

VERBINDEN VAN ONGELIJKSOORTIGE MATERIALEN

HET MAGNETISCHE PULSLASPROCES

Eind 2011 werd het twee jaar durende collectieve onderzoeksproject 'Technologie de soudage avancée par impulsion magnétique', met het acroniem SOUDIMMA, beëindigd. Dat onderzoek werd uitgevoerd door het Belgisch Instituut voor Lastechniek (BIL), in samenwerking met de Waalse partner CEWAC (het Centre d'Etudes wallon de l'assemblage et du contrôle des matériaux in Seraing) en werd gesteund door de Waalse overheid (Région Wallonne; project nr. 816944). Het project handelde over het elektromagnetisch pulslassen, een lasproces gelijkaardig aan het explosielassen. Het proces maakt gebruik van elektromagnetische krachten voor het vervormen en lassen van materialen. Aangezien deze techniek géén gebruik maakt van warmte maar van explosieve krachten om een verbinding tot stand te brengen, biedt ze belangrijke voordelen t.o.v. de conventionele lastechnieken.

Door dr. ir. Koen Faes, EWE, Belgisch Instituut voor Lastechniek,
ir. Nicolas Debroux, CEWAC & prof. dr. ir. Wim De Waele, Labo Soete, UGent

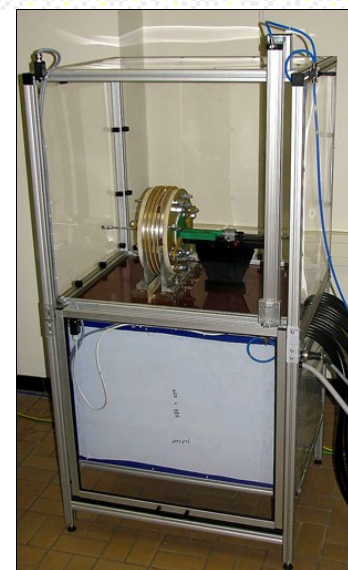
WERKINGSPRINCIPE

Magnetisch pulslassen behoort tot de groep van de druklasprocessen. Bij deze lasprocessen kan een metaalbinding tussen twee oppervlakken verwezenlijkt worden door ze tegen elkaar te drukken. Magnetisch pulslassen is een druklasproces waarbij de vervorming gebeurt aan een zeer hoge snelheid. Het werkingsprincipe is gelijkaardig aan dat van het explosielassen, maar de explosieve kracht wordt gegenereerd op een veilige manier, namelijk via magnetische velden opgewekt in een inductiespoel. Het uitwendige werkstuk wordt met hoge snelheid gecompriëerd en impacteert op het inwendige stuk, wat zorgt voor een dusdanige vervorming dat er een verbinding tussen beide werkstukken ontstaat. Het is een 'solid-state' lasproces,

wat betekent dat de materialen niet tot smelten gebracht worden tijdens de lascyclus. De warmteontwikkeling tijdens het proces is minimaal en uiterst lokaal (zone van ong. 10 μm), zodat alle conventionele lasproblemen ten gevolge van warmte-inbreng en het verlies van materiaaleigenschappen in de warmtebeïnvloede zone vermeden worden. Het proces kan gebruikt worden voor het verbinden van buis- en plaatvormige producten in de overlapconfiguratie. De beperkte en zeer lokale warmtegeneratie tijdens de lascyclus maakt het mogelijk om materialen te verbinden met een sterk verschillend smeltpunt. De eerste ontwikkelingen betroffen buisverbindingen aluminium/staal, aluminium/koper en aluminium/aluminium, koper/staal en koper/koper. Tot nu toe zijn maar een klein aantal materiaalcombinaties onderzocht.

