

# INNOVATIEVE VERBINDINGSTECHNIEKEN VOOR ONGELIJKSOORTIGE PLAATMATERIALEN

De evolutie in de markt om steeds lichtere en minstens even sterke constructies of producten te realiseren blijft zich voortzetten. Voor almaar meer onderdelen wordt overgegaan van het klassieke laagkoolstofstaal naar hoogsterktestaalsoorten of non-ferrolegeringen. Het verbinden van verschillende materialen biedt echter enorme uitdagingen, wegens de sterk verschillende materiaaleigenschappen van de te verbinden delen. Twee onderzoeksprojecten lopende aan het BIL beogen het ontwikkelen van innovatieve technieken die toelaten ongelijksoortige materialen te verbinden.

Irene Kwee, Nelis Vandermeiren, Koen Faes (Belgisch Instituut voor Lastechniek), Sam Coppieters, Dimitri Debruyne, KU Leuven (Campus Gent)

## MULTIMATERIAALONTWERP

Binnen 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 performantere 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, hoogsterktestalen) biedt ontwerpers oplossingen, daar waar een ontwerp uit één materiaal faalt. Een multimateriaalontwerp benut voor elke deelstructuur een materiaal met optimale materiaaleigenschappen. De toepassing wordt echter gestuurd door uitdagingen op het gebied van de verbindingstechnologie. Verschillende combinaties van materialen en diktes maken het robuust verbinden almaar 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 zich focussen op dergelijke verbindingen. Twee onderzoeksprojecten die hier worden belicht, zijn het INNOJOIN en het MECHJOIN project. Beide beogen het ontwikkelen van innovatieve verbindingstechnieken en -producten. Hiermee kunnen nieuwe hybride componenten worden geproduceerd, die inspelen op de huidige trend van het produceren van lichtgewichtmaterialen in diverse sectoren.

## PROJECT INNOJOIN

Het Europese Cornet project INNOJOIN bestudeert het thermisch verbinden van plaatmaterialen met behulp van een brede waaier aan innovatieve lastechnologieën, namelijk elektromagnetisch pulslassen, wrijvingspuntslassen, weerstandselementlassen, weerstandslaslassen met processtape en wrijvingselementlassen. Deze technieken worden aangewend om een verscheidenheid aan representatieve industriële ongelijksoortige materiaalcombinaties te verbinden. De technische doelstellingen van INNOJOIN zijn het onderzoek naar het potentieel van deze nieuwe processen en de te behalen laseigenschappen met deze technieken. In het kader van dit project onderzoekt het BIL de toepasbaarheid van het elektromagnetisch pulslas en het wrijvingspuntslas ('friction spot'-lassen). In het bijzonder geeft dit artikel een uiteenzetting over het aanwenden van deze twee technieken voor het verbinden van aluminium aan staal. Het INNOJOIN consortium bestaat uit het BIL, KU Leuven Campus De Nayer, CEWAC, SLV (Halle, Duitsland) en LWF (Paderborn, Duitsland). Het project wordt uitgevoerd met steun van het IWT (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

### Elektromagnetisch pulslas

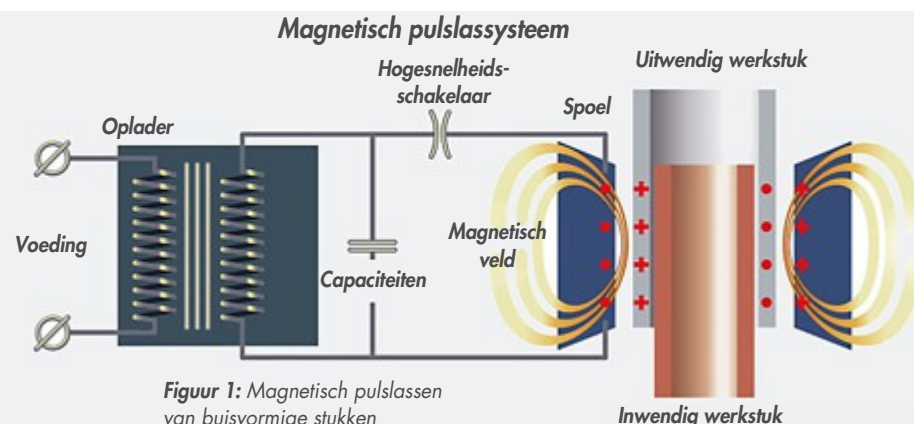
#### Algemeen werkingsprincipe en voordelen

Elektromagnetisch pulslas behoort tot de groep van de druklasprocessen, waar een metaalbinding verwezenlijkt wordt tussen twee oppervlakken door die tegen elkaar te drukken.

