

Informatie omtrent het elektromagnetisch hogesnelheidsvervormings- en lasproces (magnetisch puls lassen, vormen en krimpen)

Inleiding

Elektromagnetisch hoge-snelheidsvervormen-, opkrimpen en lassen, ook bekend onder de benamingen magnetisch puls vormen, opkrimpen en lassen zijn vrijwel onbekende technieken, die gebaseerd zijn op het zelfde werkingsprincipe, namelijk het gebruik van elektromagnetische krachten om werkstukken te vervormen of te lassen. Aangezien het magnetisch puls lassen **geén gebruik maakt van warmte**, maar van druk, om een verbinding tot stand te brengen biedt ze belangrijke voordelen t.o.v. de conventionele lastechnieken. Ook de elektromagnetische vervormingstechnieken vertonen opmerkelijke voordelen t.o.v. de conventionele vervormingstechnieken.

Magnetisch Puls Lassen (Magnetic Pulse Welding)

Werkingsprincipe ^{[1], [2], [3]}

Magnetisch puls lassen behoort tot de groep van de druklasprocessen. Bij deze lasprocessen kan een metaalverbinding verwezenlijkt worden tussen twee atomair zuivere oppervlakken, door ze tegen elkaar te drukken. Magnetisch puls lassen is een druklasproces waarbij de vervorming gebeurt aan een hoge snelheid, net zoals bij het explosielassen. De ontdekking dat twee metalen delen met elkaar kunnen verbonden worden door één ervan te versnellen tot een zeer hoge snelheden met behulp van explosieven, dateert van de jaren '40. Dit proces is bekend onder de naam explosielassen en werd voornamelijk in de USSR onderzocht.

Het werkingsprincipe van het magnetisch puls lassen is gelijkaardig aan dit van het explosielassen, doch de explosieve kracht wordt gegenereerd op een veilige manier, door elektromagnetische krachten, opgewekt door een spoel. Het magnetisch puls lasproces is een "solid-state" lasproces, wat betekent dat het materiaal niet tot smelten gebracht wordt tijdens de lascyclus. Het proces gebruikt druk en geen warmte, zodat alle conventionele lasproblemen ten gevolge van de warmtecyclus en het verlies van materiaaleigenschappen vermeden worden.

Het basisprincipe wordt geschetst in Figuur 1. Een spoel wordt over de te lassen werkstukken geplaatst, maar maakt er geen contact mee. Tijdens de lascyclus wordt een zeer grote hoeveelheid elektrische energie vrijgegeven in een zeer korte tijdspanne. Sommige systemen kunnen maar liefst 2 miljoen ampères ontladen in slechts 100 microseconden. De hoge energiestroom loopt door de spoel en deze stroomontlading induceert wervelstromen (de zogenaamde "eddy currents") in het uitwendige werkstuk. Beide stromen wekken een magnetisch veld op, die elkaar tegenwerken (zie Figuur 2).

De afstoting tussen beide magneetvelden ontwikkelt een kracht, die het uitwendige werkstuk met grote snelheid versnelt in de richting van het inwendige werkstuk. De snelheid waarmee het uitwendige werkstuk impacteert bedraagt meer dan 1000 km/h. De ontwikkelde drukken bij impact kunnen oplopen tot 100.000 MPa. Eventuele oppervlakte-verontreinigingen worden door de botsing van de twee materialen verwijderd, waardoor een atomair zuiver metaalcontact ontstaat. De atomen van de materialen worden met zo'n kracht tegen elkaar gestuwd dat hun natuurlijke

[1]: V. Shribman, Pulsar Ltd. Magnetic pulse technology for improved tube joining and forming. Tube & Pipe, Nov.-Dec. 2006, p. 91-95.

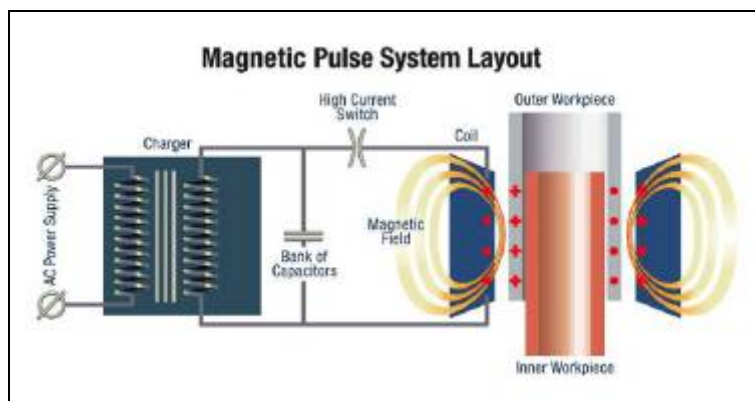
[2]: A. Tomokatsu, M. Kashani. Magnetic pulse welding (MPW) Method for Dissimilar Sheet Metal Joints. Tokyo Metropolitan college of Technology, Department of Electronic and Information Engineering, Tokyo, Japan.

[3]: B-T. Spitz, V. Shribman. Magnetic pulse welding for tubular applications: Discovering new technology for welding conductive materials. The Tube & Pipe Journal, Juli 2001.

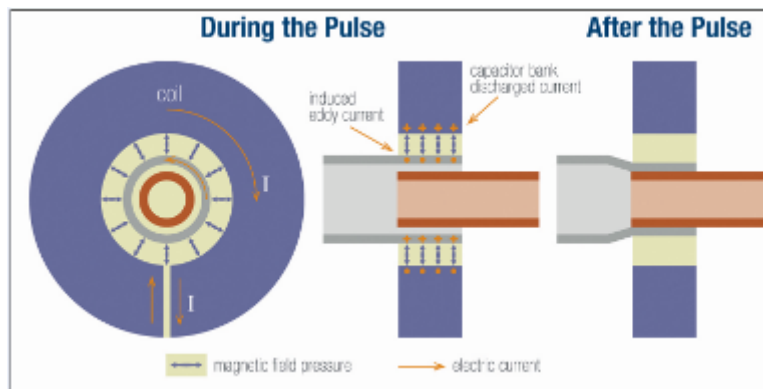
afstotingskrachten overwonnen worden en er een stabiele evenwichtstoestand en een metaalbinding verkregen wordt.