MAGNETISCHE PULSLAS-INSTALLATIE (BIL) EN CONFIGURATIE LASEXPERIMENTEN

Alle lasexperimenten werden uitgevoerd met een magnetische pulslasinstallatie van het type Pulsar 50/25 (figuur 1). De maximale energie van de lasmachine is 50 kJ bij een spanning van 25 kV. De ontladingsstroom kan oplopen tot 300 kA en heeft een ontladingsfrequentie van 14 kHz. De totale capaciteit van de condensatoren bedraagt 160 μF . Het magnetische veld gegenereerd door de spoel met meerdere windingen wordt geconcentreerd in een kleine zone, gebruikmakend van een veldconcentrator of field shaper (figuur 2). De te lassen stukken worden in de overlapconfiguratie geplaatst, in het inwendige van de field shaper. Verschillende procesparameters spelen een belangrijke rol voor het



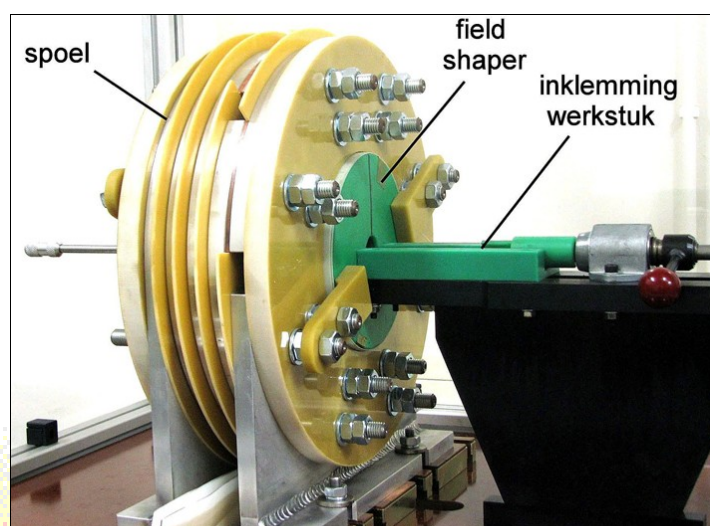
Figuur 1: Pulsar lasmachine

bekomen van een goede laskwaliteit:

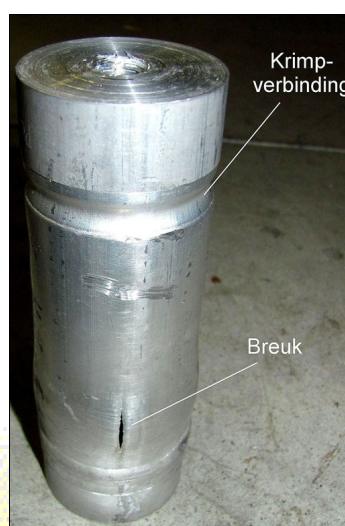
- de diameter en wanddikte van de buis;
- de afstand tussen de buis en het inwendige stuk: die is nodig voor het versnellen van de buis en het verkrijgen van de gewenste impactsnelheid;
- de positie van de werkstukken t.o.v. de field shaper: dat bepaalt onder meer de hoek van impact;
- de laadspanning van de condensatoren, die het energieniveau bepalen.

VOORDELEN/BEPERKINGEN

- Aangezien er geen gebruik gemaakt wordt van warmte maar van druk, worden alle conventionele lasproblemen ten gevolge van de warmtecyclus en het verlies van materiaaleigenschappen vermeden.