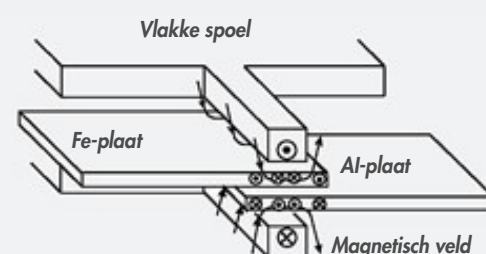
Magnetisch pulslas is een druklasproces waarbij de vervorming gebeurt tegen een zeer hoge snelheid, net zoals bij het explosielas. De explosieve kracht wordt echter gegenereerd op een veilige manier, namelijk via een inductiespoel. De magnetische drukkrachten worden opgewekt door het ontladen van een grote hoeveelheid elektrische energie in de spoel gedurende een zeer korte tijdspanne, de zogenaamde puls. Ook is het een 'solid state'-lasproces, wat betekent dat de materialen niet tot smelten worden gebracht tijdens de lascyclus, zodat men de mogelijkheid heeft ongelijksoortige materialen te verbinden. Aangezien het elektromagnetisch pulslas géén gebruikmaakt 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 warmte-beïnvloede 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 aluminium aan staal. Via het magnetisch pulslas is het mogelijk om buismateriaal (**Figuur 1**) en plaatmateriaal (**Figuur 2**) te lassen, afhankelijk van de spoel die gebruikt wordt.

#### Experimentele opstelling voor het elektromagnetisch pulslas van platen

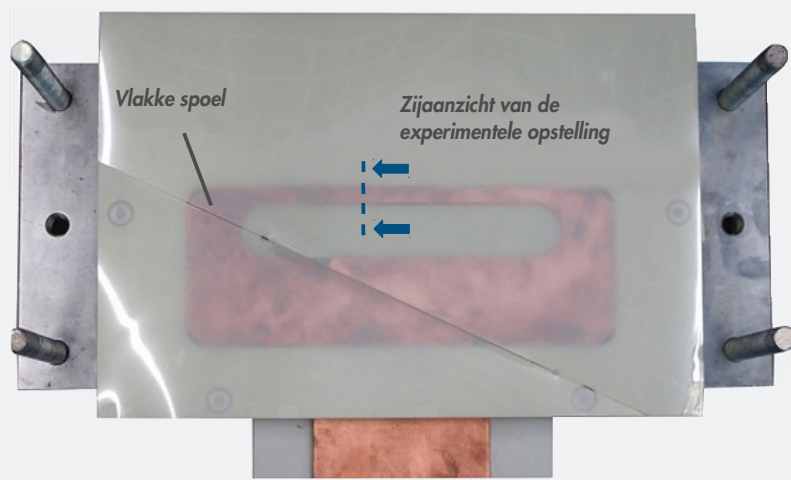
Over het algemeen biedt het elektromagnetisch pulslas van plaatmateriaal een grotere uitdaging in vergelijking met het lassen van buismateriaal, wegens de niet-uniforme magnetische



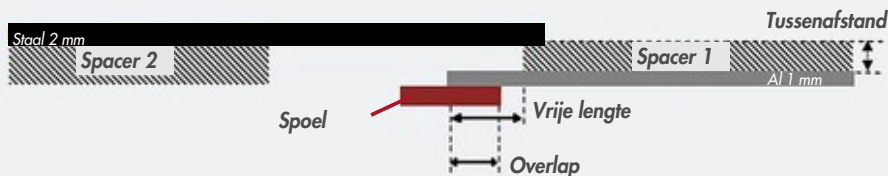
**Figuur 1:** Magnetisch pulslas van buisvormige stukken



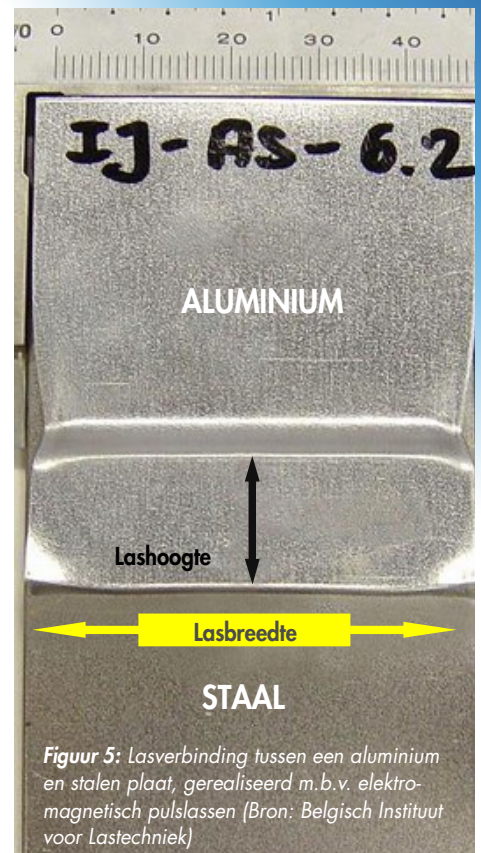
**Figuur 2:** Magnetisch pulslas van plaatvormige stukken (Bron: Application of magnetic pulse welding for aluminium alloys and SPCC steel sheet joints. T. Aizawa et al)