De magnetische krachten veroorzaken een blijvende vervorming, zonder terugveren van het werkstuk. De las is in de meeste gevallen sterker dan het zwakste materiaal. Deze lastechniek werkt het best met materialen met hoge geleidbaarheid; minder geleidende materialen vereisen een hogere energie. Het macrobeeld van de lasdoorsnede vertoont veel gelijkenissen met dit van een explosie-gelaste verbinding.

Het proces kan gebruikt worden voor het verbinden van buisvormige producten in de overlap-configuratie. De beperkte generatie van warmte 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 op heden zijn maar een klein aantal materiaalcombinaties onderzocht.



Figuur 1 : Principe van het magnetisch puls lassen ^[4]

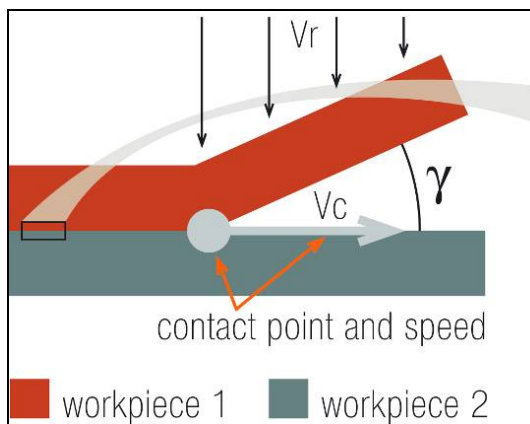


Figuur 2 : Principe van het lassen van buisvormige producten via magnetisch puls lassen ^[4]

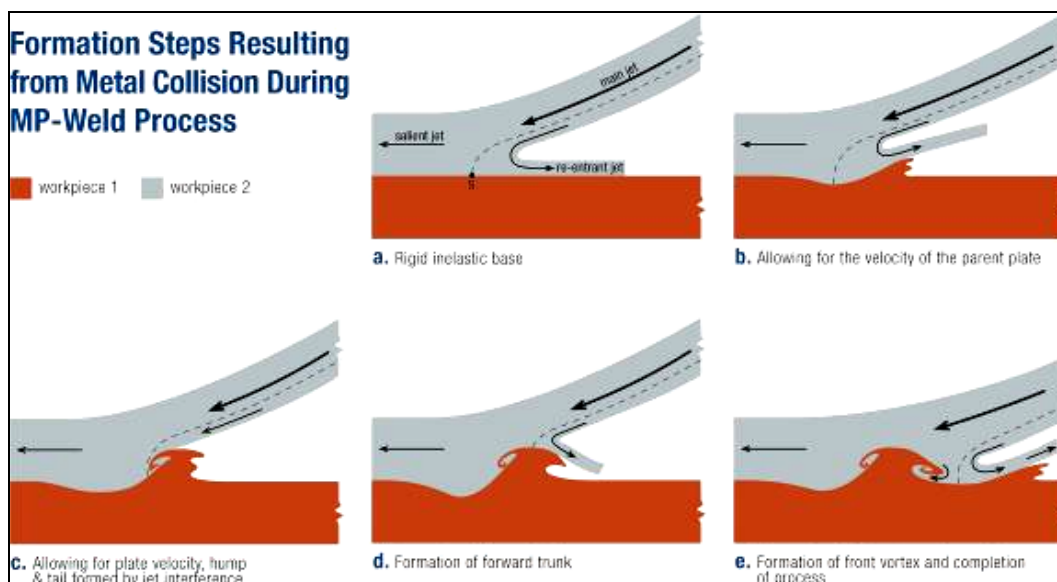
De belangrijkste parameters van het proces worden getoond in Figuur 3, meer bepaald de radiale snelheid V_r , de hoek van impact γ en de impactsnelheid V_c . Deze parameters moeten gelegen zijn binnen bepaalde grenzen om de optimale lascondities te verkrijgen. Zoals bij explosielassen wordt een "jet" gecreëerd in het contactvlak tussen de te lassen oppervlakken. De jetwerking zorgt ervoor dat verontreinigingen (oxides, oppervlaktelagen) verwijderd worden, zodat er een zuiver contact ontstaat tussen de oppervlakken. De atomen van contactoppervlakken worden met een zeer hoge druk samengebracht tot op zeer korte afstand, zodat er atoombindingen ontstaan. Er zijn verschillende theorieën omtrent het precieze bindingsmechanisme. Er wordt aangenomen dat de materialen zich kortstondig in een viskeuze toestand bevinden. Tengevolge van de snelheid van het proces stijgt de temperatuur niet significant. Om deze reden is het mogelijk om een binding te realiseren tussen materialen met een verschillend smeltpunt.

[4] : Figuren : Pulsar Ltd.

