted into the material. The reflection and transmission signals can be displayed and analysed on a scope. Depending on the material condition attenuation of the sound beam due to the microstructure or local defects can occur. The time difference between reflected signals gives information about the "defect" depth in the material.

2 Pulse Echo method (PE)

One transducer acts both as transmitter and receiver.

With this method the ultrasonic signal transmits the full specimen thickness twice. When a defect is present in the material (most cases) there will be a reduction of the backwall amplitude.



3 Immersion Technique

The test specimen is herewith totally immersed in water. The water provides a good and constant coupling between transducer and the test specimen. This technique provides the highest sensitivity of inspection because of the possibility of applying focused transducers.

4 Attenuation measurement

Hereby the amplitude differences of the transmitted signal are monitored and an electronic gate is positioned on this signal. Attenuation measurements can be performed during pulse echo-, reflector plate- and through transmission methods.

5 Reflection measurement

Hereby the amplitude of the reflected signal(s) is monitored. The electronic gate is placed between the front reflection (FR) and the backwall reflection (BR). At areas of sound material there are only some "noise" signals but no relevant reflection signals within the gate. When a defect is present in the material there will be a clear reflection peak, which triggers the gate. The reflection measurements are less suitable to determine the overall quality of the material but give good results for local defect detection, characterisation and sizing.


AV - Structures Testing & Evaluation

6 Reflector plate method (DTT)

One transducer acts both as transmitter and receiver. Behind the specimen of interest a glass plate is positioned. The reflection signal received from the glass plate can be clearly separated from the signals of the specimen. This results in an easier set-up and transducer optimisation. With this method a double through transmission of the ultrasound beam is established. This results in a full coverage throughout the thickness of the specimen, including flaws close to the front or back surface.



7 Required Qualifications

The inspector performing the ultrasonic examination prescribed in this procedure shall be qualified and certified at least to level 2 in the discipline Ultrasonic Testing. The certification must be in accordance to at least one of the following: EN 4179 / NAS-410 / EN473; or conforms to the guidelines of ASNT Recommended practice SNT-TC-1A; or applicable customer requirements.

8 Equipment

Equipment	Number
Ultrasonic Sciences Ltd. C-scan system	S 618/1
USL Scanner	4.46
Transducer	
Ultrasonic Transducer	Imasonic IM-5-19-F76 (S/N: 2753 0101)



AV - Structures Testing & Evaluation

9 Inspection parameters

	Settings
Frequency	5 MHz
Focus distance	76 mm
Focus target	RP
Index	1 mm
Scan size	515 x 110 mm
Scan speed	200 mm/s

10 Calibration

Settings were adjusted on the best area of the specimen.

No rejection or acceptance criteria are defined. Therefore the test results are relative. The logarithmic dB scale (0dB, -3dB, -6dB, -12dB and -20dB) shows the relation of signal amplitude and corresponding colours.

11 Reporting

C-scan results shall be reported with the specimen number in chapter test results of this work instruction.

The following inspection results shall be supplied:

- Ultrasonic settings
- Colour palette
- A 16 coloured attenuation C-scan of the welded section
- A 16 coloured reflection C-scan of the welded section
- A 16 coloured attenuation C-scan of the skins
- A 16 coloured reflection C-scan of the skins
- Time of Flight C-scan

nir

ST1402-06-WI-002-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation

12 Test results

Pre Amp Filters Type Low Pass Mode Off Amplitude Mode Pulse Echo Pulse Voltage 200R Centre 5.00 MHz Danking 18.0 μs Pulse Voltage 400V Cur Off 0.5 MHz Delay Gain Amplitude Delay Gain Node PRF / Slot 335 Circear Dott Dott Dott Threshold
Amplifier Rectified Rectifier Full Wave 1.27 3.00 1.27 3.00 Image: Amplifier Rectifier Full Wave 0.00 28.80 0.00 37.00 0.00 37.00 0.00 44.80 0.00 44.80 0.00 44.80 0.00 44.80 0.00 0.00 44.80 0.00

Ultrasonic settings welded section

Ultrasonics			×
Pre Amp Gain ¹ 0dB Mode ¹ Fulse E.chc Danping 200R Pulse Width 550 Pulse Voltage 400V PRF / Slot 335	Filtes Type Low Pass Range 10 MHz Centre 2.14 MHz Cut Off 0.5 MHz Linear Gair	DAC Mode Olf Trigger Main Bang Delay 0.3 μs Threshold Uix Delay Gain 0.0 50.00 0.0 0.00	Amplitude Gate Interface ▼ Mode Main Bang Delay 87.96 µs Width 93.4 µs Threshold 20 TOF Mode Off
Amplifier Fectified Transmitter Fight Neceiver Fight	Recifier Ful Wave Envelope 100 %	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	

