



## **Eindverslag collectief onderzoeksproject**

# **INNOVATIEVE ELEKTROMAGNETISCHE HOGE-SNELHEIDS- LAS- EN VERVORMINGSTECHNIKEN**

**(Acroniem : MAGPULS)**

**IWT Overeenkomst : 070644**

**Onderzoekscentrum van het Belgisch Instituut voor Lastechniek (BIL)**

**Onderzoekscentrum voor Aanwending van Staal (OCAS NV.)**

**Universiteit Gent (MMC-UGent)**

Door: dr. Ir. Koen Faes, Projectleider, BIL  
ir. Patrick Goes, OCAS  
prof. dr. ir. Patricia Verleysen, UGent



## **Inhoudsopgave**

I.	ADMINISTRATIEVE GEGEVENS .....	4
I.1.	Titel van het project.....	4
I.2.	Contactpersoon .....	4
I.3.	Startdatum van het project .....	4
I.4.	Duur van het project.....	4
I.5.	Aanvrager en partners .....	4
I.5.1.	Aanvrager : Belgisch Instituut voor Lastechniek .....	4
I.5.2.	Partner 1 : Onderzoekscentrum voor Aanwending van Staal (OCAS NV.).....	4
I.5.3.	Partner 2 : Universiteit Gent (MMC-UGent) .....	5
II.	PROJECTBESCHRIJVING .....	6
II.1.	Elektromagnetisch vormen- en lassen .....	6
II.2.	Aanleiding van het project.....	7
II.3.	Werkprogramma .....	7
III.	Belangrijkste resultaten .....	8
III.1.	Literatuuronderzoek (Werkpakket 1) .....	8
III.2.	Experimenteel onderzoek (Werkpakketten 2 en 3).....	10
III.2.1.	Perforeren van buisvormige werkstukken (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.2).....	10
III.2.2.	Snijden van buizen (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.3) .....	12
III.2.3.	Smeltverschijnselen bij het snijden en perforeren van buizen.....	14
III.2.4.	Vervormbaarheid van roestvast staal (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.4) .....	16
III.2.5.	Ontwerp van krimpverbindingen (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.5) .....	17
III.2.6.	Industriële case studies (Werkpakket 3) .....	19
III.2.7.	Modelleren van het elektromagnetisch vervormen (Werkpakket 4).....	21
III.2.8.	Werkpakket 5 : Dienstverlening en innovatiestimulering .....	25

## I. ADMINISTRATIEVE GEGEVENS

### I.1. Titel van het project

Innovatieve elektromagnetische hoge-snelheids-las- en vervormingstechnieken (MAGPULS)

### I.2. Contactpersoon

Projectverantwoordelijke : dr. ir. Koen Faes, EWE  
Wetenschappelijk medewerker  
Belgisch Instituut voor Lastechniek  
Tel. : +32(0)9 264 32 51  
E-mail : [Koen.Faes@Soete.UGent.be](mailto:Koen.Faes@Soete.UGent.be)

### I.3. Startdatum van het project

1 juli 2008.

### I.4. Duur van het project

12 maanden.

### I.5. Aanvrager en partners

#### I.5.1. Aanvrager : Belgisch Instituut voor Lastechniek

Afdeling : Onderzoekscentrum  
Labo : Labo Soete  
Adres : Sint-Pietersnieuwstraat 41  
9000 Gent  
Tel. : +32 (0)9 264 32 50  
Fax : +32 (0)9 223 73 26  
Website : [www.BIL-IBS.be](http://www.BIL-IBS.be)

Organisatieverantwoordelijke :  
ir. Walter Vermeirsch - Directeur  
Tel : +32 (0)9 264 32 50  
Fax : +32 (0)9 223 73 26  
E-mail: [Walter.Vermeirsch@BIL-IBS.be](mailto:Walter.Vermeirsch@BIL-IBS.be)

Projectleider :  
dr. ir. Koen Faes, EWE  
Tel : +32 (0)9 264 32 51  
Fax : +32 (0)9 223 73 26  
E-mail : [Koen.Faes@BIL-IBS.be](mailto:Koen.Faes@BIL-IBS.be)

#### I.5.2. Partner 1 : Onderzoekscentrum voor Aanwending van Staal (OCAS NV.)

Afdeling : Onderzoekscentrum  
Adres : John Kennedylaan 3  
9060 Zelzate  
Tel. : +32 (0)9 345 12 11  
Fax : +32 (0)9 345 12 04

Website : [www.OCAS.be](http://www.OCAS.be)

Organisatieverantwoordelijke

dr. ir. Sven Vandeputte

General Manager

Tel. : +32 (0)9 345 13 32

Fax. : +32 (0)9 345 12 04

Email : [Sven.Vandeputte@arcelormittal.com](mailto:Sven.Vandeputte@arcelormittal.com)

Contactpersoon

Lic. Patrick Goes

Onderzoeksingenieur modelleren.