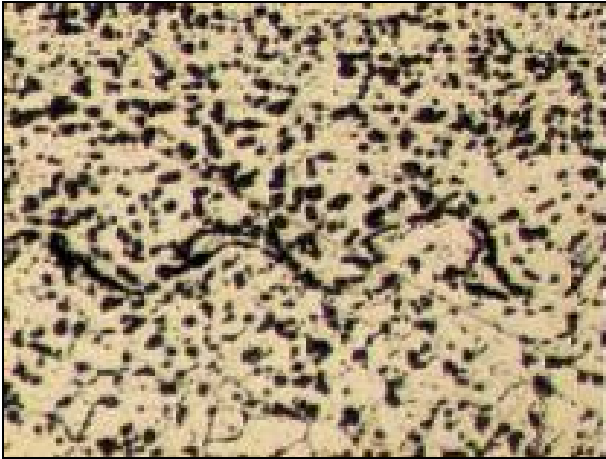
De kwaliteit van de las is het resultaat van verschillende parameters, zoals de magnetische kracht, de hoek van impact en de initiële spleetbreedte tussen het inwendige en uitwendige werkstuk. De binding vertoont al dan niet een golfvormig patroon, afhankelijk van de materialen en toegepaste parameters. Het ontstaan van het golfvormige patroon wordt schematisch voorgesteld in Figuur 4. Typische lasdoorsneden worden getoond in Figuur 5 en Figuur 6.



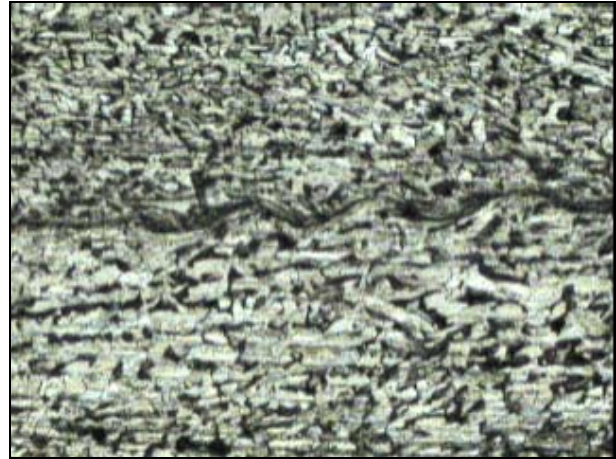
Figuur 3 : Parameters van het magnetisch puls lasproces ^[5]



Figuur 4 : Ontstaan van de metaalbinding bij magnetisch puls lassen ^[5]



Figuur 5 : Lasdoorsnede van een verbinding in aluminium^[5]



Figuur 6 : Lasdoorsnede van een verbinding in staal^[5]

De oplaadtijd van de capaciteiten voor het lassen zijn afhankelijk van de toepassing en de ervoor benodigde energie. De typische oplaadtijd bedraagt ongeveer 3 sec voor kleine toepassingen tot 9 sec voor toepassingen waarvoor een grote hoeveelheid energie vereist is.

Tijdens het lassen ontstaan naast de radiaal gerichte krachten ook axiaal gerichte krachten, tengevolge van de hoek waaronder de impact gebeurt. De grootte van deze kracht is slechts een gedeelte van de radiaal gerichte kracht, en kan opgevangen worden door de machine.

Het magnetisch puls lassen is enigszins vergelijkbaar met het explosielassen. De lasdoorsnede ziet er voor beide lasprocessen gelijkaardig uit, doch bij het explosielassen liggen de vervormingssnelheden gevoelig hoger. Voor het bestuderen van het proces kan er in een eerste fase beroep gedaan worden op de beschikbare literatuur inzake explosielassen. Daarnaast moet er voor het snel op peil brengen van de kennis omtrent de magnetisch geïnduceerde las- en vervormingsprocessen een literatuuronderzoek uitgevoerd worden naar deze technieken.

Voordelen van magnetisch puls lassen

- 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.
- Geen speciale voorbereidingen van de werkstukken voorafgaandelijk aan het lassen zijn vereist. Ontvetten van de werkstukken wordt aangeraden. Voor systemen met grote energie is de werkstukvoorbereiding minder kritisch dan bij systemen met lage energie.
- Magnetisch puls lassen laat een beter en eenvoudiger ontwerp van de te lassen stukken toe.
- In vergelijking met klassieke lasprocessen, is het magnetisch puls lasproces een "koud" lasproces. Enkel door wervelstromen gaat het proefstuk opwarmen, deze opwarming zou evenwel beperkt blijven tot 50°C. Hierdoor wordt er geen warmte-beïnvloede zone gecreëerd, en verliest het materiaal zijn eigenschappen niet. Dit betekent ook dat de werkstukken onmiddellijk na het lassen kunnen ontklemd en verder bewerkt worden.
- Hoge productiesnelheid, soms tot 10 stukken per minuut.
- Het is een ecologisch lasproces, aangezien geen warmte, straling, gas of lasrook geproduceerd worden.

Toepassingen van magnetisch puls lassen

Het proces kan bijvoorbeeld gebruikt worden voor het lassen van een afsluitdeksel aan buisvormige recipiënten. Een overlapverbinding van een koperen aan een aluminium buisje wordt

getoond in Figuur 7. Figuur 8 toont een airconditioning accumulator voor automobieltoepassingen, respectievelijk gelast met magnetisch puls en MIG-lassen. Deze toepassing toont aan dat magnetisch puls lasverbindingen een hoger esthetisch karakter bezitten in vergelijking met de MIG-lasverbindingen. Bovendien moeten de MIG-lassen schoongemaakt worden na het lassen. De Figuur 10 en Figuur 11 tonen typische toepassingen uit de automobielindustrie, meer bepaald een aandrijfjas en een brandstoffilter. Figuur 12 en Figuur 13 tonen een aandrijfstang gelast met het magnetisch puls lasproces.



Figuur 7 : Lasverbinding van aluminium aan koperen buisjes ^[4]



Figuur 8 : Magnetisch puls lassen versus MIG-lassen ^[4]



Figuur 9 : Magnetisch puls lassen van roestvast stalen bouten aan aluminium ring ^[5]



Figuur 10 : Aandrijfjas ^[4]



Figuur 11 : Brandstoffilter ^[4]

[5] : Victor Shribman, Magnetic Pulse Technology. BIL/NIL-Lassymposium, Brussel, 18.10.2007.

