

ELEKTROMAGNETISCH PULSLASSEN VAN ALUMINIUM-KOPERPLAATVERBINDINGEN

INNOJOIN ONDERZOEKSPROJECT BESTUDEERT LASTECHNOLOGIEËN

VOOR HET THERMISCH VERBINDEN VAN ONGELIJKSOORTIGE MATERIALEN

Een multimateriaalontwerp heeft enorme uitdagingen op het gebied van de verbindingstechnologie, wegens de sterk verschillende materiaaleigenschappen van de te verbinden delen. Een van de innovatieve lastechnologieën om hieraan tegemoet te komen, is het elektromagnetisch pulslassen. Dit procedé bezit de mogelijkheid om verbindingen te realiseren tussen sterk verschillende metalen en legeringen, die met de conventionele smeltlasprocedés moeilijk te verbinden zijn. Dit artikel geeft eerst een korte uiteenzetting over het INNOJOIN onderzoeksproject, waarin verschillende lastechnologieën voor het thermisch verbinden van ongelijksoortige materialen bestudeerd worden. Vervolgens wordt er dieper ingegaan op het elektromagnetisch pulslassen van aluminium-koperplaatverbindingen, die toepassing vinden in o.a. busbars in kabel- en bedradings-systemen en nieuwe batterijen voor elektrische voertuigen.

ir. Irene Kwee en Dr. ir. Koen Faes, Belgisch Instituut voor Lastechniek (BIL)

MULTIMATERIAALONTWERP

In de industrie is er een voortdurend streven naar het verbeteren van structurele onderdelen: in de transportsector streeft men naar een gewichtsreductie, de machinebouw streeft naar meer performante machineonderdelen en bij de consumenten- en bouwproducten geeft een verhoogde integratie van functionaliteiten een competitief voordeel. Het combineren van klassieke materialen (constructiestaal, aluminium) met andere klassieke (roestvast staal) of zelfs nieuwe materialen (composieten, hoogsterkstalen) biedt ontwerpers oplossingen, terwijl een ontwerp uit één materiaal faalt. Een multimateriaalontwerp benut voor elke deelstructuur een materiaal met optimale materiaaleigenschappen. De toepassing wordt echter gestuit door uitdagingen op het gebied

van de verbindingstechnologie. Verschillende combinaties van materialen en diktes maken het robuust verbinden alsmaar complexer. Om tegemoet te komen aan de huidige noden op het vlak van het verbinden van ongelijksoortige materialen, heeft het BIL een aantal onderzoeksprojecten opgestart die focussen op dergelijke verbindingen. Een van deze onderzoeksprojecten die hier verder belicht zullen worden, is het INNOJOIN onderzoeksproject, waarbij het thermisch verbinden van ongelijksoortige metalen in plaatvorm bestudeerd wordt.

PROJECT INNOJOIN

Inhoud en opzet van het project

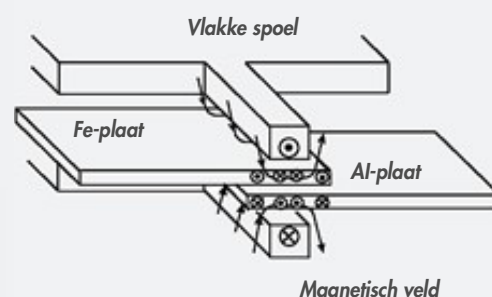
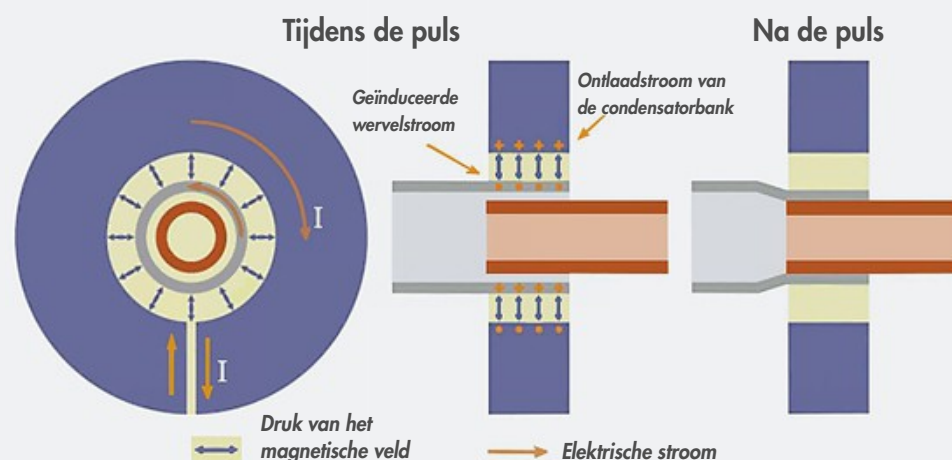
Het Europese Cornet project INNOJOIN omvat een brede waaier van lastechno-