**Figuur 3:** Vlakke spoel aangewend voor het elektromagnetisch pulslas van plaatvormige stukken (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



**Figuur 4:** Zijaanzicht van de experimentele opstelling van het elektromagnetisch pulslas van aluminium aan staalplaten (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



**Figuur 5:** Lasverbinding tussen een aluminium en staal plaat, gerealiseerd m.b.v. elektromagnetisch pulslas (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

velden die gegenereerd worden, afhankelijk van de positie in de plaat. Hierdoor is de controle over het magnetische veld bij het lasen van plaatvormige stukken veel moeilijker dan voor het lasen van buisvormige componenten, waarbij wel een uniform magnetisch veld ontwikkeld wordt rondom de omtrek van buisvormige componenten. Het elektromagnetisch pulslas van plaatmaterialen is een relatief onbekend gebied waar nog veel innovatieve ontwikkelingen mogelijk zijn. **Figuur 3** toont de vlakke spoel die aangewend wordt voor het lasen van plaatvormige stukken. **Figuur 4** illustreert het zijaanzicht van de experimentele opstelling gebruikt voor het lasen van aluminium aan staal. Wanneer een stroom door de spoel loopt, wordt een elektromagnetische kracht ontwikkeld die het gedeelte van de aluminium plaat overlappend met de spoel tegen de staalplaat laat impacteren. De twee platen worden gescheiden door middel van de zogenaamde 'spacers'. Op deze manier wordt een tussenafstand gecreëerd tussen beide platen (stand-off). Deze afstand, samen met de vrije lengte (**Figuur 4**), bepaalt de hoek en de snelheid waarmee de aluminium plaat tegen de staalplaat impacteert. De impacthoek en -snelheid bepalen op hun beurt de kwaliteit van de lasverbinding.

#### Elektromagnetische pulslasverbindingen aluminium-staal

Het verbinden van aluminium (EN AW 1050-H14, plaatdikte 1 mm) aan staal (S235JR, plaatdikte 2 mm) werd onderzocht met behulp van het elektromagnetische pulslasproces. Hierbij werden verschillende reeksen experimenten uitgevoerd, waarbij drie parameters werden gevarieerd, namelijk het energieniveau, de tussenafstand tussen de te lassen

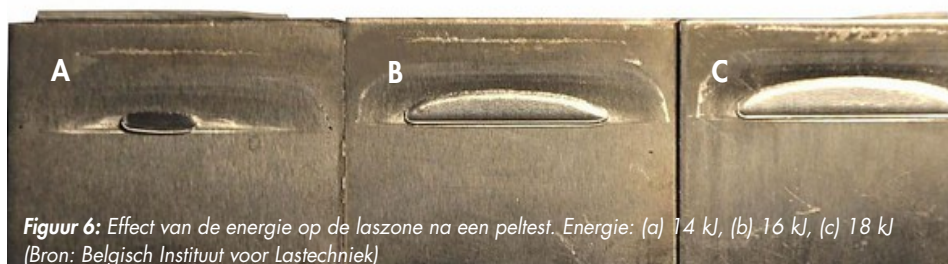
platen en de overlap tussen de spoel en de aluminium plaat. De aluminium-staal-verbindingen werden eerst visueel onderzocht, vervolgens metallografisch geanalyseerd en ten slotte werd de treksterkte bepaald via afschuifrekproeven. **Figuur 5** toont een typische lasverbinding tussen een aluminium en een staal plaatje. Afhankelijk van de geselecteerde lascondities, werd een laszone met een bepaalde lasbreedte en lashoogte verkregen. Om de niet-gelaste gebieden te identificeren en zo de daadwerkelijke vorm van de laszone te onderscheiden, werden de twee platen handmatig van elkaar gescheiden (peltest). **Figuur 6** toont een overzicht van drie beproefde lasverbindingen, gerealiseerd met dezelfde tussenafstand en overlap tussen spoel en aluminium plaat, maar met drie verschillende energieniveaus: van links naar rechts: 14, 16 en 18 kJ. Een verhoging van de energie leidt tot een groter gegenereerd magnetisch veld, wat zich vertaalt in zowel een grotere lasbreedte als een grotere lashoogte. **Figuur 7** toont een typische metallografische doorsnede van een aluminium-staalverbinding, in het centrum van de laszone. Een detail van deze doorsnede opgenomen met een rasterlektronenmicroscop, wordt weergegeven in **Figuur 8**. De aanwezigheid van een intermetallische laag met een dikte van ongeveer 20  $\mu\text{m}$  kan worden verklaard op twee manieren. Een eerste verklaring is dat de energie gegenereerd tijdens impact van de twee platen een zeer lokale temperatuurverhoging tot gevolg heeft, die aan de lasinterface voldoende is om het aluminium en het staal te laten smelten. Vervolgens ontstaat tijdens de snelle afkoeling en stolling een intermetallische laag. Een tweede verklaring voor het ontstaan van deze laag is een mechanische vermenging van het aluminium en het staal in een