Ultrasonic settings skins

Amplitude Thickness	
Palette No. 1 ▼ 100% 100% 90% 40% Entries 16 ▼ 80% 90% 40% 40% Scale Type 100% FSH ▼ 90% 40% 60% 60% Style Flended ▼ 90% 40% 60% 100% 100% 10% Mcde Step 53% 94% 30% 10% 100% 10% 10% 10%	

16 colour palette

ST1402-06-WI-002-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8056).docx

AV - Structures Testing & Evaluation



Last				>
D 🖬 🔛 🔟 D				
Amplitude Thickness				
Mode	Linear	•	9.00	
StepSize	1.0 mm	*	·8.00	
Range	9.5 mm	*	-7.00	
Minimum	0.0 mm	•	-5.00	
Entries	16	* *	4.00	
			-3.00	
			-2.00	
			-1.00	
			0.00	

16 colour TOF palette

ST1402-06-WI-002-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8056).docx

7

ST1402-06-WI-002-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation





8056 Attenuation C-scan of the welded section



8056 Reflection C-scan of the welded section



8056 Attenuation C-scan of the skins



8056 Reflection C-scan of the skins

ST1402-06-WI-002-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8056).docx

ST1402-06-WI-002-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation





Appendix D.1.1.3 Variabele interface

ST1402-06-WI-003-0-DEB



AV - Structures Testing & Evaluation

Project data					
Project name/number ST140		ST1402 LIFTT			
NLR	order numb	er	2048211.2.1		
Cust	omer (exteri	nal)			
Proj	ect manager		Joachim De Kruijk / Luu	k Straathof	
Auth	nors (min. NL)I level 2)			
Ope	rator	Dion Bapti	sta	Checked by (min. NDI level 2):	
Inst	ruction no.	ST1402-06-	WI-003-0-DEB (C-scan	Approval by project manager:	
		inspection	composite welded		
		shear sam	ple 8044).docx		
Issu	e date	10-03-2020			
Subj	ect	Ultrasonic	C-scan inspection of wel	ded panel 8044	
	Material / la	y-up / thickr	ness: PEKK panel		
ion	Dimensions	(L x W x H) :	500 x 190 mm		
nct	Inspection area: Welding area (515 x 110 mm)				
po	Use of IRP: -				
LT I	Remarks:				
::					
ion	Before start, please read this work instruction carefully.				
rat	Clean and degrease the plates before immersion				
spa					
Pre	Provide a second se				
sed	• LPS Precision clean				
n a					
å	o be				
s to	s to				
rial					
ate					
Σ					

Activities finishe	d:		
Date:	-	-	Signature:

Approved project manager (after accomplishment WI):						
Date:	-	-	Signature:			

Approved department manager:

Date :	-	-	Signature:

ST1402-06-WI-003-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8044).docx

1

AV - Structures Testing & Evaluation



Index 2 Index Ultrasonic Inspection 3 1 2 Pulse Echo method (PE) 3 3 Immersion Technique 3 4 Attenuation measurement 3 5 **Reflection measurement** 3 6 Reflector plate method (DTT) 4 7 **Required Qualifications** 4 Equipment 8 4 9 Inspection parameters 5 10 Calibration 5 11 Reporting 5 12 Test results 6

ST1402-06-WI-003-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8044).docx

AV - Structures Testing & Evaluation



1 Ultrasonic Inspection

Ultrasonic inspection (conventional) is a primary technique for the inspection of composite and metal aircraft components. The technique makes use of high-frequency sound waves that are introduced into the material of interest. Because air is not an adequate transmitting medium for ultrasonic waves, a coupling medium such as water or gel has to be used between the transducer and the material. At interfaces of different materials a part of the sound beam is reflected and the other part is transmitted into the material. The reflection and transmission signals can be displayed and analysed on a scope. Depending on the material condition attenuation of the sound beam due to the microstructure or local defects can occur. The time difference between reflected signals gives information about the "defect" depth in the material.

2 Pulse Echo method (PE)

One transducer acts both as transmitter and receiver.

With this method the ultrasonic signal transmits the full specimen thickness twice. When a defect is present in the material (most cases) there will be a reduction of the backwall amplitude.



3 Immersion Technique

The test specimen is herewith totally immersed in water. The water provides a good and constant coupling between transducer and the test specimen. This technique provides the highest sensitivity of inspection because of the possibility of applying focused transducers.

4 Attenuation measurement

Hereby the amplitude differences of the transmitted signal are monitored and an electronic gate is positioned on this signal. Attenuation measurements can be performed during pulse echo-, reflector plate- and through transmission methods.