logieën, namelijk elektromagnetisch pulslassen, wrijvingspuntlassen, weerstandselementlassen, weerstandslas met proces-tape en wrijvingselementlassen.

Deze technieken worden aangeleverd door het consortium BIL, KU Leuven (Campus De Nayer), CEWAC, SLV (Halle, Duitsland) en LWF (Paderborn, Duitsland). Eveneens wordt er een brede waaier van materialen in plaatvorm onderzocht, zodat innovatieve oplossingen voor industriële toepassingen verwacht kunnen worden. Dit project wordt gefinancierd met steun van het IWV (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

Doelstellingen

Het blijkt dat het inschatten van de toepasbaarheid van de voorgaande lastechnieken voor metaal- en non-ferroverwerkende

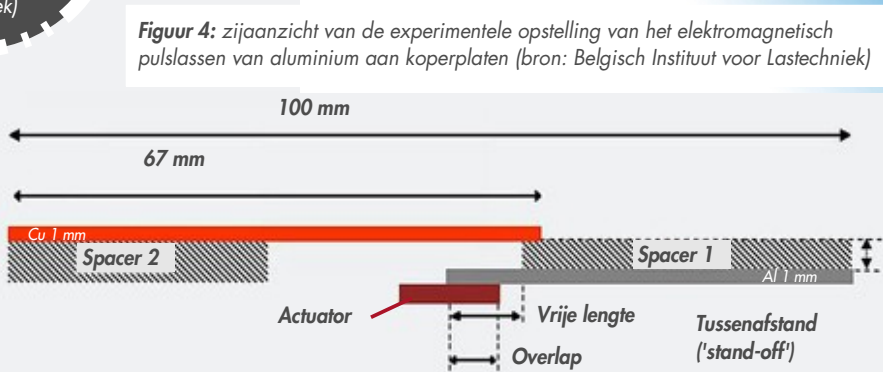


Figuur 2: magnetisch pulslassen van plaatvormige stukken (bron: Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheet joints. T. Aizawa et al)

Figuur 1: magnetisch pulslassen van buisvormige stukken



Figuur 3: vlakke spoel, aangewend voor het elektromagnetisch pulslassen van plaatvormige stukken (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



Figuur 4: zijaanzicht van de experimentele opstelling van het elektromagnetisch pulslassen van aluminium aan koperplaten (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

bedrijven niet evident is. Naast de beperkte bekendheid is er geen kennis aanwezig omtrent de technische haalbaarheid van de verschillende lasprocedures voor relevante toepassingen, noch over de eventuele verhoging van de productiviteit, en dus over het economische voordeel dat de inzet ervan kan betekenen.

De technisch en wetenschappelijke resultaten, beoogd in dit onderzoek, zijn daarom:

- Kennis van de eigenschappen van de gelaste materialen (metallografische structuur, hardheid, mechanische eigenschappen, kwaliteit);
- Onderzoek naar de mogelijkheden van de nieuwe processen (lasbaarheid van materialen, beperkingen ...);
- Haalbaarheidsstudies en kosten-batenanalyses voor verschillende toepassingen, aangedragen door de industrie;
- Publicaties waarin de beschikbare technieken besproken worden, met daarbij de voor- en nadelen t.o.v. de conventionele processen, de te verwachten eigenschappen, het toepassingsgebied, de investeringskosten, de mogelijke kostenbesparingen enz.;
- Stimulering van het gebruik van de nieuwe processen, via het vervaardigen van demonstratiestukken representatief voor potentiële industriële toepassingen.