Tel. +32 (0)9 345 13 89

Fax. +32 (0)9 345 12 04

Email: [Patrick.Goes@ArcelorMittal.com](mailto:Patrick.Goes@ArcelorMittal.com)

### **I.5.3. Partner 2 : Universiteit Gent (MMC-UGent)**

Afdeling : Onderzoeksgroep Mechanica van Materialen en Constructies

Vakgroep : Mechanische Constructie en Productie (IR04)

Adres : Sint-Pietersnieuwstraat 41

9000 Gent

Tel. : +32 (0)9 264 34 30

Fax : +32 (0)9 264 35 87

Website : <http://tw04.ugent.be/>

Organisatieverantwoordelijke

Paul Van Cauwenberge

Rector

Contactpersoon

Prof. dr. ir. Patricia Verleysen

Tel. +32 (0)9 264 34 35

Fax. +32 (0)9 264 35 87

[Patricia.Verleysen@UGent.be](mailto:Patricia.Verleysen@UGent.be)

## II. PROJECTBESCHRIJVING

### II.1. Elektromagnetisch vormen- en lassen

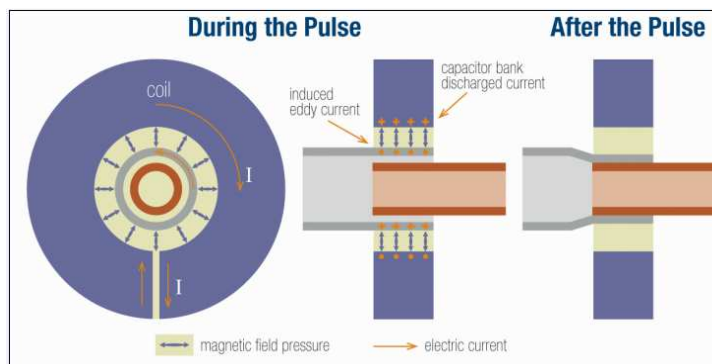
Hoge-snelheidsvervormings- en lastechnieken (ook bekend onder de benamingen magnetisch puls vervormen, opkrimpen en lassen) zijn nieuwe, zeer innovatieve doch vrijwel ongekennde technieken. Al deze procedés zijn gebaseerd op hetzelfde werkingsprincipe, namelijk het gebruik van elektromagnetische krachten om werkstukken te vervormen, op te krimpen of te lassen.

Het magnetisch puls proces is een automatisch procedé dat kan gebruikt worden voor het vervormen van plaat- en buisvormige producten en het verbinden van buisvormige werkstukken in de overlap-configuratie (zie Figuur 1).

Een spoel wordt over de te vervormen of te lassen werkstukken geplaatst. In de spoel wordt een zeer grote hoeveelheid elektrische energie vrijgegeven in een zeer korte tijdsperiode (typisch : 20 à 50  $\mu$ s). Hierdoor worden wervelstromen geïnduceerd in het uitwendige werkstuk. Elk van deze stromen (in de spoel en in het uitwendige werkstuk) wekt een magnetisch veld op. De afstoting tussen beide magneetvelden ontwikkelt een kracht, die het uitwendige werkstuk met zeer grote snelheid (ca. 300 m/s) versnelt in de richting van het inwendige werkstuk.

Bij het magnetisch puls vormen worden de magnetische krachten gebruikt om vlakke of buisvormige producten met een hoge snelheid te vervormen, te perforeren of te snijden volgens de vorm van een matrijs.

Bij het magnetisch puls lassen worden aangepaste parameters gebruikt, zodat eventuele oppervlakte-verontreinigingen door de botsing van de twee materialen verwijderd worden, waardoor een atomair zuiver metaalcontact ontstaat en een metaalbinding verkregen wordt. Het magnetisch puls lassen vertoont veel gelijkenissen met het explosielassen, doch de explosieve kracht wordt op een veilige manier opgewekt, namelijk via elektromagneten.