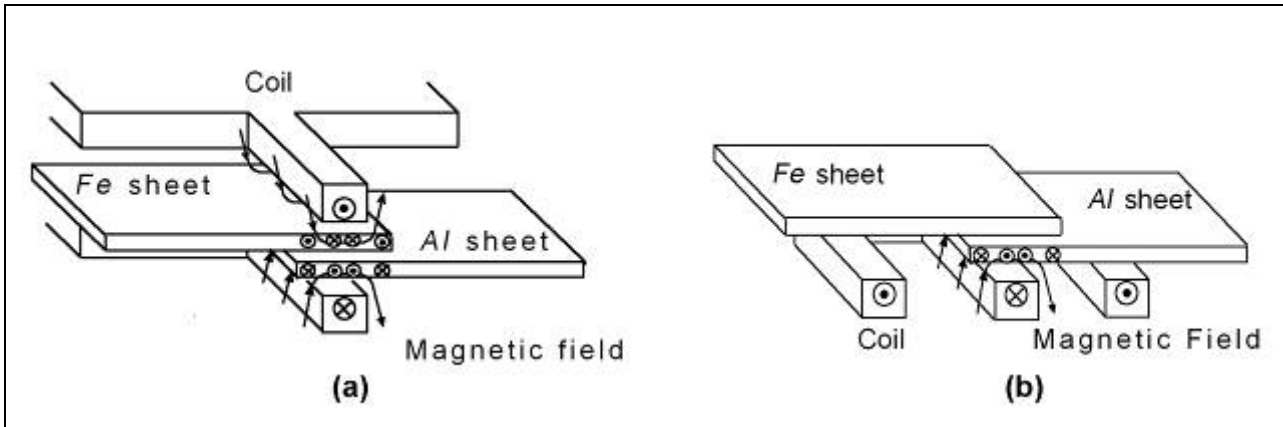


Figuur 12 : Aluminium aandrijfstang

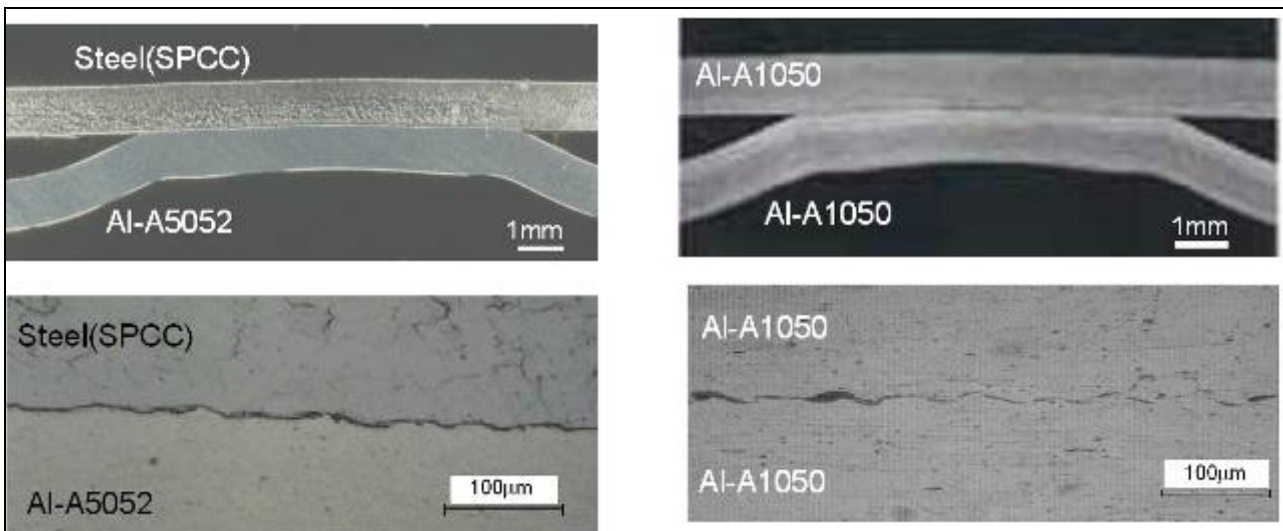


Figuur 13 : Beproeving van een magnetisch puls lasverbinding

Voorbeelden van gelaste vlakke werkstukken worden getoond in Figuur 14 en Figuur 15.



Figuur 14 : Spoelvormen : (a) : dubbele H-vormige spoel; (b) : enkele E-vormige spoel^[6]



Figuur 15 : Macroscopische opnamen van de verbindingen A1050/A1050 en A5052/SPCC^[6]

[6] : Application of Magnetic Pulse Welding for Aluminum Alloys and SPCC Steel Sheet Joints. Welding Journal, May 2007, p119s-124s.

Magnetisch Puls Vormen (Magnetic Pulse Forming)

Werkingsprincipe ^[7]

Elektromagnetisch vervormen is één van de meest attractieve hoge-snelheidsvervormingstechnieken, dat aan belang wint in de hedendaagse metaalverwerkende industrie. In deze contactloze techniek kunnen grote krachten aangebracht worden door gebruik te maken van de geïnduceerde magnetische krachten om werkstukken te vervormen. Het werkstuk wordt versneld en de kinetische energie wordt omgezet in plastische deformatie. Hoge snelheden worden hierbij bereikt, in de range van 50 tot 300 m/s.