ELEKTROMAGNETISCH PULSLASSEN

Dit artikel zal nu in detail verder ingaan op het elektromagnetisch pulslassen en het aanwenden van deze techniek voor het verwezenlijken van aluminium-koperverbindingen in plaatvorm.

Algemeen werkingsprincipe

Magnetisch pulslassen behoort tot de groep van de druklasprocessen, waarbij een metaalbinding verwezenlijkt kan worden tussen twee oppervlakken door ze tegen elkaar te drukken. Magnetisch pulslassen is een druklasproces waarbij de vervorming gebeurt met een zeer hoge snelheid, net zoals bij het explosielassen. De explosieve kracht wordt echter gegenereerd op een veilige manier, namelijk via een inductiespoel.

De magnetische drukkrachten worden opgewekt door het ontladen van een grote hoeveelheid elektrische energie door de spoel gedu-

rende een zeer korte tijdspanne, de zogenaamde puls. Ook is het een 'solid state'-lasproces, wat betekent dat de materialen niet tot smelten gebracht worden tijdens de lascyclus, zodat men de mogelijkheid heeft om ongelijksoortige materialen te verbinden. Via het magnetisch pulslassen is het mogelijk om buismateriaal (figuur 1) en plaatmateriaal (figuur 2) te lassen, afhankelijk van de spoel die gebruikt wordt.

Experimentele opstelling voor het lassen van platen

Over het algemeen biedt het elektromagnetisch pulslassen van plaatmateriaal een grotere

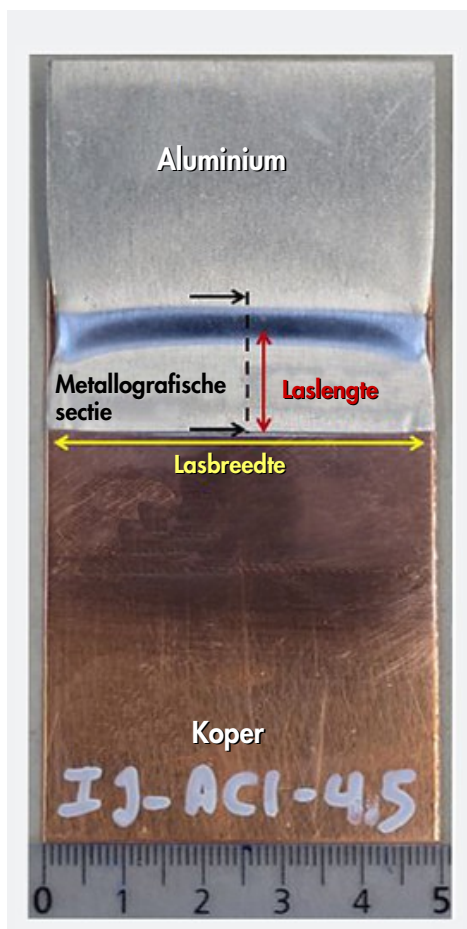
uitdaging in vergelijking met het lassen van buismateriaal, wegens de niet-uniforme magnetische velden die genegeerd worden, afhankelijk van de positie in de plaat. Hierdoor is de controle over het magnetische veld bij het lassen van plaatvormige stukken veel moeilijker dan bij het lassen van buisvormige componenten, waarbij er wel een uniform magnetisch veld ontwikkeld wordt rondom de omtrek van buisvormige componenten. Het elektromagnetisch pulslassen van plaatmaterialen is dus een relatief onbekend gebied waar er nog veel innovatieve ontwikkelingen mogelijk zijn. Figuur 3 toont de vlakke spoel die aangewend wordt voor het lassen van plaatvormige stukken.

Figuur 4 illustreert het zijaanzicht van de experimentele opstelling van het elektromagnetisch pulslassen van aluminium aan koperplaten. Wanneer een stroom door de spoel loopt, wordt er een elektromagnetische kracht ontwikkeld die het gedeelte van de aluminium plaat die overlapt met de spoel, tegen de koperen plaat laat impacteren met een hoge snelheid. De twee platen zijn gescheiden door middel van isoleerplaatjes ('spacers'). Op deze manier wordt er een tussenafstand gecreëerd, de zogenaamde 'stand-off'. Deze afstand bepaalt, samen met de vrije lengte, de hoek en de snelheid waarmee de aluminium plaat tegen de koperen plaat impacteert. De impacthoek en -snelheid bepalen op hun beurt de kwaliteit van de lasverbinding tussen de twee platen.