viskeus-plastische toestand en de intense plastische vervorming tijdens de impact van de twee platen. Wanneer niet optimale lasparameters worden gebruikt, kunnen porositeiten en scheurtjes ontstaan in de las, zoals getoond in **Figuur 8**. De porositeiten in de intermetallische laag zijn het gevolg van lokale smeltfenomenen in de lasinterface. De transversale scheurtjes in de intermetallische laag ontstaan ten gevolge van schuifspanningen, die onder andere gegenereerd worden door het verschil in de thermische expansiecoëfficiënt van aluminium en staal. Wanneer deze afschuifspanningen de sterkte van de intermetallische laag overschrijden, kunnen transversale microscheuren optreden. De verbindingen werden beproefd via afschuifrekproeven. **Figuur 9** toont de maximaal behaalde trekkracht i.f.v. het energieniveau, voor de verschillende niveaus van de tussenafstand en de overlap. Over het algemeen verhoogt de treksterkte naarmate het energieniveau toeneemt. Dit kan worden verklaard door de grotere laszone, zoals geïllustreerd in **Figuur 6**. Eveneens resulteert een verhoging van de overlap in een hogere treksterkte, aangezien een grotere lashoogte bekomen wordt. Ten slotte leidt een vermindering van de tussenafstand van 3 naar 2 mm doorgaans tot een verhoging van de treksterkte. Dit kan worden verklaard door de hogere impactsnelheid die bekomen wordt bij een tussenafstand van 2 mm. Een tussenafstand van 3 mm was in dit geval te groot, wat leidt tot een te lage snelheid op het moment van impact. In conclusie wordt de hoogste treksterkte van 4,6 kN behaald bij een energieniveau van 18 kJ, een overlap van 10 mm en een tussenafstand van 2 mm, aangezien bij deze lascondities de grootste laszone verkregen werd.

#### Wrijvingspuntlassen

##### Algemeen werkingsprincipe en voordelen

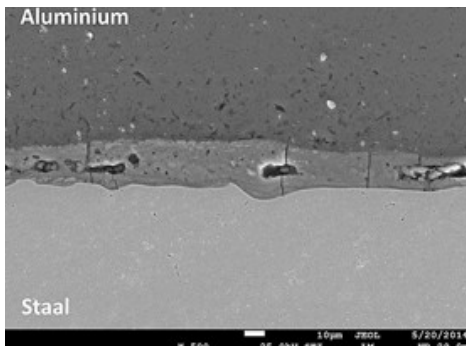
Wrijvingspuntlassen is een nieuw 'solid state'-lasproces, dat kan worden gebruikt voor overlapverbindingen tussen gelijksoortige en ongelijksoortige materialen. De lascyclus wordt uitgevoerd met behulp van een speciale tool, waarmee de verbinding tot stand gebracht wordt via wrijvingswarmte en mechanische vervorming. Het resultaat is een puntlasverbinding, zonder materiaalverlies of eindkrater. Een ander voordeel van het proces



**Figuur 6:** Effect van de energie op de laszone na een peltest. Energie: (a) 14 kJ, (b) 16 kJ, (c) 18 kJ (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



**Figuur 7:** Metallografische doorsnede van een aluminium-staallasverbinding (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



**Figuur 8:** Detail van een aluminium-staallasverbinding: intermetallische laag met porositeiten en transversale scheuren (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

is de korte lastijd. Het is bovendien een ecologisch proces: er worden geen toevoegmaterialen of beschermingsgassen gebruikt en er komt geen lasrook of IR- of UV-straling vrij tijdens de lascyclus. Het wrijvingspuntlastoestel aanwezig in het BIL wordt getoond in **Figuur 10**.