De hoge-snelheidsvervormingstechnieken onderscheiden zich van de conventionele vervormingstechnieken door de grootte en de tijdsduur van de krachten. Bij de hoge-snelheidsvervormingstechnieken wordt een zeer hoge druk aangebracht gedurende een zeer korte tijdspanne, zodat de opgewekte inertiekrachten en de kinetische energie belangrijk zijn. Bij de conventionele vervormingstechnieken is de inertie van het werkstuk te verwaarlozen, en is de vervormingssnelheid typisch 5 m/s. ^[8]

Er wordt hierbij gebruik gemaakt van een condensatorbatterij en een spoel. Een grote hoeveelheid energie wordt opgeslagen in de condensatorbatterij (typisch tussen 5 en 200 kJ), door deze op te laden tot een hoge spanning (typisch 3000 tot 30.000 V). Wanneer de condensatorbatterij in serie geschakeld met de spoel ontlaadt, wordt een magnetisch veld van hoge intensiteit opgewekt.

Het sterke magnetische veld induceert wervelstromen in het nabij gelegen elektrisch geleidende werkstuk. Deze wervelstromen wekken een secundair magnetisch veld op in het werkstuk. De twee geleiders, de spoel en het werkstuk, stoten hierdoor mekaar af ten gevolge van de Lorentz krachten. ^[9] Wanneer de opgewekte krachten groter zijn dan de vloeigrens van het werkstuk, wordt een permanente plastische vervorming gegenereerd.

Een eerste vereiste voor het gebruik van het proces is dat het te vervormen werkstuk elektrisch geleidend moet zijn. De efficiëntie van de conversie van elektrische naar mechanische energie is functie van de elektrische geleidbaarheid van het werkstuk. Materialen met een lage elektrische geleidbaarheid vereisen een hogere energie om ze te vervormen. Een andere techniek is het gebruik van een hulpwerkstuk met een hoge geleidbaarheid. Dit hulpwerkstuk wordt aangewend om het laag-geleidende werkstuk te verplaatsen (het zogenaamde “driver” werkstuk).

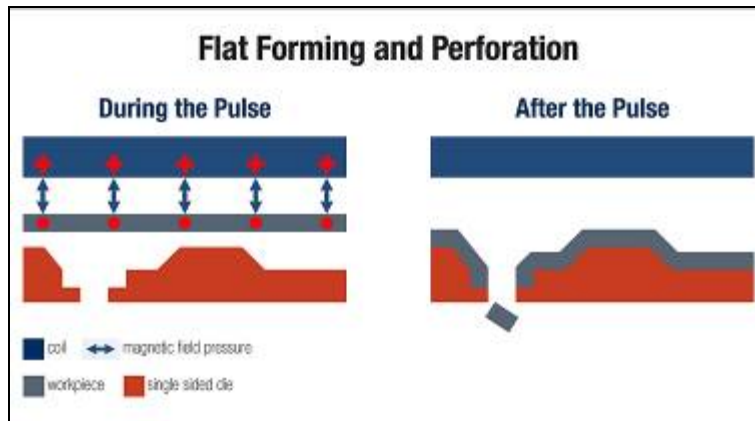
Figuur 16 illustreert het principe van het magnetisch puls vormen voor vlakke producten. Het perforeren van het plaatvormig materiaal gebeurt gelijktijdig en wordt gerealiseerd door het voorzien van een opening in de matrijs op de plaats waar de perforatie moet aangebracht worden.

Figuur 17 toont een voorbeeld van een vlakke spoel. De spoel bestaat uit een koperen draad met een diameter van 5 mm. De afstand tussen de geleiders bedraagt 2 mm.

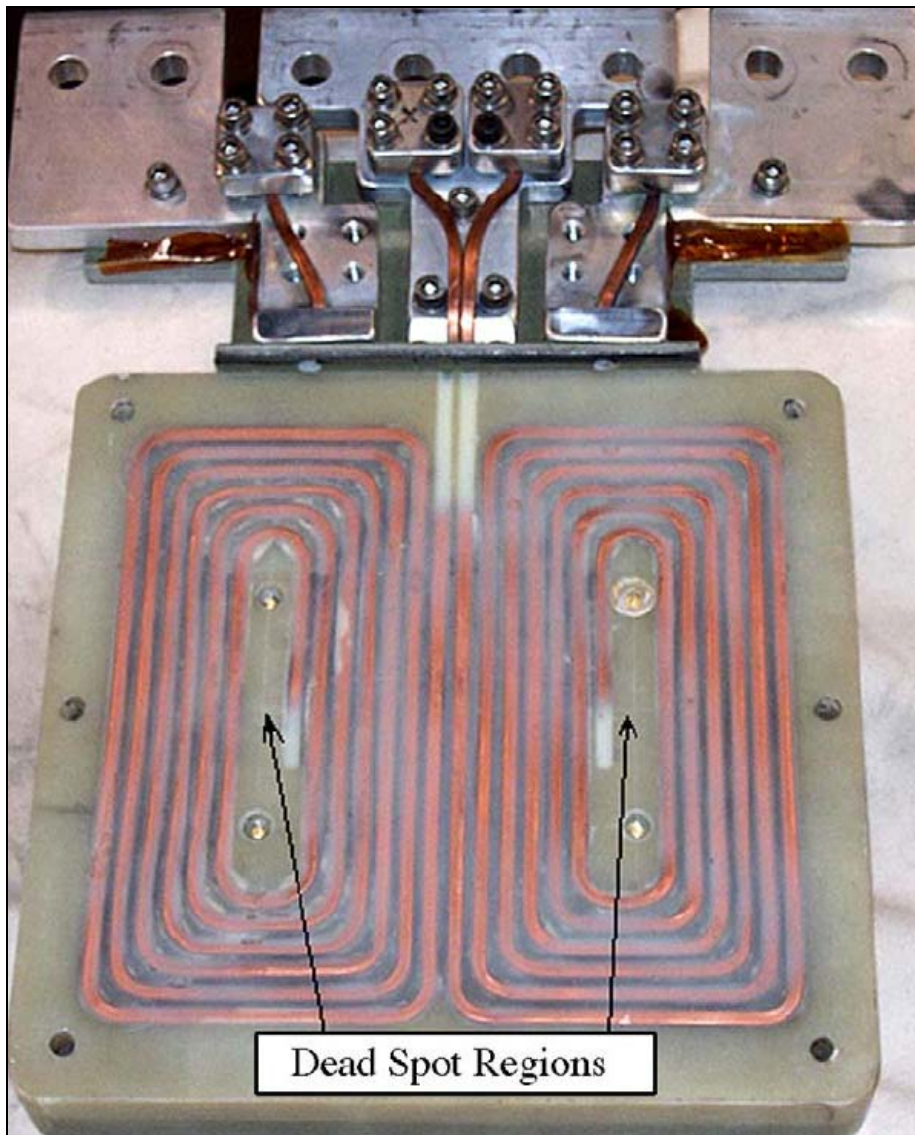
[7]: Metal stamping and electromagnetic forming: New process improves material formability, reduces wrinkling. Helen Gallagher, The Fabricator, October 25, 2001