5 Reflection measurement

Hereby the amplitude of the reflected signal(s) is monitored. The electronic gate is placed between the front reflection (FR) and the backwall reflection (BR). At areas of sound material there are only some "noise" signals but no relevant reflection signals within the gate. When a defect is present in the material there will be a clear reflection peak, which triggers the gate. The reflection measurements are less suitable to determine the overall quality of the material but give good results for local defect detection, characterisation and sizing.



AV - Structures Testing & Evaluation

6 Reflector plate method (DTT)

One transducer acts both as transmitter and receiver. Behind the specimen of interest a glass plate is positioned. The reflection signal received from the glass plate can be clearly separated from the signals of the specimen. This results in an easier set-up and transducer optimisation. With this method a double through transmission of the ultrasound beam is established. This results in a full coverage throughout the thickness of the specimen, including flaws close to the front or back surface.



7 Required Qualifications

The inspector performing the ultrasonic examination prescribed in this procedure shall be qualified and certified at least to level 2 in the discipline Ultrasonic Testing. The certification must be in accordance to at least one of the following: EN 4179 / NAS-410 / EN473; or conforms to the guidelines of ASNT Recommended practice SNT-TC-1A; or applicable customer requirements.

8 Equipment

Equipment	Number
Ultrasonic Sciences Ltd. C-scan system	S 618/1
USL Scanner	4.46
Transducer	
Ultrasonic Transducer	Imasonic IM-5-19-F76 (S/N: 2753 0101)



AV - Structures Testing & Evaluation

9 Inspection parameters

	Settings
Frequency	5 MHz
Focus distance	76 mm
Focus target	RP
Index	1 mm
Scan size	515 x 110 mm
Scan speed	200 mm/s

10 Calibration

Settings were adjusted on the best area of the specimen.

No rejection or acceptance criteria are defined. Therefore the test results are relative. The logarithmic dB scale (0dB, -3dB, -6dB, -12dB and -20dB) shows the relation of signal amplitude and corresponding colours.

11 Reporting

C-scan results shall be reported with the specimen number in chapter test results of this work instruction.

The following inspection results shall be supplied:

- Ultrasonic settings
- Colour palette
- A 16 coloured attenuation C-scan of the welded section
- A 16 coloured reflection C-scan of the welded section
- A 16 coloured attenuation C-scan of the skins
- A 16 coloured reflection C-scan of the skins
- Time of Flight C-scan

nlı

ST1402-06-WI-003-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation

12 Test results

Ultrasonics	×
Pre Amp Gain *0dB Mode Fulse Echc Damping 200R Pulse Width 550 Pulse Voltage 400V PRF / Slot 335 Amplifier Fectified Transmitter Fight	DAC Off Gate Backwall gate ✓ Tigger Inreface Mode Interface Mode Interface Mode Interface Blanking 18.0 µs Delay 4.31 µs Vidth 0.63 µs Delay Gate 10 Threshold 10 TOF Mode Threshold 10 0.00 0.00 0.00 0.00 Threshold 10 TOF Mode TOF Mode Rising Edge 0.00 </td

Ultrasonic settings welded section

Ultrasonics			×
Pre Amp Gain Fulse Echc Damping 200R Pulse Width 550 Pulse Voltage 400V PRF / Slot 335	Filters Type Low Pass Range 10 MHz Centre 2.14 MHz Cut 0ff 0.5 MHz Linear Gair	DAC Mode Off Trigger Main Bang Delay 0.3 μs Threshold 0% Delay Gain 0.0 5000 η rn η ηη	Amplitude Gate Interface ▼ Mode Main Bang Delay (87.96 µs Width 8.07 µs Threshold 20 TOF Mode Off
Amplifier Fectified Transmitter Fight Receiver Fight	Recifier Ful Wave Envelope 100 %	0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00	

Ultrasonic settings skins



16 colour palette

ST1402-06-WI-003-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8044).docx

AV - Structures Testing & Evaluation



Last				×
D 🕒 🖳 🖉 D				
Amplitude Thickness				
Mode StepSize Range Vinigurg	Linear 1.0 mm 9.5 mm	• • •	9.00 8.00 7.00 6.00	
Entries	16	• • •	-3.00 4.00 3.00	
			2.00 1.00 0.00	

16 colour TOF palette

ST1402-06-WI-003-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8044).docx

7

ST1402-06-WI-003-0-DEB AV - Structures Testing & Evaluation





8044 Attenuation C-scan of the welded section



8044 Reflection C-scan of the welded section



8044 Attenuation C-scan of the skins



8044 Reflection C-scan of the skins



TOF

ST1402-06-WI-003-0-DEB (C-scan inspection composite welded shear sample 8044).docx