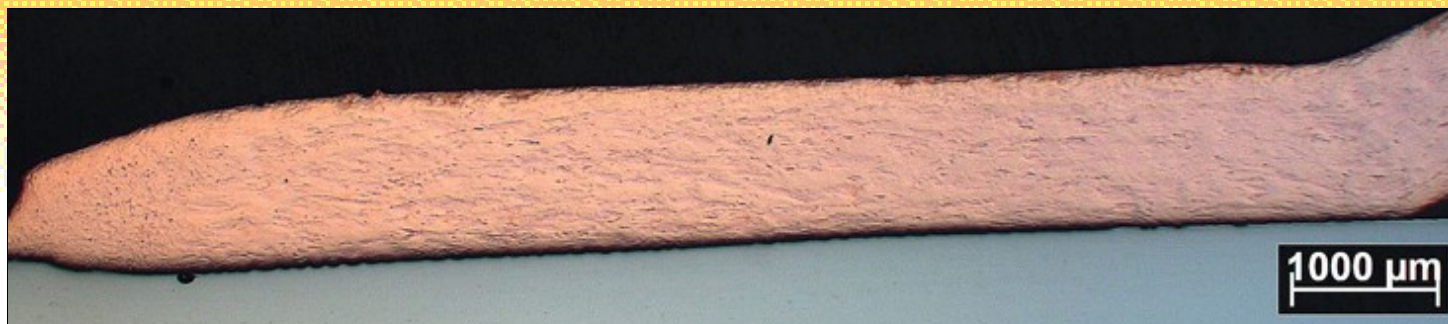
Figuur 2: spoel met meerdere windingen



Figuur 3: magnetische pulskrimpverbinding van een aluminium buis met een inwendig stuk



Figuur 4: lasverbinding van een koperen buis aan een inwendig stuk in roestvast staal



Figuur 5a: lasinterface van een verbinding koper/roestvast staal (x12)



Figuur 5b: lasinterface van een verbinding koper/roestvast staal, niet aangeëist (x200)

- Bij correcte uitvoering is de las sterker dan het zwakste basismateriaal: de breuk treedt bij beproeving steeds op buiten de laszone.
- Beschermgassen, toevoegmaterialen of andere hulpmaterialen zijn niet nodig.
- Het magnetische pulslasproces is een 'koud' lasproces, de materialen worden niet warmer dan 30 °C. Dat betekent ook dat de werkstukken onmiddellijk na het lassen ontklemd en verder bewerkt kunnen worden.
- Hoge productiesnelheid, tot 10 stukken per minuut, afhankelijk van de graad van automatisatie.
- Het is een ecologisch lasproces, aangezien geen warmte, uv-straling, gas of lasrook geproduceerd wordt.

Een voorwaarde voor magnetisch pulslassen is dat het te vervormen materiaal een goede elektrische geleidbaarheid heeft. Als dat niet het geval is, neemt de energie toe die nodig is om voldoende wervelstromen te kunnen opwekken. Andere voorwaarde is dat de oppervlakken met elkaar overlappen.

BELANGRIJKSTE PROJECTRESULTATEN

Een aantal bedrijven, actief in diverse sectoren (licht- en ruimtevaart, algemene constructie, koeltechniek, airco, automotive ...), is met name vooral geïnteresseerd in materiaalcombinaties zoals koper/aluminium, aluminium/staal of koper/rvs. De haalbaarheid van de techniek voor toepassingen van de deelnemende bedrijven werd onderzocht op basis van de door hen verstrekte informatie aangaande hun toepassingen en gebruikte

materialen. De keuze van de verder te onderzoeken materiaalcombinaties werd hierop gebaseerd en kan dus als representatief beschouwd worden voor de bedrijven van de doelgroep van het project:

- aluminium/aluminium
- aluminium/staal
- aluminium/koper
- koper/messing
- koper/staal
- koper/aluminium
- koper/roestvast staal

Het magnetische pulslasproces werd tijdens verschillende testreeksen toegepast op buisvormige stukken. Tijdens de experimenten werd bijna altijd een massief inwendig stuk gebruikt. Dat vereenvoudigde het onderzoek aangezien er geen inwendige ondersteuning nodig is. Indien de haalbaarheid positief werd geëvalueerd, werden demonstratiestukken aangemaakt.