#### Experimentele opstelling voor het wrijvingspuntlassen van platen

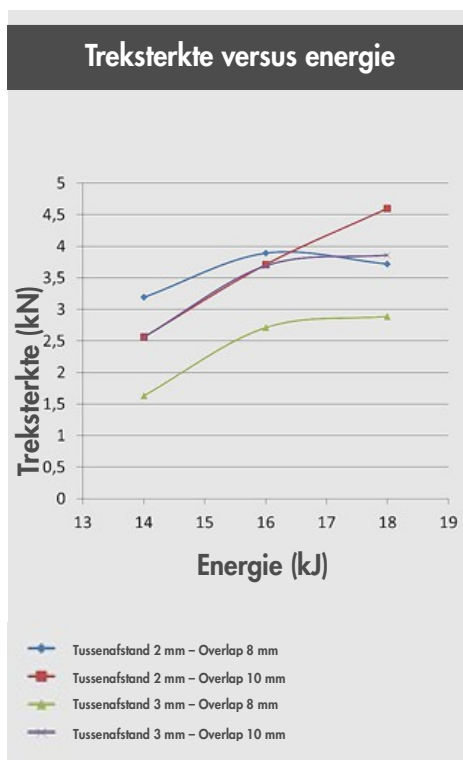
**Figuur 11** toont het proces van wrijvingspuntlassen. Eerst worden een pin en een huls (sleeve) gerooteerd (**Figuur 11a**). De huls maakt het materiaal plastisch, en komt terecht in de ruimte binnen in de huls. De pin beweegt hierdoor naar boven (**Figuur 11b**). Bij een voldoende penetratiediepte wordt de roterende huls teruggetrokken en duwt de pin het plastische materiaal in de laszone (**Figuur 11c**) om de verbinding te creëren (**Figuur 11d**).

#### Wrijvingspuntlasverbindingen aluminium-staal

Het verbinden van aluminium (EN-AW 5182, plaatdikte 2 mm) aan platen gegalvaniseerd staal (MS-W1200 ZE50/50, plaatdikte 1,5 mm) wordt onderzocht met behulp van wrijvingspuntlassen. Hierbij worden drie parameters gevarieerd, namelijk de rotatiesnelheid, de indringdiepte en de lastijd. De gerealiseerde aluminium-staalverbindingen werden eerst visueel onderzocht, vervolgens metallografisch geana-

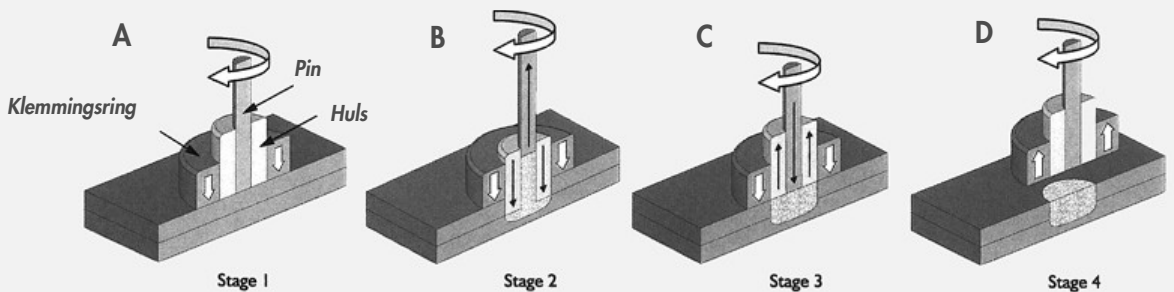


**Figuur 10:** Wrijvingspuntlastoestel aanwezig in het Belgisch Instituut voor Lastechniek



**Figuur 9:** Treksterkte versus energie voor aluminium-staallasverbindingen met elektromagnetisch pulslas (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

lyseerd en ten slotte werd de treksterkte bepaald. Een wrijvingspuntlas bestaat uit drie zones met verschillende microstructuren: de warmte-beïnvloede zone, de thermo-mechanisch beïnvloede zone en de laslens. De belangrijkste lasfouten zijn een onvoldedige vulling van de las, porositeiten en bindingsfouten, en een ringvormige groef aan het bovenoppervlak van de las. **Figuur 12** toont de metallografische doorsnede van een typische wrijvingspuntlas in ongeëtsde (**Figuur 12a**) en geëtsde toestand (**Figuur 12b**) respectievelijk. Deze las bezit het grootste bindingsoppervlak tussen het aluminium en het staal en ook de hoogste trekkracht (9,5 kN). De microstructuur vertoont een vergrote korrelstructuur in zowel het bovenste en het middelste gedeelte van de laslens (**Figuur 12c**) als aan het scheidingsvlak tussen de twee platen (**Figuur 12d**). De korrelgrootte neemt toe naarmate er meer warmte gegenereerd wordt tijdens de lascyclus, door een verhoging van de lastijd, indringdiepte of rotatiesnelheid. 'Element mapping' van Fe, Al en Zn toont aan dat een verlaagde aluminiumconcentratie en een verhoogde zinkconcentratie aanwezig zijn in de microstructuren getoond in **Figuur 12c** en **d**. De aanwezigheid van Zn in het Al kan mogelijk worden verklaard door de diffusie van Zn, dat afkomstig is uit de deklaag van het staal. Deze Zn-diffusie aan het scheidingsvlak wordt geïnitieerd door de materiaalstromingen ontstaan door de beweging van de huls en de pin.