Appendix D.2 Microscopie foto's

Appendix D.2.1 Snelheidslastesten



7898 30cm/min



7900 40cm/min

Appendix D.2.2 Edge effect las



Invloed thermokoppels in lasinterface

De volgende microscopiefoto bestaat uit twee delen, in het preparaat past slechts 45mm. Door de twee afbeeldingen naast elkaar te leggen kan de hele scarf achtige stap geanalyseerd worden (zoals in het rapport)





Deel 2 in lengterichting las

Appendix D.3 Trektestresultaten

monster		breedte	overlap	load	oppervlakte	shear frank	gemiddeld
		mm	mm	kn	mm2	тра	mpa
7895	1	25.41	14.3	8.16	363.36	22.46	
	2	25.44	14	7.04	356.16	19.77	
	3	25.38	14	6.19	355.32	17.42	
	4	25.38	14.1	6.91	357.86	19.31	
	5	25.41	14.1	6.55	358.28	18.28	19.45
7896	1	25.37	14.9	7.83	378.01	20.71	
	2	25.46	14.8	7.06	376.81	18.74	
	3	25.42	14.5	7.52	368.59	20.40	
	4	25.44	15	5.96	381.60	15.62	
	5	25.4	14.7	8.21	373.38	21.99	19.49
7897	1	25.36	14.2	6.37	360.11	17.69	
	2	25.4	14.3	6.65	363.22	18.31	
	3	25.43	14.2	7.07	361.11	19.58	
	4	25.42	14.6	6.99	371.13	18.83	
	5	25.46	14.1	6.26	358.99	17.44	18.37
7898	1	25.41	14.4	6.44	365.90	17.60	
	2	25.43	14.4	6.91	366.19	18.87	
	3	25.37	14.4	8.5	365.33	23.27	
	4	25.4	14.2	6.15	360.68	17.05	
	5	25.4	14.3	5.65	363.22	15.56	18.47
7900	1	25.43	14.8	6.44	376.36	17.11	
	2	25.42	14.8	7.25	376.22	19.27	
	3	25.32	14.7	6.27	372.20	16.85	
	4	25.35	14.7	6.58	372.65	17.66	
	5	25.4	14.1	6.19	358.14	17.28	17.63







Appendix E Overige

Appendix E.1 Thermokoppel fabricage methode

Deze bijlage beschrijft de methode voor het produceren van thermokoppels voor het inductielassen.

Type thermokoppel: Type E 32AWG PFA isolated and twisted.

Draden strippen ±4cm, draden laten kruisen en lassen op ±3cm zie onderstaande afbeelding:









PI tape blote draden isoleren met PI tape (kapton)



PTFE gecoat glasvezelversterkt tape aanbrengen (0.075mm dikte). Let hierbij op dat het contactpunt (meetpunt) van de draden op 12,7mm ligt voor de lassen met 25.4mm overlap.

Op de foto lijkt het niet helemaal te kloppen doordat deze zich niet recht boven de meetlocatie bevindt.



PTFE tape dichtvouwen en afkippen.



Thermokoppels plaatsen met behulp van een template zoals in onderstaande afbeelding. Bij maken van meerdere gelijke lassen verbetert dit de consistentie.



Appendix E.2 Afbeeldingen

Appendix E.2.1 Warmte in diepte







Appendix E.2.2 Edge effect test



















Appendix E.2.3 Variabele lasinterface




Appendix F Bijlagen

Appendix F.1 Bijlage 1 Door de SLB-er getekende SLBverklaring

3/12/2020

E-mail - andre wels - Outlook



Appendix F.2 Bijlage 2 Definitief Plan van Aanpak

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY - NLR



Inductielassen van thermoplastische composieten met een variabele dikte

Plan van Aanpak

Wels, Andre 11/28/2019

Dit plan van aanpak is gemaakt door HAN Automotive student Andre Wels en is geschreven voor het project "induction welding of thermoplastic composites".

	edicated to	innovation	in aerospace
--	-------------	------------	--------------



Contents

L	ijst met	figuren	2
L	ijst met	tabellen	2
Т	abel me	et afkortingen	2
1	. Inle	iding	3
	1.1.	Aanleiding	3
	1.2.	Probleemstelling	3
	1.3.	Doel van het project	3
	1.4.	Hoofd en deel vragen	3
2	2. Min	d map, scope en grenzen	5
	2.1.	Mind map	5
	2.2.	Scope	5
	Tak	en:	5
	Te l	everen producten:	6
	2.3.	Afbakening	6
Э	B. Proj	ject fasering	7
	3.1.	Definiëren	7
	3.2.	Measure	7
	3.3.	Analyse	7
	3.4.	Design	7
	3.5.	Verify	7
4	I. Proj	ject structuur	8
	4.1.	Project structuur	8
	4.2.	Work breakdown structure	9
5	5. Risi	co analyse	10
e	6. Kos	ten en baten	11
	6.1.	Stakeholders analyse	11
	6.2.	RACI	12
7	. Proj	jectmonitor	13
	7.1.	Deadlines	13
	7.2.	Gantt chart	14
8	8. Bibl	iography	15