Voordelen

Aangezien het elektromagnetisch pulslassen géén gebruik maakt van warmte, maar van drukkrachten om een verbinding tot stand te brengen, biedt het belangrijke voordelen t.o.v. de conventionele lastechnieken. Er wordt immers geen warmtebeïnvloede zone gecreëerd en het materiaal verliest zijn eigenschappen niet. Dit procedé bezit eveneens de mogelijkheid om verbindingen te realiseren tussen metalen en legeringen met een sterk verschillend smeltpunt, zoals koper aan aluminium of aluminium aan staal. Deze nieuwe technologie biedt dus een aantal zeer attractieve voordelen:

- In vergelijking met conventionele lasprocessen is het magnetisch pulslasproces een 'koud' lasproces. De temperatuur blijft beperkt tot ongeveer 50 °C. Dit betekent



Figuur 5: lasverbinding tussen een aluminium en een koperen plaat (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

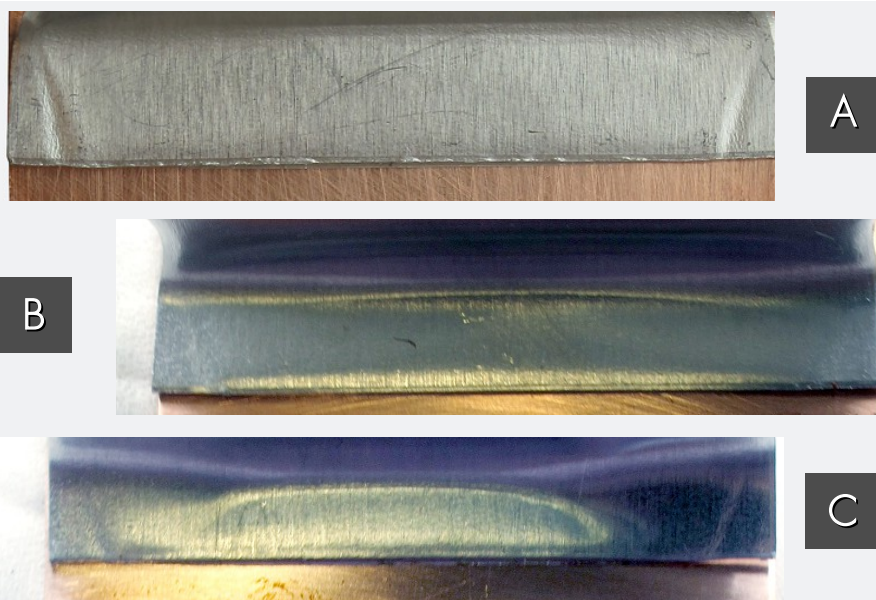


Fig. 6: laszone bekomen na peeltest: (A) 18 kJ, (B) 16 kJ, (C) 14 kJ (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

gebieden te identificeren en zo de daadwerkelijke vorm van de laszone te onderscheiden, werden de twee platen handmatig van elkaar gescheiden ('peel'-test).

Figuur 6 geeft een overzicht van drie zulke beproefde lasverbindingen, gerealiseerd met dezelfde tussenafstand en overlap tussen de spoel en de aluminium plaat, maar met drie verschillende energieniveaus: van onder naar boven: 18 kJ, 16 kJ en 14 kJ. Een verhoging in energie resulteert in een groter magnetisch veld, wat zich vertaalt in een grotere oppervlakte van de laszone.