[8]: Mala Seth Dehra, B.E, M.S. High velocity formability and factors affecting it. Dissertation. Graduate School of The Ohio State University

[9]: Jablonski J. and Winkler R., Analysis of the Electromagnetic Forming Process, Int. J. Mech. Sci., Vol. (20) (1978), pp. 315-325.



Figuur 16 : Magnetisch puls vormen en perforeren van plaatvormige producten ^[4]



Figuur 17 : Dubbele spiraalvormige spoel ^[10]

[10] : Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model. D.A. Oliveira, M.J. Worswick, M. Finn, D. Newman. Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 350–362.

Voordelen van magnetisch puls vormen

Het magnetisch puls vormen biedt een aantal voordelen t.o.v. de conventionele vervormingstechnieken :

- De vervormbaarheid van sommige materialen verbetert drastisch indien de vervorming uitgevoerd wordt bij hoge snelheid, aangezien het insnoeren van het materiaal gereduceerd wordt tengevolge van de inertie. ^[11] De vloeigrens en de ductiliteit van deze materialen neemt dus toe wanneer de vervormingssnelheid verhoogd wordt. Dit staat bekend onder de benaming “hyperplasticiteit”. ^[12] De toename van de vloeigrens wordt groter voor vervormingssnelheden boven 10^3 s^{-1} . Verschillende commerciële aluminiumlegeringen vertonen een toename van de ductiliteit van 100% wanneer deze vervormd worden aan hoge snelheid. ^[13]
In een onderzoek naar de vervormbaarheid van aluminiumlegeringen (AA6061) werden experimenten uitgevoerd waarbij het materiaal gevormd werd met behulp van een conische matrijs. Uit het onderzoek bleek dat het materiaal niet volledig kon gevormd worden indien gebruik werd gemaakt van hydraulisch vervormen (hydroforming). Bij gebruik van de magnetisch geïnduceerde vervorming was dit echter wel mogelijk (zie Figuur 18). ^[14] Soortgelijke resultaten worden besproken in ^[15].
- Lagere inwendige spanningen door de lagere wrijving in vergelijking met de conventionele mechanische vormprocessen. Bij snelle vervormingsprocessen treden bij de botsing met de matrijs hoge drukspanningen op over de dikte van het te vervormen materiaal. Door de daarmee gepaard gaande uitzetting van het materiaal in het vlak, zijn uiteindelijk lagere spanningen nodig om het materiaal tot de gewenste vervorming te brengen. Werkstukken die bij de conventionele vormprocessen een herstelbehandeling moeten ondergaan om de spanningen te relaxeren kunnen met het magnetisch puls vormproces in één bewerking gevormd worden.
- Terugveren : Evenals bij de explosieve vormtechnieken wordt bij het magnetisch puls vormen het terugveren sterk beperkt. ^{[16], [17]} Omwille van de hierboven beschreven redenen zullen ook de residuele inwendige spanningen lager zijn, zal minder terugvering optreden en kunnen rimpelproblemen vermeden worden. Een sterk verminderde terugvering vermindert eveneens de dimensionele toleranties van de gevormde werkstukken.
- Reproduceerbaarheid : Aangezien de elektrische energie in de spoelen nauwkeurig kan gecontroleerd worden is de reproduceerbaarheid zeer hoog.
- Contactloos : In tegenstelling tot de klassieke vervormingstechnieken oefent het magnetisch veld de krachten uit. Hierbij is geen smering nodig en aangezien de techniek contactloos werkt wordt beschadiging door de matrijsstempel vermeden. Materialen die voorafgaandelijk een oppervlaktebehandeling ondergaan hebben (bv. anodiseren) kunnen bijgevolg gevormd worden zonder beschadiging ervan.
- Minder rimpels : Het rimpelen van het materiaal wordt veroorzaakt door de aanwezigheid van drukkrachten in het materiaal, die het materiaal van richting doen veranderen. Bij het

[11] : R.W. Curver, in High Velocity Forming of Metals, F.W. Wilson, ed., ASTM, Prentice-Hall Inc, NJ, (1964), pp 39-76.

[12] : Balanethiram V. Hyperplasticity: enhanced formability of sheet metals at high velocity. PhD thesis, Material science and engineering. Columbus, OH, USA: The Ohio State University, 1996.

[13] : V. S. Balanethiram and Glenn S. Daehn, "Enhanced Formability of Interstitial Free Iron at High Strain Rates," Scripta Metall, et Mater., Vol. 27, 1992, pp. 1783-1788.

[14] : Balanethiram V.S. and Daehn Glenn S., Hyperplasticity: Increased Forming Limits at High Workpiece Velocity, Scripta Materialia, Vol. 30, pp515-520, 1994.