Lijst met figuren

Figure 1 Mindmap	5
Figure 2 Project breakdown structure	8
Figure 3 Work breakdown structure	9

Lijst met tabellen

Table 1 Tabel met afkortingen	2
Table 2 Stakeholders analyze tabel	12
Table 3 RACI tabel	12
Table 4 Gantt chart	14

Tabel met afkortingen

NLR	Nederlands lucht en Ruimtevaartcentrum
UD	Uni-directioneel
РЕКК	Polyetheretherketonketon
PEEK	Polyetheretherketon
PPS	Polyphenyleensulfide
DMADV	Define Measure Analyze Design Verify

Table 1 Tabel met afkortingen





1. Inleiding

1.1.Aanleiding

NLR kort voor, Nederlands Lucht en Ruimtevaartcentrum staat voor duurzaamheid, ontwikkeling, efficiëntie en veiligheid binnen voornamelijk de vliegtuig- en ruimtevaartindustrie. NLR komt met oplossingen en nieuwe technieken voor verschillende Europese projecten en diverse opdrachtgevers.

Vliegtuigen worden vandaag de dag voor een groot deel van composieten gemaakt. In de laatste generatie passagiersvliegtuigen zoals de Airbus A350 XWB en de Boeing 787, bestaat meer dan de helft van het gewicht uit composieten (Queen, 2017). Thermoplasten zijn in opkomst in combinatie met carbon weefsels dan wel uni-directionele vezels om de thermohard plastics te vervangen. Thermoplasten hebben volgens Compositeworld (Gardiner, 2019) een goede schade tolerantie, vocht en chemische resistentie en degraderen niet in warme of vochtige condities. Door het opnieuw smelten van het plastic, kunnen reparaties uitgevoerd worden en is het materiaal beter recyclebaar. Een ander groot voordeel van het kunnen smelten van de materialen is de mogelijkheid om ze te kunnen lassen waardoor er nieuwe aantrekkelijke methodes als alternatief op de conventionele verbindtechnieken mogelijk zijn. De bout, klink en lijm-verbindingen kunnen hierdoor vervangen worden door lasverbindingen wat verschillende voordelen kan bieden. Een aantal voorbeelden van lastechnieken zijn: ultrasoon lassen, laser lassen, weerstand lassen en inductielassen (Gardiner, 2018), hiervan worden de laatste twee bij NLR onderzocht en is het inductielassen deel van dit project.

1.2.Probleemstelling

Inductielassen van thermoplastische composieten is een relatief nieuwe techniek waarvan veel gegevens of parameters nog niet zijn vastgelegd. Een van de redenen hiervan is dat sommige composieten een variabele dikte bevatten. Binnen NLR is nog geen onderzoek gedaan naar het lassen van variabele dikte terwijl er recent wel vraag is naar kennis over variabele diktes binnen verschillende projecten.

1.3. Doel van het project

Het doel van dit project is het bedenken van een methode om thermoplastische composieten met een variabele dikte te kunnen lassen. Om composieten met variabele dikte te kunnen lassen zullen er verschillende lassen moeten worden uitgevoerd om data te vergaren. Met de opgedane kennis en vergaarde data kunnen lasparameters vastgesteld worden om een composiet met variabele dikte te kunnen lassen.

1.4.Hoofd en deel vragen

De hoofdvraag van dit project is:

- Wat is de beste manier om thermoplastische composieten met variabele dikte met behulp van inductielassen aan elkaar te verbinden?





Om de hoofdvraag te kunnen beantwoorden moeten meerdere deelvragen beantwoord worden:

- Wat is inductielassen van thermoplastische composieten?
- Wat zijn de voorwaarden om thermoplastische composieten goed te kunnen lassen?
- Wat is de invloed van verschillende soorten laminaten in het lasproces?
- Wat is de invloed van de dikte op het lasproces?
- Welke parameters kunnen variabel geprogrammeerd worden in het lasproces?
- Kan er wiskundig voorspeld al dan niet benaderd worden welke variabele parameters van toepassing zouden moeten zijn?
- Wanneer is een las van voldoende kwaliteit?





2. Mind map, scope en grenzen

2.1.Mind map

Tijdens dit project kan er heel ruim gedacht worden, tijdens deze fase kunnen alle ideeën genoteerd worden nadat er een inleiding van het project is gemaakt voor het plan van aanpak. In het midden van Figure 1 is het algemene project, daaromheen liggen verschillende delen welke aan elkaar gerelateerde onderdelen bevatten.