Morfologie van de lasinterface

Een metallografische analyse toont aan dat er een vlakke of golvende interface bekomen wordt, alsook de vorming van verschillende intermetallische verbindingen in de lasinterface. Die kunnen veroorzaakt worden door een mechanische vermenging, een plastische vervorming of het optreden van smeltfenomenen. Een verhoging van de energie resulteert in het algemeen in een meer uitgesproken golfpatroon en in een dikkere intermetallische laag, waarin er ook meer porositeit en scheuren optreden. Figuur 7 illustreert de algemene evolutie van de lasinterface in een aluminium-koperplaatverbinding. In het begin van de las is er een interface met complete continuïteit en zonder intermetallische verbindingen, noch waarneembare defecten (Figuur 7a). Vervolgens wordt er een relatief vlakke en dunne (2-10 µm), lichtgrijze intermetallische binding met kleine defecten gevormd. Deze laag bevat meer aluminium dan koper, aangezien ongeveer 31-41

dat de werkstukken onmiddellijk na het lassen ontklemd en verder bewerkt kunnen worden.

- Hoge productiesnelheid, soms tot tien stukken per minuut.
- Ecologisch lasproces, aangezien er geen warmte, gas of lasrook geproduceerd worden.
- Beschermgassen of toevoegmaterialen zijn niet nodig.
- Geen speciale voorbereidingen van de werkstukken voorafgaandelijk aan het lassen zijn vereist.

zetting van de tot op heden behaalde resultaten wordt hierna besproken.

Vorm van de laszone

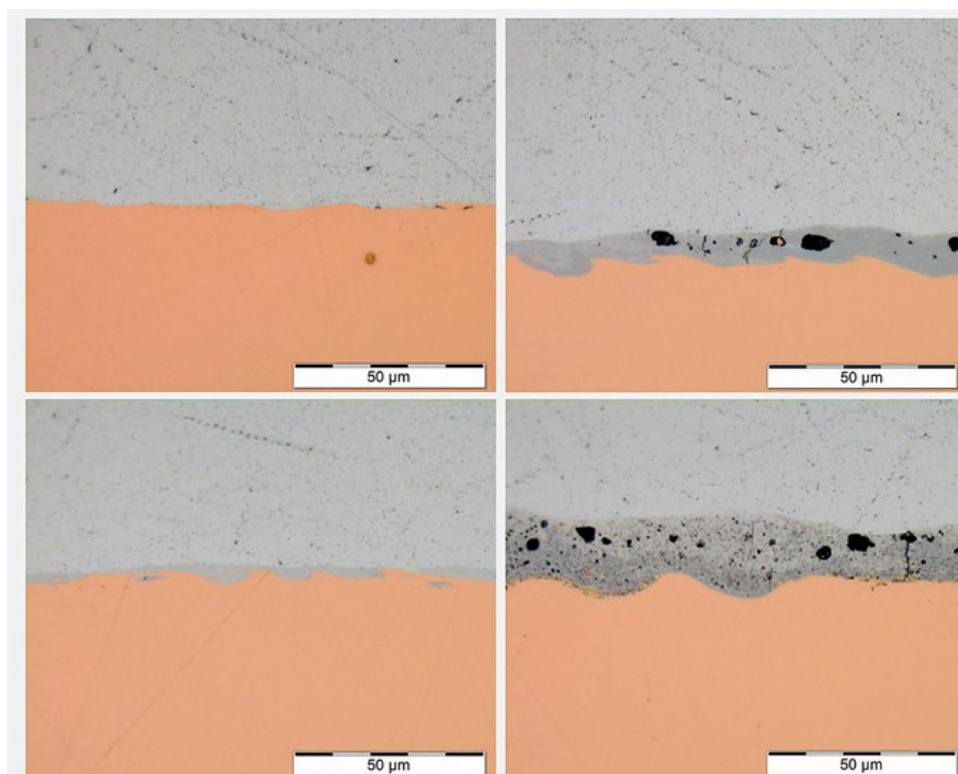
Figuur 5 toont een lasverbinding tussen een aluminium en een koperen plaat, verwezenlijkt door middel van het elektromagnetisch pulslas. Het lasgebied vertoont een half elliptische vorm, die verklaard kan worden door de evolutie van de impactsnelheid en -hoek tijdens het proces. Om de niet-gelaste

ALUMINIUM-KOPER-PLAATVERBINDINGEN

Aluminium-kopercomponenten kunnen dienen als een waardig alternatief voor werkstukken geheel vervaardigd uit koper in toepassingen zoals busbars en kabels voor elektrische systemen. Daarnaast hebben nieuwe batterijen in elektrische voertuigen, in het kader van de e-mobiliteit, baat bij de aanwending van aluminium-koperverbindingen.