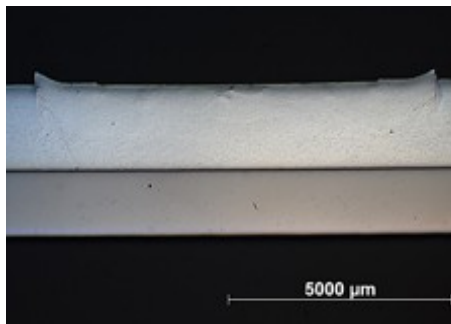


**Figuur 11:** Wrijvingspuntlasproces (Bron: Hemholtz-Zentrum Geesthacht, Duitsland)

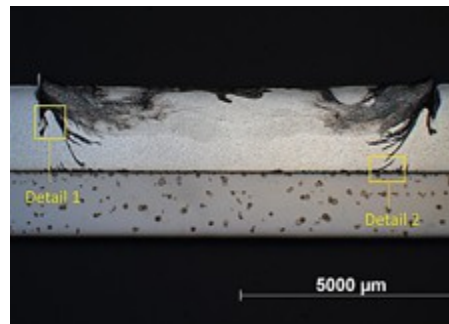
Voorts vond Zn-diffusie ook plaats in zones naast de laslens, meer bepaald in het scheidingsoppervlak onder de klemring, dit ten gevolge van de hoge druk uitgeoefend door de klemmingsring en de warmte gegenereerd in de laslens. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het bindingsoppervlak tussen de twee platen gevormd wordt tussen het aluminium en de Zn-deklaag van het staal. Een sterkere diffusie van Zn in het aluminium kan ook resulteren in een groter bindingsoppervlak en bijgevolg in een verhoogde treksterkte.

#### PROJECT MECHJOIN

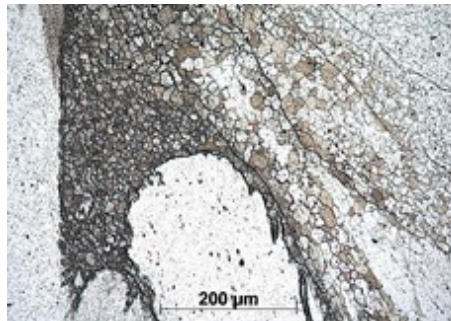
Het Europese Cornet project MECHJOIN handelt over het mechanisch verbinden van hoogsterktematerialen met een beperkte ductiliteit. Sommige geavanceerde lichtgewichtmaterialen, zoals hoogsterktealuminium- of -magnesiumlegeringen, zijn in tegenstelling tot staal niet thermisch lasbaar, aangezien zowel de statische als de vermoeiingsweerstand van de verbindingen aangetast wordt. Er is aldus een behoefte aan meer geschikte verbindingstechnieken met een lage warmte-inbreng om deze materialen op een kwalitatieve manier te verbinden. Ook ongelijksoortige materiaalcombinaties zullen in dit project worden bestudeerd. De focus in MECHJOIN ligt op twee mechanische en dus 'koude' verbindingstechnieken (clinchen en zelfponsend rivetteren) voor hoogsterkteleichtgewichtmaterialen. Wanneer men echter deze minder ductiele materialen verbindt, zullen ten gevolge van lokale hoge spanningconcentraties zichtbare scheurtjes optreden. De technische doelstelling van MECHJOIN is bijgevolg het opstellen van richtlijnen hoe deze scheuren kunnen worden vermeden of welke scheuren (grootte, aantal, oriëntatie ...) toelaatbaar zijn met betrekking tot de gewenste verbindingseigenschappen. Hierdoor kan het toepassingsgebied van het mechanisch verbinden worden uitgebreid naar hoogsterkteleichtgewichtmaterialen, omdat het mogelijk zal zijn om die effectiever te verbinden met andere materialen en componenten. In het kader van dit project werkt het BIL aan de karakterisatie van het scheurgedrag van de verbindingen in functie van de procesparameters: de locatie van de scheurinitiatie, de richting van de scheurpropagatie en de finale grootte van de scheurtjes. In eerste instantie wordt niet-destructief en metallografisch onderzoek uitgevoerd om de zichtbare scheuren te karakteriseren. Vervolgens wordt een beperkt aantal clinchverbindingen mechanisch beproefd. Deze resultaten zullen waardevolle kennis opleveren betreffende de invloed van de procesparameters en de matris-