**Figuur 1** : Principe van het lassen van buisvormige producten via magnetisch puls lassen

Een volledige beschrijving van de processen is terug te vinden in bijlage 1.

Deze nieuwe en innovatieve las- en vervormingstechnieken bieden aantrekkelijke mogelijkheden voor :

- het snel en kostengunstig verbinden van moeilijk lasbare materialen, zoals heterogene verbindingen, aangezien het magnetisch puls lassen geen gebruik maakt van warmte om een verbinding tot stand te brengen,
- het bewerkstelligen van een grotere vervormbaarheid van sommige materialen, waarbij de nadelen van de conventionele vervormingsprocessen vermeden worden,
- het ontwikkelen van complexe werkstukken of nieuwe producten die voorheen niet mogelijk waren met de conventionele technieken.

## II.2. Aanleiding van het project

Het bleek dat het inschatten van de geschiktheid en toepasbaarheid van de processen voor de Vlaamse metaal- en non-ferroverwerkende bedrijven niet evident was. Naast de beperkte bekendheid was er geen kennis aanwezig omtrent de technische haalbaarheid van deze processen voor de voor hen relevante toepassingen, noch over de eventuele verhoging van de productiviteit, en dus over het economisch voordeel dat de inzet van deze innovatieve processen kan betekenen.

Daarnaast is er slechts zeer beperkt gepubliceerd over de technische toepasbaarheid van deze nieuwe processen, en dan nog meestal door de fabrikanten zelf. Dit alles verhindert de implementatie van deze technieken, waaraan voor de Vlaamse industrie ongetwijfeld veel voordelen verbonden zijn. Er bestond derhalve een nood aan objectief en onafhankelijk onderzoek naar de technische haalbaarheid van het inzetten van deze processen.

## II.3. Werkprogramma

Het projectvoorstel "MAGPULS" beoogde het onderzoek naar zowel het magnetisch puls lassen als naar het magnetisch puls vervormen. Het projectvoorstel werd door IWT als voorwaardelijk positief beoordeeld, wat inhield dat het project diende beperkt te worden tot een haalbaarheidsstudie, waarbij de focus gelegd moest worden op het vervormen en krimpen. Mede op basis van de inbreng van de gebruikerscommissie werd aldus het volgende werkprogramma opgesteld.

**Werkpakket 1 :** State-of-the-art van de elektromagnetische hoge-snelheidsvervormings- en lasprocessen en keuze van basismaterialen

**Werkpakket 2 :** Onderzoeksactiviteiten omtrent het magnetisch puls vormen

Deelwerkpakket 2.1 : Bepaling en optimalisatie van de parameterinstellingen voor het vormen van buisvormige producten

Deelwerkpakket 2.2 : Magnetisch puls perforeren van buisvormige werkstukken

Deelwerkpakket 2.3 : Magnetisch puls snijden van buisvormige werkstukken

Deelwerkpakket 2.4 : Onderzoek naar de vervormbaarheid van materialen met lage elektrische geleidbaarheid (roestvast staal)

Deelwerkpakket 2.5 : Onderzoek naar het magnetisch puls krimpen - Ontwerp van krimpverbindingen

**Werkpakket 3 :** Aanmaken van demonstratiestukken (industriële case studies)

**Werkpakket 4 :** Modelleren van het elektromagnetische hoge-snelheidsvervormingsproces

Deelwerkpakket 4.1 : Bepaling van de inputgegevens

Deelwerkpakket 4.2 : Modelleren van het elektromagnetische hoge-snelheidsvervormingsproces

**Werkpakket 5 :** Dienstverlening en innovatiestimulering

**Werkpakket 6 :** Projectmanagement – Rapportage

De werkpakketten 1, 2 en 3 werd uitgevoerd door het Belgisch Instituut voor Lastechniek, met assistentie van de andere partners OCAS en UGent-MMC. Werkpakket 4 werd uitgevoerd voor OCAS en UGent-MMC. Hierbij werden de inputgegevens voor de eindige-elementen modellen aangeleverd door het Belgisch Instituut voor Lastechniek. Aan de werkpakketten 5 en 6 werd door alle partners meegewerkt.