Drijfveren achter deze ongelijksoortige verbinding zijn gewichtsreductie en kostenbesparing, en dit zonder verlies aan functionaliteit of performantie. De laatste jaren is de prijs van koper immers sterk toegenomen, zodat het substitueren van koper door aluminium een directe invloed heeft op de materiaalkost van een product.

In het lopende INNOJOIN project wordt het realiseren van aluminium-koperplaatverbindingen onderzocht. Hierbij worden verschillende testreeksen uitgevoerd, waarbij er drie parameters worden gevarieerd, namelijk het energieniveau, de tussenafstand tussen de te lassen platen en de overlap tussen de spoel en de aluminium plaat. De bekomen lasverbindingen worden eerst visueel onderzocht, vervolgens metallografisch geanalyseerd en ten slotte worden de mechanische eigenschappen bepaald. Een gedetailleerde uiteen-



Figuur 7: evolutie van de lasinterface (A), complete continuïteit (B), lichtgrijze intermetallische binding: 31-41 gew% koper (C), donkergrijze intermetallische binding: 54-62 gew% koper (D), donkergrijze en lichtbruine intermetallische binding: 72-75 gew% koper (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

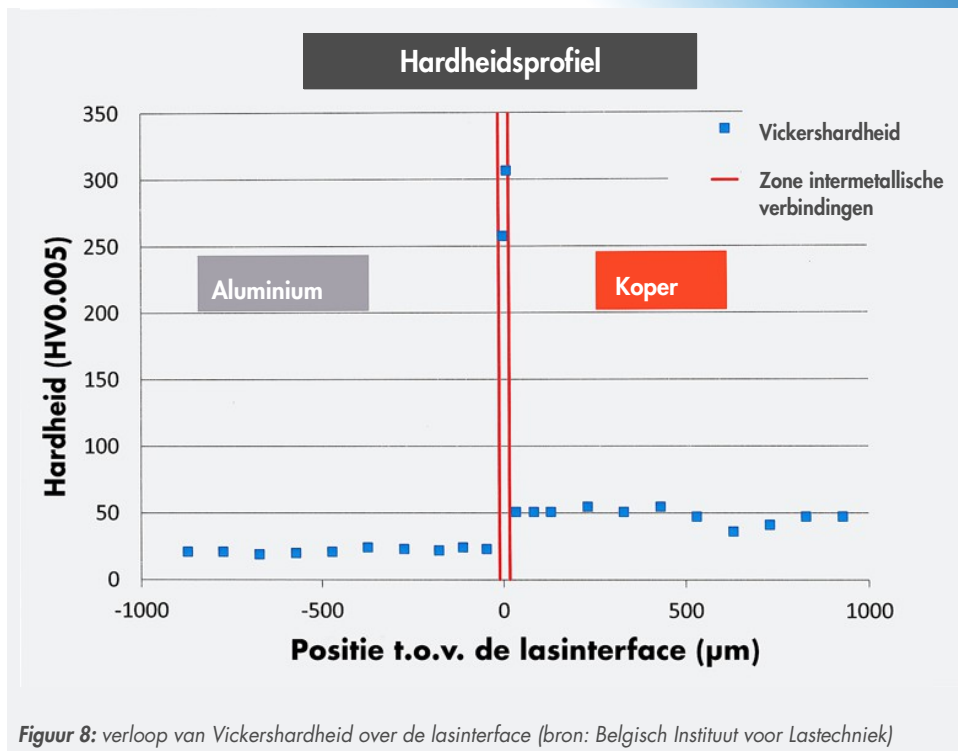
gew% koper aanwezig is (figuur 7b). Nadien vormen er zich dikkere (3-26 µm), donkergrijze intermetallische bindingen, al dan niet in combinatie met lichtgrijze zones. Deze lagen vertonen in het algemeen meer porositeiten en scheuren, en bevatten ook meer koper, namelijk 54-62 gew% (figuur 7c). Ten slotte eindigt de aluminium-koperverbinding in een dikke lasinterface (14-39 µm). Deze vertoont een mix van lichtgrijze, donkergrijze, en lichtbruine intermetallische bindingen, waarin er een grote hoeveelheid aan porositeiten en scheuren aanwezig is. De lichtbruine intermetallische bindingen bevatten de hoogste hoeveelheid koper, namelijk 72-75 gew% (fig. 7d).