ALUMINIUM/ALUMINIUM

De meest eenvoudige toepassing betreft het verbinden van aluminium met aluminium. De lasbaarheid van aluminium werd reeds eerder aangetoond, daarom werd het magnetisch pulskrimpen als alternatief onderzocht. Er werd gebruikgemaakt van aluminium buizen (EN AW-6060) met een diameter van 50 mm en een wanddikte van 1,5 mm. Een van de nadelen van de krimpverbindingen is dat die niet luchtdicht zijn. Om deze beperking te verhelpen werden conventionele rubberen O-ringen gebruikt, die geplaatst werden in een vooraf aangebrachte groef. Door het opkrimpen van de buis over het inwendige stuk wordt de O-ring samengedrukt, waardoor een dichting verkregen wordt. De verkregen verbindingen werden beproefd in CEWAC met een heliumlekttest en

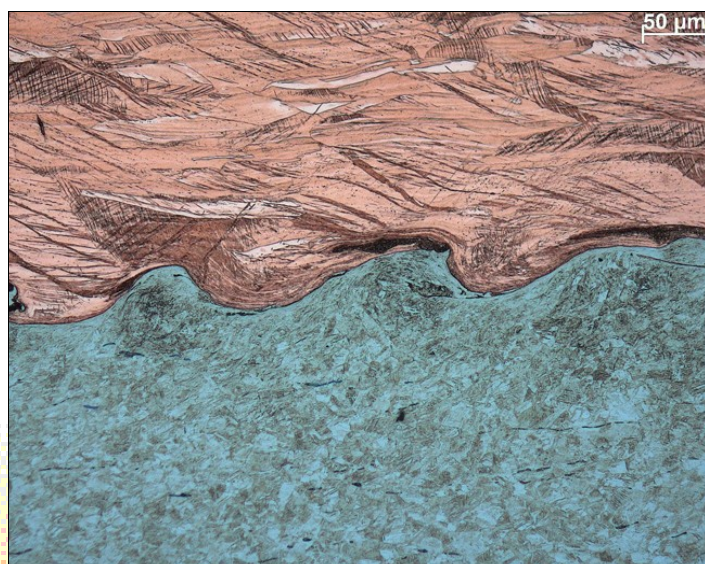
een hydraulische druktest. De resultaten hiervan waren zeer gunstig: de verbindingen waren lekvrij (lekdebiet: $2 \cdot 10^{-10}$ mbar.l./sec) en konden weerstaan aan een inwendige hydraulische druk van 100 bar. Tijdens de druktest trad de breuk steeds op in het aluminium buismateriaal (**figuur 3**).

KOPER/ROESTVAST STAAL

Aangezien deze materiaalcombinatie vaak voorkomt in koeltechnische toepassingen, werd de haalbaarheid ervan onderzocht. De lasproeven werden uitgevoerd met koperen buizen met een diameter en wanddikte van resp. 25 en 1,0 mm. Het inwendige werkstuk was vervaardigd in het roestvast staal AISI 316. Een afbeelding van een gelast stuk wordt getoond in **figuur 4**. Het metallografische onderzoek van de lasinterface in **figuren 5a, 5b en 5c**. De lasbaarheid werd als positief beoordeeld. Het metallografische onderzoek toonde aan dat de laslengte circa 5 mm bedroeg. Er bestond een vrij groot parametervenster, wat wil zeggen dat men een relatief grote vrijheid heeft bij de keuze van de lasparameters.

KOPER/STAAL

Naar analogie met de vorige materiaalcombinatie werd ook de lasbaarheid van koper aan staal geëvalueerd. De lasproeven werden uitgevoerd met buizen met een diameter en wanddikte van resp. 25 en 2,0 mm. De lassen werden beoordeeld op basis van metallografisch onderzoek, hardheidsmetingen en lekdichtheidsproeven met lucht. Net zoals bij koper/roestvast staal vertoonde de lasinter-



Figuur 5c: lasinterface van een verbinding koper/roestvast staal, aangeëist (x200)