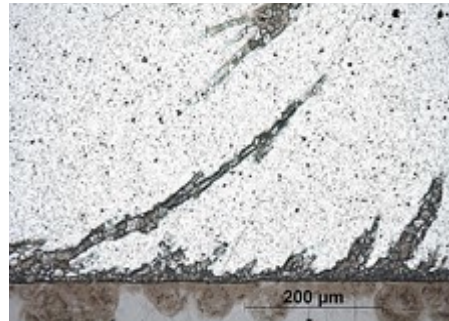
**Figuur 12: (a)** Ongeëitste metallografische doorsnede van een aluminium-staal-lasverbinding



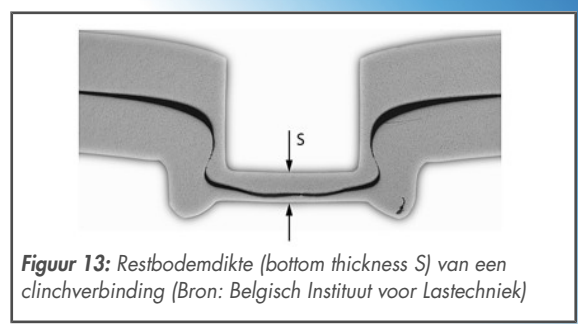
**Figuur 12: (b)** Geëitste metallografische doorsnede van een aluminium-staal-lasverbinding (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



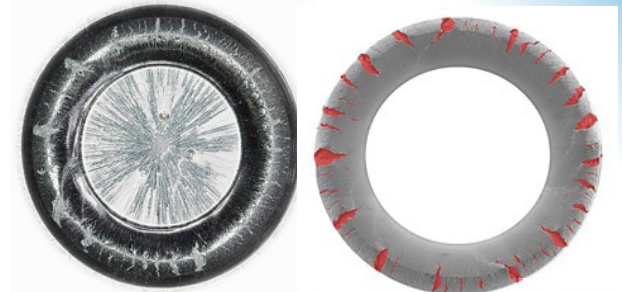
**Figuur 12: (c)** Detail van Figuur 12b: linkse gedeelte van de laslens



**Figuur 12: (d)** Detail van Figuur 12b: scheidingsvlak tussen aluminium en staal



**Figuur 13:** Restbodemdikte (bottom thickness  $S$ ) van een clinchverbinding (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)



**Figuur 14:** Macroscopisch beeld van een aluminium clinchverbinding: onderaanzicht van Figuur 13 (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

**Figuur 15:** Scheurdichtheidsbepaling van een aluminium clinchverbinding (bottom thickness  $S = 0,98$  mm) (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)

geometrie op het scheurgedrag, om zo de scheurfenomenen bij deze brosse materialen te voorkomen. Dit artikel zal in het bijzonder dieper ingaan op de tot nu toe behaalde resultaten over aluminium-clinchverbindingen. Het MECHJOIN consortium bestaat uit het BIL, KU Leuven Campus Gent, Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology (Dresden, Duitsland), de Technische Universiteit in Dresden (Duitsland) en EFB (Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung) in Hannover, Duitsland. Het project wordt uitgevoerd met steun van het IWT (Agentschap voor Innovatie door Wetenschap en Technologie).

## Clinchen

### Algemeen werkingsprincipe en voordelen

Clinchen (of drukvoegen) is een zeer betrouwbare verbindingstechniek voor ductiele materialen in plaatvorm, en wordt meer en meer toegepast in de transportsector, machine- en apparatenbouw en metaalproducten. Bij het clinchen worden de te verbinden platen lokaal sterk plastisch vervormd, zodat er een mechanisch connectie ontstaat. Deze connectie komt tot stand met behulp van een-

voudige gereedschappen: een stempel, een matrijs en eventueel een stripper. Voordelen van het clinchen zijn de lage aanschaft- en operatiekosten, het weinig voorbereidingswerk, het veilige en milieuvriendelijke karakter van het proces en de reproduceerbaarheid.