Hardheid

Figuur 8 toont het verloop van de Vickershardheid over de lasinterface. De intermetallische bindingen bezitten een duidelijk hogere hardheid (≈ 283 HV) dan het aangrenzende koper en aluminium (≈ 48 HV en 22 HV respectievelijk), wat te wijten kan zijn aan een sterke plastische vervorming of een verfijning van de microstructuur door het smelten en aansluitend een snelle solidificatie.

Treksterkte

Figuur 9 toont de trekkracht in functie van het energieniveau en voor verschillende niveaus van de tussenafstand en de overlap. Er werden hogere treksterktes verkregen bij hogere energieniveaus en kleinere tussenafstanden. Bovendien resulteert een verhoging van energie ook in een grotere breedte van de laszone die overblijft na de trektest (figuur 10). Bijgevolg kan deze lasbreedte



Figuur 8: verloop van Vickershardheid over de lasinterface (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

bijdragen tot de treksterkte die behaald kan worden: een hogere lasbreedte heeft doorgaans een hogere treksterkte.

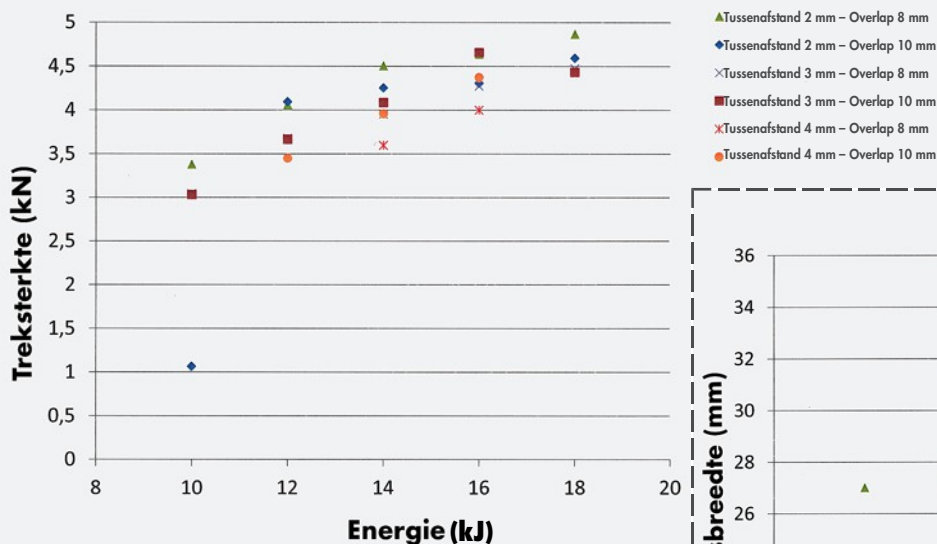
CONCLUSIE

Het elektromagnetisch pulslassen is een innovatief verbindingsproces dat gebruikmaakt van elektromagnetische krachten om werkstukken te vervormen en te lassen. Dit procedé bezit de mogelijkheid om bindingen te realiseren tussen sterk verschillende metalen en legeringen, die met de conventionele smeltlasprocedures moeilijk te verbinden zijn. Op deze manier kunnen er hybride compo-

nenten vervaardigd worden, die een gewichtsreductie en een kostenbesparing kunnen realiseren. Een illustratie hiervan zijn aluminium-koperplaatverbindingen, waarbij er verschillende soorten en hoeveelheden intermetallische bindingen in de lasinterface optreden. Deze vertonen een hogere hardheid in vergelijking met het zuivere aluminium en koper.

De aanwezigheid van deze harde intermetallische bindingen, alsook de breedte van de bekomen laszone, kunnen mogelijk bijdragen tot een voldoende hoge treksterkte van de aluminium-koperplaatverbindingen. □

Treksterkte versus energie



Figuur 10: lasbreedte na trektest (mm) versus energie (kJ) (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

Figuur 9: trekkracht (kN) versus energie (kJ) (bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

Lasbreedte versus energie