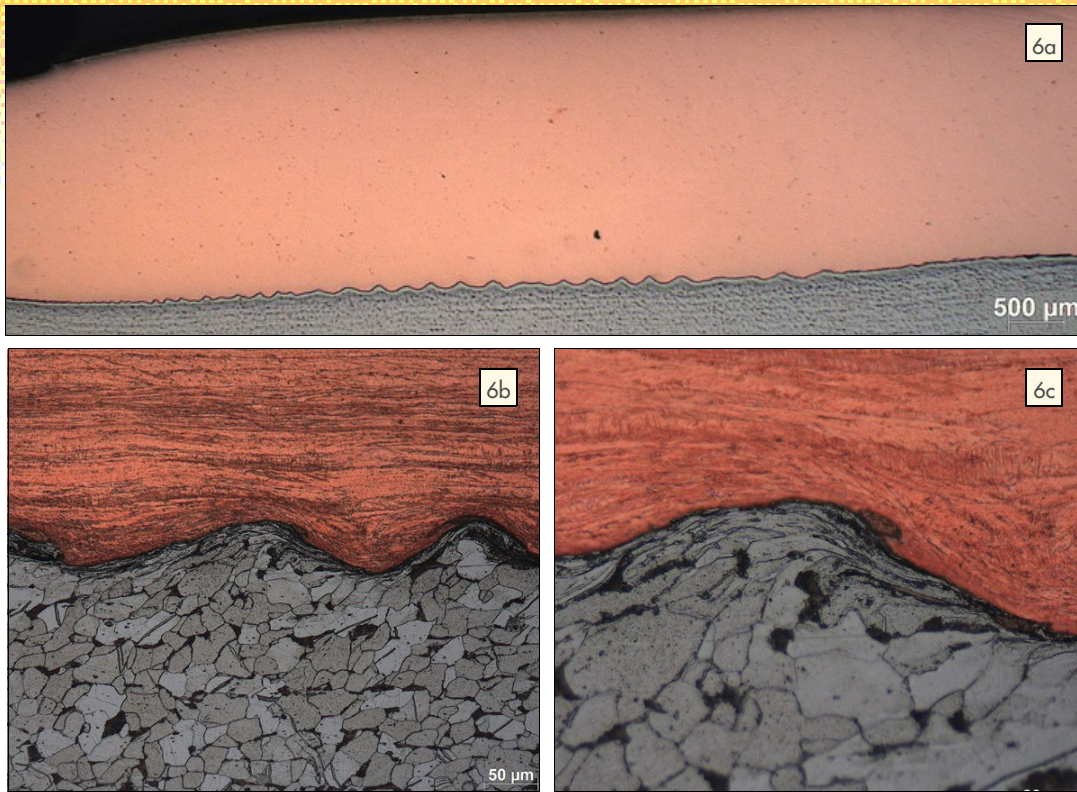


Fig. 6a: lasinterface van een typische verbinding koper/staal (x12)
Fig. 6b: lasinterface van een verbinding koper/staal (x200)
Fig. 6c: lasinterface van een verbinding koper/staal (x500); **Fig. 7:** verbinding van aluminium aan staal

face een golfvormig patroon (zie **figuur 6a, b en c**), vergelijkbaar met explosielasverbindingen. Er wordt verondersteld dat deze golfvormige lasinterface tussen heterogene materialen gecreëerd wordt door een vermenging van de materialen, gecombineerd met een sterke plastische vervorming en een lokale fusie. Aangenomen wordt dat de materialen zich gedurende een zeer korte tijd ($\pm 15 \mu\text{s}$) in een zeer beperkte zone ($\pm 10 \mu\text{m}$) in een viskeus-plastische toestand bevinden, waardoor een metaalbinding mogelijk wordt. Verontreinigingen worden uit de laszone verwijderd doordat de impact een schokgolf creëert. Residu's van oppervlakteverontreinigingen werden teruggevonden aan het uiteinde van de las.