### III. Belangrijkste resultaten

#### III.1. Literatuuronderzoek (Werkpakket 1)

Het onderzoek werd gestart met een uitgebreid literatuuronderzoek naar het elektromagnetisch vervormen (EMF), die algemeen aangeduid wordt als een veelbelovende techniek voor het vervormen van buis- en plaatvormig materialen. Verschillende vervormbewerkingen kunnen uitgevoerd worden door het wijzigen van de spoel en/of de veldconcentrator (field shaper), waardoor het proces ook voor kleine series interessant kan zijn.

In vergelijking met de conventionele technieken biedt EMF diverse voordelen. Het belangrijkste is de verbeterde vervormbaarheid van de meeste materialen bij hoge vervormingssnelheden. Dit wordt veroorzaakt door meerdere factoren, zoals adiabatische verzachting, stabilisatie van de insnoering en inertie-effecten. Deze laatste factor vermindert ook het rimpelen en het terugveren van de werkstukken. Een andere factor die het terugveren vermindert is de spanningsrelaxatie door het opwarmen van de werkstukken, door zowel het Joule-effect als door de vervorming.

Bij het vervormen van werkstukken met behulp van elektromagnetische krachten is er slechts één enkelzijdige matrijs benodigd. Bij gebruik van de dynamische elektromagnetische krachten zijn bovendien minder zware gereedschappen noodzakelijk, zoals het geval bij de conventionele technieken, aangezien de statische krachten laag zijn.

Het proces heeft echter ook haar beperkingen. Alleen geleidende materialen kunnen rechtstreeks worden vervormd. Niet-geleidende materialen kunnen ook worden vervormd, maar een geleidend materiaal moet aangebracht worden op het werkstuk.

Speciale apparatuur is bovendien nodig omdat in de spoelen grote krachten werkzaam zijn. Hiervoor moeten derhalve sterke en rigide spoelen worden gebruikt. Ook hebben de condensatorbanken en hoge-snelheidsschakelaars een levensduur die afhankelijk is van de gebruiksfrequentie. Tot slot zijn speciale voorzorgsmaatregelen aangewezen, aangezien er gewerkt wordt met hoge spanningen en stromen.

De parameters van alle varianten van de elektromagnetische vervormprocessen kunnen onderverdeeld worden in drie categorieën; meer bepaald de parameters gerelateerd aan het werkstuk, aan de spoel en de elektrodynamische karakteristieken.

In de eerste categorie is de elektrische geleidbaarheid van het werkstuk de belangrijkste parameter, aangezien dit de efficiëntie bepaalt waarmee de elektrische energie omgezet wordt in vervormingsenergie. Een hoge efficiëntie kan verkregen worden wanneer een goede afscherming van het magnetisch veld door het werkstuk wordt verkregen. Bepalend hierbij is de zogenaamde "skin-diepte" van de geïnduceerde stromen. De geïnduceerde wervelstromen lopen immers aan het oppervlak van geleidende materialen aanwezig in de spoel of field shaper. De skin-diepte is een maat voor de indringing van deze wervelstromen in de materialen.

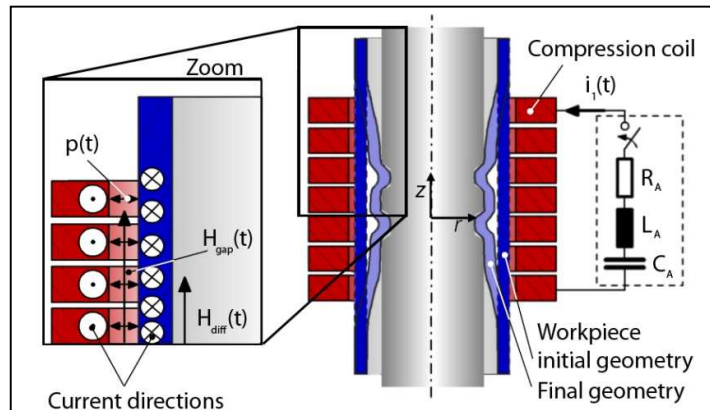
Om een goede energie-omzetting te bekomen moet de skin-diepte kleiner zijn dan de wanddikte van het werkstuk. De skin-diepte neemt toe voor een lagere elektrische geleidbaarheid van het werkstuk. Dit is de reden waarom roestvaste staalsoorten moeilijker te vervormen zijn via de elektromagnetische vervormtechniek.