Figure 1 Mindmap

2.2.Scope

Om de doelstelling van dit project te behalen zijn er punten vastgelegd in de scope. Deze punten zijn de taken die vervuld dienen te worden binnen dit project.

Taken:

- Plan van aanpak.
- Onderzoek in inductielassen en testen.
 - o Onderzoeken welke mogelijkheden er zijn binnen het inductielasproces.
 - o Onderzoeken welke metingen er verricht kunnen worden.
 - Onderzoeken hoe de kwaliteitscontroles plaatsvinden.
- Praktijkonderzoek
 - Kennismaken met inductielassen, een eerder uitgevoerde test reproduceren om het proces te leren kennen met daarbij behorend de data acquisitie van verschillende parameters en sensoren.





- In eerste instantie laminaten lassen die bestaan uit PPS-koolstofweefsel met een variabele dikte welke in stappen verloopt om de temperaturen tijdens het lassen te monitoren.
- Aan de hand van bovenstaande resultaten worden de volgende setups of tests samengesteld en verschillende data geanalyseerd.

Denk daarbij aan de volgende punten die onderzocht gaan worden:

- Lassen van verschillende snelheden, een andere lassnelheid kan resulteren in andere temperaturen, vooral in de dikte van het laminaat gemeten, hier is nog niets over bekend binnen NLR
- Temperaturen meten op verschillende dieptes in het materiaal, hier is binnen NLR nog niets over bekend.
- Aan de hand van bevindingen van verschillende lastesten kan een daadwerkelijk variabele dikte gelast gaan worden.
- Rapporteren.
 - Alle bovengenoemde punten dienen vastgelegd te worden in een rapport, dit is tevens het afstudeerrapport.
 - o Het rapport wordt gepresenteerd tijdens de afstudeerassessment.

Te leveren producten:

- PVA.
- Voortgangsrapportages.
- Eindrapport (incl. samenvatting, poster, zelfreflectie en presentatie).
- Kennis voor NLR om verder te gaan met het inductielassen van thermoplastische composieten met variabele dikte.

2.3.Afbakening

Door de grote omvang van parameters en variabelen moeten delen worden uitgesloten voor dit project.

- De te lassen materialen zijn PPS-koolstof weefsel en PEKK met UD vezels
- Beperken tot het lassen van een rechte lijn op een niet gekromd oppervlakte.
- Gelaste delen worden getest en geanalyseerd doormiddel van C-scan en trektesten. Microscopie is eventueel mogelijk als dit noodzakelijk lijkt
- Voor de lasopstelling wordt de standaard tooling gebruikt die beschikbaar is bij NLR.





3. Project fasering

Dit project kan omschreven worden met een DMADV Methode (Define Measure Analyze Design Verify).

3.1.Definiëren

Dit onderzoek is gericht op het lassen van thermoplastische composieten met variabele dikte. Het doel is composieten (PEKK-UD) lassen met variabele dikte.

3.2.Measure

Tijdens het lassen word de temperatuur gemonitord doormiddel van thermokoppels. Elk materiaal of lay-up heeft zijn eigen opwarmeigenschappen. Naast de eigenschappen van het materiaal wordt ook gekeken wat de huidige setup kan betreft variabele instellingen.

3.3.Analyse

Alle vastgelegde data van de teststukken word geanalyseerd en vastgelegd in een grafische vorm. Deze data kunnen worden geanalyseerd en daaruit kunnen conclusies gehaald worden.

3.4.Design

Aan de hand van de geanalyseerde data kan een plan gemaakt worden om delen met een variabele dikte te lassen.

3.5.Verify

De delen met variabele dikte worden gelast met terugkoppeling, thermokoppels worden geplaats om de temperatuur op verschillende plaatsen in het lasbed te monitoren. Na het lassen kan onder de C-scan worden aangetoond of er defecten in het lasgebied aanwezig zijn.





4. Project structuur

4.1.Project structuur

Het inductielassen van composieten met variabele dikte valt onder het LIFT-project, voornamelijk gericht voor de productie van bijvoorbeeld ribben op een skin met variabele dikte. De opgedane kennis kan ook gebruikt worden binnen andere projecten.

In Figure 2 is de structuur opbouw te zien van groot (boven) naar klein (onder).



Figure 2 Project breakdown structure





4.2.Work breakdown structure

Alle werkzaamheden die binnen dit project vallen zijn in **Error! Reference source not found**.hiërarchisch opgedeeld.



Figure 3 Work breakdown structure





5. Risico analyse

Binnen dit project lopen enkele risico's die het project in gevaar kunnen brengen of extra werk kunnen veroorzaken. De meest voor de hand liggende risico's die voor dit project van toepassing zijn staan hier onder opgesomd, vervolgens worden deze toegelicht en een eventuele oplossing beschreven.