ALUMINIUM/STAAL

De lasproeven werden uitgevoerd met buizen met een diameter van 45 mm en een wanddikte van 1,5 mm. Diverse parametercombinaties werden onderzocht en kwalitatieve verbindingen konden aangemaakt worden (**fig. 7**). In

sommige verbindingen werd een intermetallische laag gevormd aan de lasinterface (**fig. 8**). Bij onaangepaste lasparameters kan de intermetallische laag niet weerstaan aan de residuële spanningen in de laszone. Die lagen werden meer in detail bestudeerd via elektronenmicroscopie. Een EDX-analyse uitgevoerd op deze lagen toonde aan dat die een mengeling zijn van beide materialen en bestaan uit 75 à 80% aluminium en 20 à 25% ijzer. Hardheidsmetingen werden uitgevoerd in deze intermetallische lagen. Hieruit bleek dat die een hoge hardheid kunnen bezitten (tot 400 HVO,1) indien onaangepaste lasparameters gebruikt worden. Een metallografische doorsnede van een lasverbinding wordt getoond in **figuren 8a en 8b**.

DESTRUCTIEVE EN NIET-DESTRUCTIEVE BEPROEVING

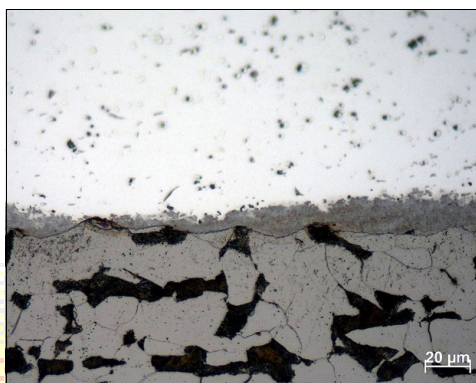
De volgende destructieve en niet-destructieve controlemethoden zijn toegepast voor het evalueren van de laskwaliteit: lektheidsprouwen, computertomografie, micro-

scopisch onderzoek, hardheidsmetingen, compressietesten en torsietesten. Voor veel toepassingen uit de koeltechniek, HVAC of auto-mobieliindustrie wordt een lekdichte lasverbinding vooropgesteld. Een lektheidstest met lucht werd aldus ontworpen, niet alleen voor het detecteren van lekken, maar ook voor het kwantificeren van het lekdebiet. Deze test was een combinatie van een dompeltest en een experiment waarbij de drukdaling opgemeten wordt. Als er geen lekken aanwezig waren, werden de verbindingen verder onderzocht via microscopisch onderzoek. Hierbij kon de lengte van de gelaste zone bepaald worden en konden de golfvorm of de intermetallische fasen van de lasinterface geanalyseerd worden. Compressie en torsietesten werden uitgevoerd voor het bepalen van de weerstand tegen afschuiving van de gelaste zone. Bij het uitvoeren van torsietesten op foutvrije verbindingen brak het inwendige stuk, op een locatie ver verwijderd van de laszone. In dat geval is de weerstand van de las tegen afschuifspanningen dus groter

dan de sterkte van het basismateriaal. Compressietesten (**figuur 9**) wijzen uit dat de weerstand tegen axiaal gerichte afschuifspanningen toeneemt met het energieniveau tijdens het lassen. Bij kwalitatieve verbindingen is de weerstand tegen afschuiving groter dan die tegen knik.

CONCLUSIE

Het BIL is voorloper inzake onderzoek naar de toepasbaarheid van het magnetisch pulslassen. Dit is een relatief jonge lasmethode met al enkele industriële toepassingen, gebaseerd op het gebruik van elektromagnetische krachten. Diverse materiaalcombinaties werden met succes gelast. De lasmethode maakt immers geen gebruik van warmte, zodat materialen met een sterk verschillend smeltpunt met de lastechniek verbonden kunnen worden. Het proces bezit een groot potentieel voor het snel en kostengunstig realiseren van deze verbindingen. Verwacht wordt dat het in de toekomst meer en meer gebruikt zal worden. □



Figuur 8a: lasinterface van een verbinding aluminium/staal, aangeëët (x500)



Figuur 8 b: lasinterface van een verbinding aluminium/staal, aangeëët (x200)



Figuur 9: compressietest