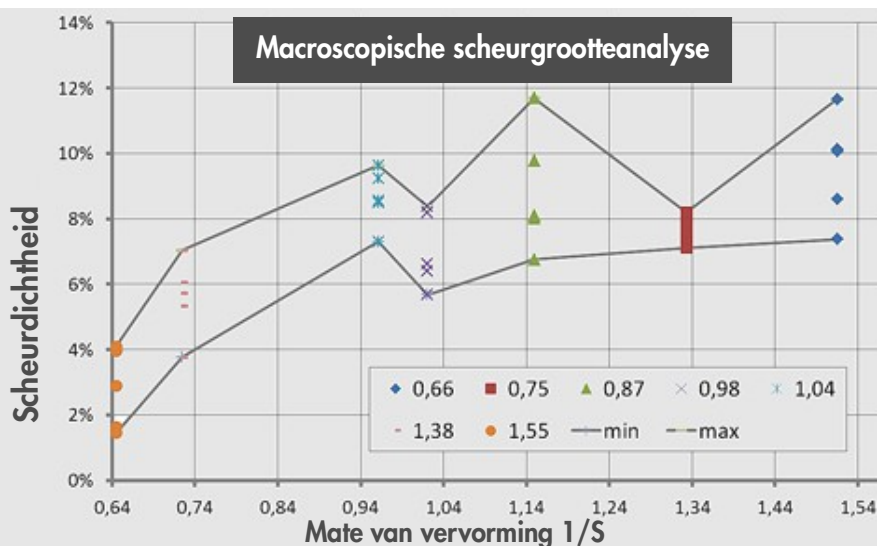
### Clinchverbindingen aluminium-aluminium

In een eerste fase werden aluminium clinchverbindingen (EN AW-6082-T6) niet-destructief bestudeerd d.m.v. macroscopisch onderzoek (Figuur 14) en door onderzoek met een raster-elektronenmicroscop (Figuur 15), om de scheurdichtheid in functie van de vervorming te karakteriseren. Voor verschillende instellingen van de vervorming werden telkens vijf proefstukken onderzocht. De restbodemdikte (de zogenaamde bottom thickness  $S$  in Figuur 13) is omgekeerd evenredig met de opgelegde vervorming tijdens het proces. Uit de resultaten van het niet-destructief onderzoek kan worden geconcludeerd dat de scheurdichtheid toeneemt en de restbodemdikte afneemt voor een toenemende indrukking (Figuur 16). Bij een restbodemdikte van 1,04 en 1,38 mm werd een gemiddelde scheurdichtheid van respectievelijk

8,64 en 5,58% opgemeten. Wanneer de indrukking nog toeneemt, stijgt de scheurdichtheid minder snel vanaf een drempelwaarde van de restbodemdikte (hier: 0,98 mm). In de toekomst zal metallografisch worden onderzocht of ook de scheurdiepte niet meer drastisch toeneemt vanaf een bepaalde drempelwaarde van de restbodemdikte. Hiertoe zullen verschillende clinchverbindingen zowel in de langs- als de dwarsrichting worden onderzocht, om de scheurdiepte en de aanwezigheid van inwendige scheuren te karakteriseren in functie van de restbodemdikte. □

## OPROEP TOT DEELNAME AAN DEZE ONDERZOEKSPROJECTEN

Uit het voorgaande mag duidelijk worden dat deze ontwikkelingen in het lasgebeuren nieuwe mogelijkheden bieden voor de realisatie van kwaliteitsvolle ongelijksortige verbindingen. De keuze van de meest geschikte techniek is afhankelijk van de toepassing, seriegrootte en aard van de verbinding (puntlas, overlap, of stomplas). Momenteel is er onvoldoende objectieve kennis beschikbaar omtrent de technische haalbaarheid van het gebruik van deze processen voor bepaalde materiaalcombinaties of producten, noch over de te behalen laskwaliteit, of over het economisch voordeel dat de inzet van deze innovatieve processen voor de industrie kan betekenen. Deze projecten zullen inzichten verschaffen in deze verbindingstechnologieën voor het verbinden van ongelijksortige materialen, en zullen bedrijven in staat stellen de geschikte verbindingstechnologie voor hun product te identificeren. Tijdens deze projecten wordt ook een aantal representatieve cases uitgewerkt, op basis van de inbreng van de deelnemende bedrijven. Deze projecten kunnen worden opgevolgd door geïnteresseerde bedrijven. De volgende infodag is gepland op 9 oktober a.s. Indien u interesse heeft in deze onderzoeksprojecten, kunt u contact opnemen met het Belgisch Instituut voor Lastechniek via contactpersoon Koen Faes op 09/292.14.00 of via [Koen.Faes@bil-ibs.be](mailto:Koen.Faes@bil-ibs.be).



**Figuur 16:** Scheurdichtheid versus de mate van vervorming ( $S$ : bottom thickness) (Bron: Belgisch Instituut voor Lastechniek)