De mogelijke risico's binnen dit project zijn:

- 1 Materiaal niet aanwezig/geleverd.
- 2 Lassen niet mogelijk door ziekte operator of falen van de machine (lasrobot,tooling,heatsink etc.)
- 3 Kwaliteitstesten niet op tijd uitgevoerd.
- 4 Geen goede afbakening van dit project (scope).
- Risico: Materiaal niet aanwezig of geleverd.
 Gevolg: Groot
 Als er geen materiaal is kan er niet getest en gelast worden

 Kans: klein
 - De kans dat er geen materiaal is klein, veel materiaal ligt bij NLR op voorraad, is standaard materiaal of kan binnen redelijke termijnen geproduceerd worden.
 - Plan: Materiaal ligt waarschijnlijk wel ergens op voorraad, in het ergste geval kan er binnen NLR enkele materialen geproduceerd worden.
- 2. **Risico**: Lassen niet mogelijk door ziekte operator of falen van de machine (lasrobot,tooling,heatsink etc.)

Gevolg: Groot

Kans:

Als er niet gelast kan worden kunnen er geen teststukken geproduceerd worden Redelijk

Er bevinden zich veel componenten binnen de lasopstelling welke stuk kunnen gaan (Kuga robotarm, keramische heatsink, datalogger, Ambrell inductie transformator) operators kunnen in de ziektewet komen.

Plan: lastesten op tijd inplannen.

voorzichtig te werk gaan om schade aan de apparatuur te voorkomen, bij schade of defecte onderdelen snel actie ondernemen (onderdelen bestellen of de juiste mensen in schakelen) zodat er gelast kan worden.





3. Risico: · Kwaliteitstesten niet op tijd uitgevoerd.

Gevolg: Groot

Als de testen niet of te laat worden uitgevoerd, kan de data van de testen niet in het rapport worden verwerkt.

Kans: redelijk

De kwaliteitstest afdeling kan vol geplanned zijn of er zijn defecte machines

- **Plan**: Op tijd plannen en niet te ver achter in het project schuiven, in het ergste geval moeten de testen extern gedaan worden
- 5 Risico: · Geen goede afbakening van dit project (scope).

Gevolg: Groot

Als de scope niet goed opgezet is of er worden werkzaamheden verricht die niet bijdragen aan het eindresultaat van dit project is het mogelijk dat het beoogde resultaat niet behaald word.

Kans: redelijk

Het is eenvoudig om extra onderzoeken of lassen te doen (dit kunnen interesante werkzaamheden zijn)

Plan: denk bij alle werkzaamheden na of deze binnen de scope vallen, denk daarnaast ook goed na of deze werkzaamheden bijdragen aan het doel van dit project (inductielassen van thermoplastische composieten met een variabele dikte.) De scope va dit project kan eventueel bijgesteld worden tijdens het project.

6. Kosten en baten

In dit hoofdstuk wordt omschreven wie dit project beïnvloeden en wie baat (kunnen) hebben bij de resultaten van dit project.

6.1.Stakeholders analyse

Dit project levert resultaten voor project LIFT (zie 4.1 Project structuur). De te verwachten resultaten zijn samen met de andere belanghebbenden vastgelegd. In Table 2 is een globaal overzicht van de personen of groepen die invloed en belang hebben bij de resultaten van dit project. De mensen binnen de projectgroep composieten aan dit project werken hebben de sterkste invloed op de projectresultaten. Alle deelnemende of betrokken partijen binnen dit project hebben belang bij de projectresultaten, het delen van de informatie is immers het doel van dit project

Stakeholders:

- Project LIFT
 - Projectdeelnemers andere deelnemende bedrijven





- Afstudeerd - Bedrijfsbeg		- Ar eider Se	R (composieten afdeling) dre Wels nne Sterk	
invloed	hoog		Andre Wels Senne Sterk NLR	
	laag		LIFT Andere belanghebbenden	
		laag	hoog	

belang

Table 2 Stakeholders analyze tabel

6.2.RACI

Om overzicht te creëren in de taakverdeling binnen dit project wordt gebruik gemaakt van een RACI tabel. Het RACI model bevat vier verschillende rollen:

- R Verantwoordelijk
- A Eindverantwoordelijk
- C Raadplegen
- I Informeren

In onderstaande tabel zijn de bovengenoemde rollen verdeeld over de betrokken personen, let op, een persoon kan ook geen of meerdere rollen hebben!

Rollen Taken	Student Andre Wels	Bedrijfsbegeleider Senne Sterk	Betrokken collega/ lasoperator Luuk Straathof	Docent begeleider Jaap Janssens
Verschillende las testen bedenken	RA	с	с	
Las testen plannen	RA	I.	с	
Las testen uitvoeren	А	I	R	
Data van het lassen analyseren	RA	С	I	
Rapportage	RA	с	с	I

Table 3 RACI tabel





7. Projectmonitor

Binnen dit project zijn verwachtingen en doelen die bereikt moeten worden. De verwachtingen en doelen moeten zijn vastgelegd, door het gebruik van een gantt chart, zie Table 4 kan er gezien worden welke processen lopen en kan er gemonitord worden of het project volgens planning verloopt.