De skin-diepte wordt ook bepaald door de elektrodynamische karakteristieken van de pulsmachine, meer bepaald door de frequentie van de ontladstroom. Met de toename van de frequentie vermindert de skin-diepte en verbetert daardoor de afschermdende werking van het werkstuk. Door de betere afscherming verhoogt de magnetische druk. De magnetische druk is bijna kwadratisch evenredig met de grootte van de ontladstroom, die op zijn beurt afhangt van de



laadspanning van de capaciteiten (energie niveau), de eigenschappen van de spoel en de werkstukken en de capaciteit van de machine.

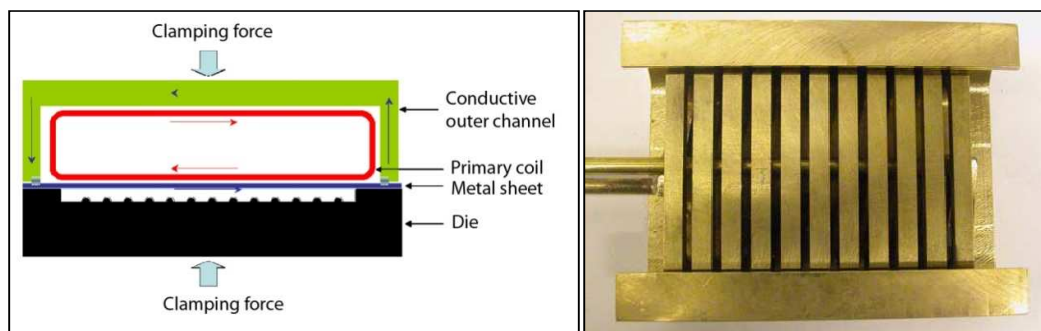
Andere procesparameters zijn het aantal wikkelingen van de spoel, die de intensiteit van het magnetische veld bepaalt en de luchtspleet tussen het werkstuk en de spoel of veldconcentrator, die de inductantie van het systeem bepaalt. Door de luchtspleet te verkleinen of door het aantal wikkelingen van de spoel te vergroten per lengte-eenheid, wordt de magnetische druk verhoogd. Daarnaast bestaan er specifieke procesparameters voor het vervormen van buis- of plaatvormige materialen. Bij de buisvormige werkstukken wordt de distributie van de magnetische druk ook bepaald door geometrische parameters, zoals de buislengte, de lengte van de spoel en geometrie van de field shaper. Field shapers dragen bij tot een hogere en meer uniform verdeelde magnetische druk in een gewenst gedeelte van het werkstuk, gebruik makend van dezelfde ontladstroom.



Figuur 2 : Principe van het elektromagnetisch comprimeren van buizen

Voor het vervormen van plaatvormige werkstukken zijn er meerdere opstellingen ontwikkeld. Ze kunnen onderverdeeld worden in twee groepen; namelijk de directe en de indirecte methodes. Bij de directe methodes werken de magnetische krachten rechtstreeks in op de werkstukken. Men kan hierbij gebruik maken van uniforme of niet-uniforme drukactuatoren. Het gebruik van een uniforme drukactuator heeft het voordeel dat, vergeleken met de platte spiraalvormige spoel, een homogeen magnetische veld gecreëerd wordt en dat dus de magnetische kracht over het gehele werkstuk constant is (zie Figuur 3).

De indirecte methodes maken gebruik van een platte spiraalvormige spoel, dat een niet-uniform magnetische veld induceert, dat inwerkt op een transducer (bv. een aluminium onderdeel). De kracht gegenereerd door de transducer wordt vervolgens overgebracht naar een elastisch medium, dat een uniforme druk op het plaatvormig werkstuk uitoefent.



Figuur 3 : Uniforme drukactuator (links : schematisch, rechts : messing drukactuator)

Voor alle resultaten van het literatuuronderzoek wordt verwezen naar bijlage 2 van het technisch verslag.

### III.2. Experimenteel onderzoek (Werkpakketten 2 en 3)

Het experimentele onderzoek werd uitgevoerd met buisvormige werkstukken. Hierbij kunnen de volgende taken onderscheiden worden :

- perforeren en knippen van buizen,
- vervormen van werkstukken in roestvast staal,
- ontwerp van krimpverbindingen voor stalen werkstukken,
- industriële case studies.