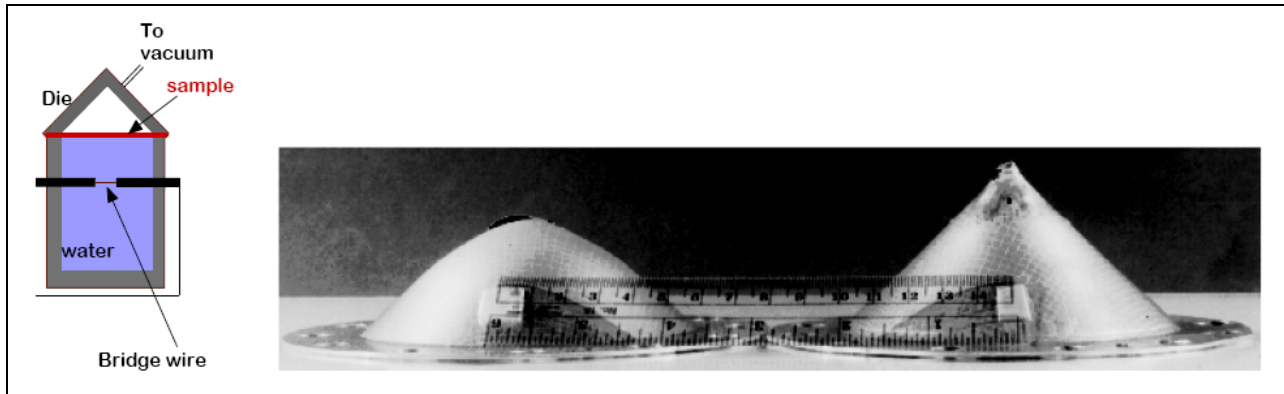
[15] : Jianhui Shang, M.S. Electromagnetically assisted sheet metal stamping. Dissertation. School of The Ohio State University, 2006

[16] : H. G. Baron and R. H.Henn, “ Springback and metal flow in forming shallow dishes by explosives”, Int. Journal of Mechanical Sciences, vol. 6, 1964, 435-444.

[17] : T. Behra, S. Misra, J. Banerjee, “ Explosive Forming with Parabolic Dies”, Indian Journal of Technology, vol.15, Sept. 1977, 365-368.

vervormen aan hoge snelheid wordt de richtingsverandering van het materiaal verhinderd door de inertiekrachten.^[18]

- Het magnetisch puls vormen vermindert de productiekost. Dit is tengevolge van de lagere apparatuurkost, de snelle bewerkingstijd, de minimale voor- en nabewerking van de werkstukken en het verminderde aantal scheuren.



Figuur 18 : Vergelijking van hydroforming en magnetisch puls vormen^[14]

Beperkingen van magnetisch puls vormen

Het proces is ook beperkt tot materialen die elektrisch geleidend zijn, zoals bijvoorbeeld koper, aluminium, brons en zacht staal. Daarentegen kunnen minder geleidende materialen gevormd worden door gebruik van aangepaste spoelen.

Toepassingen

Figuur 19 t.e.m. Figuur 22 tonen toepassingen van het magnetisch puls vormen van vlakke onderdelen. Voor de toepassing getoond in Figuur 19 worden er gelijktijdig twee openingen geperforeerd. Het snijden van buisvormige werkstukken is eveneens mogelijk, afhankelijk van het materiaal en de afmetingen (zie ook Figuur 23 op p. 12).

[18]: M. Padmanabhan, "Wrinkling and Springback in Electromagnetic Sheet Metal Forming and Electromagnetic Ring Expansion", M.S Thesis, The Ohio State University, 1997.



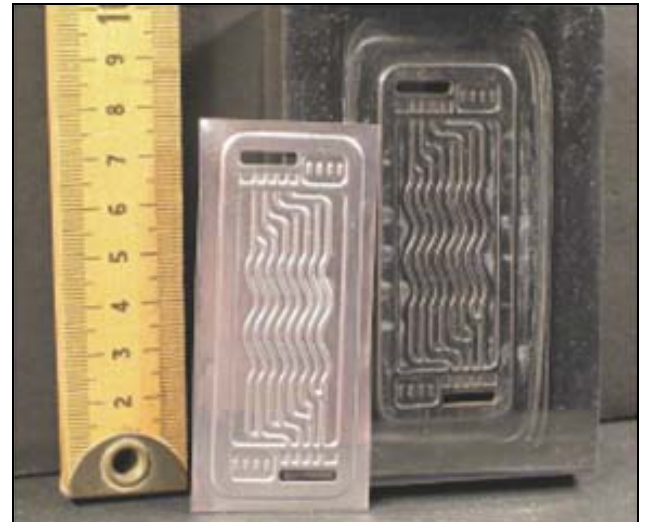
Figuur 19 : Magnetisch puls vormen en perforeren ^[4]



Figuur 20 : Magnetisch puls vormen ^[4]

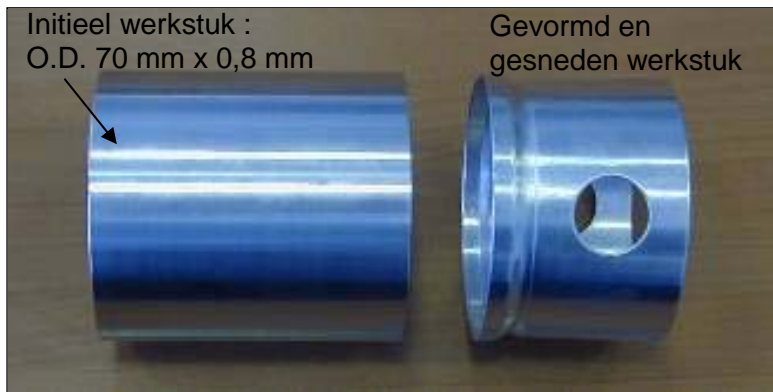


Figuur 21 : Magnetisch puls vormen – Roestvast staal, diameter 300 mm ^[5]