7.1.Deadlines

- Voortgangsrapportage eind week 2
- Plannen gesprek week 2 of 3
- PVA inleveren in week 3 of 4
- Gesprek met begeleider in week 3, 4 of 5 (na inleveren PVA)
- Literatuuronderzoek afronden
- Tiel verslag mailen in week 6 en aangeven wanner bedrijfsbegeleider niet kan
- Voortgangsrapportage in week 10
- Lassen voor het bepalen van parameters worden uitgevoerd in of voor week 13
- Concept rapport in week 14 naar docent begeleider en voortgangsrapportage
- De laatst lassen worden uitgevoerd voor week 17
- De laatste kwaliteitstesten staan gepland in week 17
- Week 20 (23 maart) producten inleveren
- Week 21 en 22 afstudeerzitting
- 8 april 2020, einde afstuderen





M T W R

ΤWR

6/4

30/3

7.2.Gantt chart



MIWR 23/3 ΤWR 16/3 Z × R Ν 9/3 ΝR 2/3 Σ TWR 24/2 Σ MIWR 17/2 TWR 10/2 Σ MIWR 3/2 N R 27/1 Σ ΤWR 20/1 aantal Dagen 10 9 13 13 16 10 5 12 86 12 5 15 -111/15 11/22 12/6 12/6 12/6 12/6 12/13 12/6 12/13 12/20 1/2 3/13 3/13 3/16 3/23 4/8 eind 11/21 11/25 12/4 12/4 12/2 12/5 12/11 12/18 1/18 1/25 12/9 3/9 1/15 1/18 Datum tots 3/12 3/9 4/8 le dag en introductie Taak

Table 4 Gantt chart





8. Bibliography

- Gardiner, G. (2019, 1 9). *Welding thermoplastic composites*. Opgeroepen op 11 21, 2019, van compositesworld: https://www.compositesworld.com/articles/welding-thermoplastic-composites
- Queen, K. H. (2017, 10 12). Airbus, Boeing, Lockheed singing praises of composites. Opgeroepen op 12 23, 2019, van SME: https://www.sme.org/technologies/articles/2017/october/airbusboeing-lockheed-singing-praises-of-composites/

Appendix F.3 Bijlage 3 Reflectieverslag



Privacy





Koninklijk Nederlands Lucht- en Ruimtevaartcentrum

Het NLR is een toonaangevend, mondiaal opererend onderzoekscentrum voor de lucht- en ruimtevaart. Met zijn multidisciplinaire expertise en ongeëvenaarde onderzoeksfaciliteiten, levert NLR innovatieve, integrale oplossingen voor complexe uitdagingen in de aerospace sector.

De werkzaamheden van het NLR beslaan het volledige spectrum van Research Development Test & Evaluation (RDT&E). Met zijn kennis en faciliteiten kunnen bedrijven terecht bij het NLR voor validatie, verificatie, kwalificatie, simulatie en evaluatie. Zo overbrugt het NLR de kloof tussen onderzoek en toepassing in de praktijk. Het NLR werkt zowel voor overheid als industrie in binnen- en buitenland. Het NLR staat voor praktische en innovatieve oplossingen, technische expertise en een lange termijn ontwerpvisie. Hierdoor vindt NLR's cutting edge technology zijn weg naar succesvolle lucht- en ruimtevaartprogramma's van OEM's zoals Airbus, Embraer en Pilatus. Het NLR draagt bij aan (defensie)programma's zoals ESA's IXV re-entry voertuig, de F-35, de Apache-helikopter en Europese programma's als SESAR en Clean Sky 2. Opgericht in 1919 en met 600 betrokken medewerkers,

realiseerde NLR in 2017 een omzet van 76 miljoen euro. 81% hiervan is afkomstig uit contractonderzoek, het overige betreft een overheidsbijdrage.

Voor meer informatie bezoek: www.nlr.nl

Postal address PO Box 90502 1006 BM Amsterdam, The Netherlands e) info@nlr.nl i) www.nlr.org NLR Amsterdam Anthony Fokkerweg 2 1059 CM Amsterdam, The Netherlands p) +31 88 511 3113 NLR Marknesse Voorsterweg 31 8316 PR Marknesse, The Netherlands p) +31 88 511 4444

NLR is a registered trade name of Stichting Nationaal Lucht- en Ruimtevaartlaboratorium, Chamber of Commerce No. 41150373. VAT No. NL002760551B01