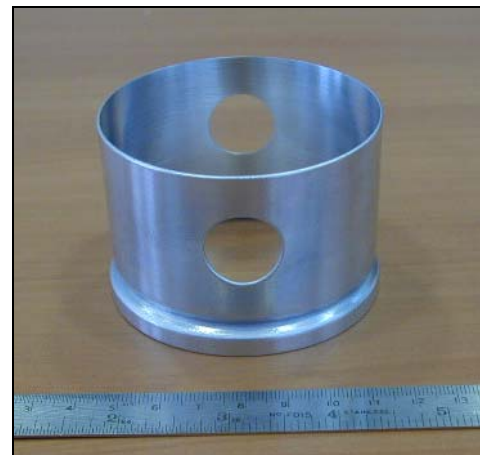


Figuur 22 : Magnetisch puls vormen van aluminium en staal ^[5]

Figuur 23 en Figuur 24 tonen toepassingen van het magnetisch puls vormen van buisvormige onderdelen.



Figuur 23 : Magnetisch puls vormen en snijden van buisvormige onderdelen ^[5]



Figuur 24 : Magnetisch puls vormen en perforeren ^[5]

Een potentiële toepassing voor het magnetisch puls vormen is de fabricage van aluminium carrosserieplaten. Vanwege de lage vervormbaarheid bij lage snelheid hebben de aluminium platen de neiging scheuren te vertonen aan scherpe randen wanneer deze vervormd worden met de conventionele vervormingstechnieken. Hoge-snelheidsvervormingstechnieken zouden deze problemen kunnen oplossen.

Verschillende studies hebben aangetoond dat door het vervangen van staal door aluminium de massa van een koetswerk van een wagen kan verminderd worden met 30%. ^{[19], [20]} Dit zou zich vertalen in een hogere performantie en een lager brandstofverbruik. Momenteel maken echter slechts weinig autoconstructeurs gebruik van aluminium carrosseriepanelen. Daarenboven is het productieproces om ze aan te maken eerder duur.

Recentelijk werden twee demonstratieprojecten opgestart in de Verenigde Staten, gesponsord door Chrysler, Ford en General Motors. Het doel van deze projecten was het onderzoeken van haalbaarheid van het gebruik van een hybride techniek van conventioneel stampen in combinatie met elektromagnetisch vormen voor het vervaardigen van deurpanelen.

Magnetisch Puls Krimpen (Magnetic Pulse Crimping)

Werkingsprincipe

Krimpen is een mechanische verbindingstechniek die vaak gebruikt wordt in allerlei industriële toepassingen. De verbinding wordt bewerkstelligd door een plastische vervorming zonder dat er een metallurgische binding ontstaat. Toepassingen kunnen gevonden worden in de lucht- en ruimtevaart en in de medische en automobieliindustrie.

Magnetisch puls krimpen is zeer gelijkaardig aan het magnetisch puls vormen van buisvormige producten, behalve dat het inwendige werkstuk de matrijs vervangt. Het opkrimpen gebeurt in een fractie van een seconde en de hoge vervormingssnelheid beïnvloedt de materiaaleigenschappen niet. Het proces kan ook uitgevoerd worden op materialen met een lage ductiliteit. Het proces is geschikt voor cilindrische, elliptische en rechthoekige werkstukken.

[19] : Basic Research Needs for Vehicles of the Future, Princeton Materials Institute, p.19-27, 1995.

[20] : Opportunities in High-Velocity Forming of Sheet Metal. A.A. Tamhane, M. Padmanabhan, G. Fenton, M. Altnova and G.S. Daehn, Metalforming Magazine, January 1997.

Toepassingen

Figuur 25 toont een krimpverbinding van connectoren aan elektrische kabels. Een andere krimpverbinding wordt getoond in Figuur 26. Het betreft een stalen buis met een diameter van 100 mm en een wanddikte van 3 mm, die gekrompen werd op een gesmeed stuk.



Figuur 25 : Krimpverbindingen^[4]



Figuur 26 : Krimpverbinding^[21]

Producenten van de techniek

Er zijn slechts weinig producenten van de techniek. Hieronder worden de gevonden fabrikanten opgelijst :

- IAP research Inc. : Dayton, Ohio, Verenigde Staten.
Website : www.iap.com
Fabrikant van magnetisch puls vormapparatuur, gebouwd op maat van de klant (geen standaard uitrusting verkrijgbaar).
- Magneform : San Diego, Verenigde Staten.
Website : www.magneform.com
Fabrikant van apparatuur voor magnetisch puls vormen, krimpen en lassen.
- Magnet Physik, Keulen, Duitsland.
Website : www.magnet-physik.de
Fabrikant van magnetisch puls vormapparatuur.
- Poynting, Dortmund, Duitsland.
Website : www.poynting.de
Fabrikant van apparatuur voor magnetisch puls vormen, krimpen en lassen. Gespecialiseerd in apparatuur voor het lassen en vormen van werkstukken met kleine diameter. Machines van 2 tot 50kJ.
- Beverly Ill and Associates, Ohio, Verenigde Staten.
Website : www.reb3.com
Fabrikant van componenten van magnetisch puls vormapparatuur (spoelen).

[21]: Victor Shribman, Magnetic pulse technology for improved tube joining and forming. Tube & Pipe Technology, Nov.-Dec. 2006, p. 91-95.

- Pulsar, Israel.
Website : www.pulsar.co.il
Fabrikant van apparatuur voor magnetisch puls vormen, krimpen en lassen. Fabrikant die apparatuur aanbiedt bestemd voor het lassen en vormen van werkstukken met grotere diameters (grotere vermogens tot 100 kJ).
- PST, Duitsland.
Website : www.pstproducts.com
Fabrikant van apparatuur voor magnetisch puls vormen, krimpen en lassen. Vermogens van 8 tot 100 kJ.