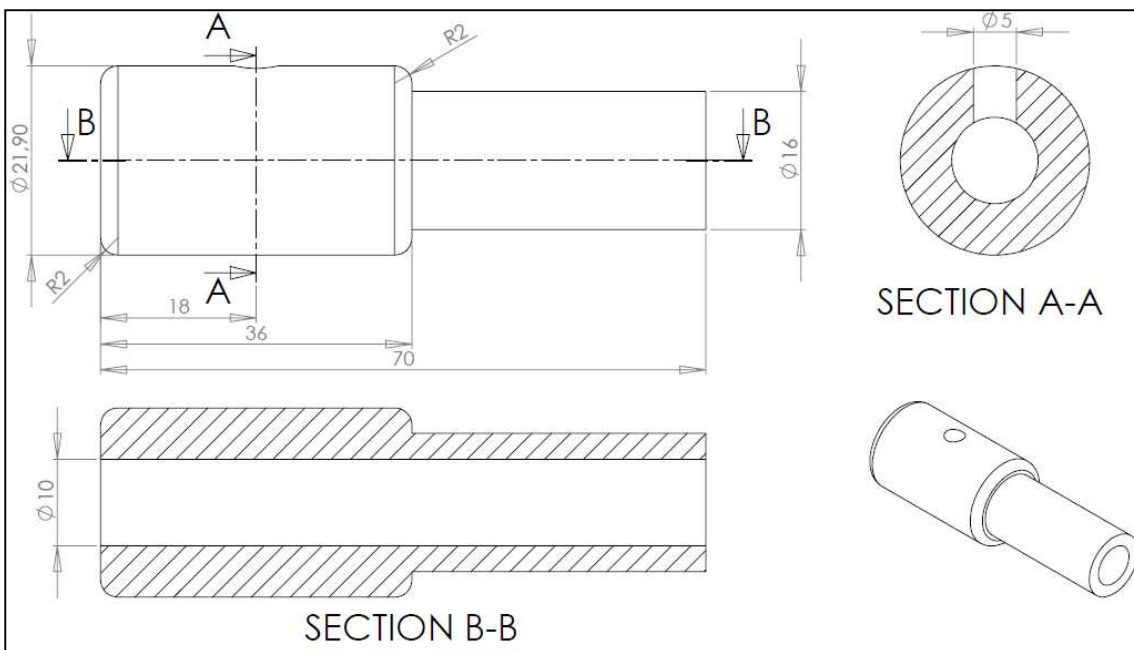
De belangrijkste resultaten worden in wat volgt beschreven.

#### III.2.1. Perforeren van buisvormige werkstukken (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.2)

In een eerste fase werden preliminaire experimenten uitgevoerd voor het bepalen van richtlijnen voor het ontwerp van matrijzen voor het perforeren van buisvormige materialen.

Eén van de conclusies was dat de stijfheid van de matrijs de belangrijkste ontwerpparameter is. Verder moet de radiale afstand tussen het werkstuk en de matrijs geminimaliseerd worden om te voorkomen dat het werkstuk te sterk rond de matrijs gekrompen wordt. Een radiale afstand van 0,1 mm (gemeten op de straal) blijkt de maximale waarde te zijn waarbij het werkstuk na het perforeren nog kon gedemonteerd worden van over de matrijs.

Op basis van de ontwerprichtlijnen werd een verbeterd ontwerp van de matrijs uitgevoerd. Verschillende matrijzen werden vervaardigd. Perforatie experimenten werden uitgevoerd met buizen in de aluminiumlegering EN AW-6060 T6 (Figuur 5) en met koper SF-Cu R290 (Figuur 6). De gebruikte buizen hadden een diameter van 25 mm en een wanddikte van 1,5 mm. Het procesvenster voor het perforeren van deze werkstukken werd opgesteld (zie Figuur 7).



Figuur 4 : Tekening van het finale ontwerp van een matrijs (perforatie diameter : 5 mm)

De beste kwaliteit van de perforatie wordt steeds verkregen bij het laagst mogelijke energieniveau (zie bv. Figuur 5). Bij dit energieniveau treedt een afschuiving van het materiaal op in het grootst mogelijke gedeelte van de omtrek van de perforatie (afhankelijk van de diameter van de perforatie) en met een minimale afschuifradius. De minimaal vereiste spanning is hoger voor experimenten met koper dan met aluminium.

Het minimale energieniveau waarbij een perforatie verkregen wordt, neemt toe voor een kleinere diameter van de perforatie. Bij het opstellen van de procesvensters (zie Figuur 7) kon ook worden vastgesteld dat boven een bepaalde diameter van de perforatie (>10 mm) het minimaal benodigde energieniveau vrijwel constant blijft.

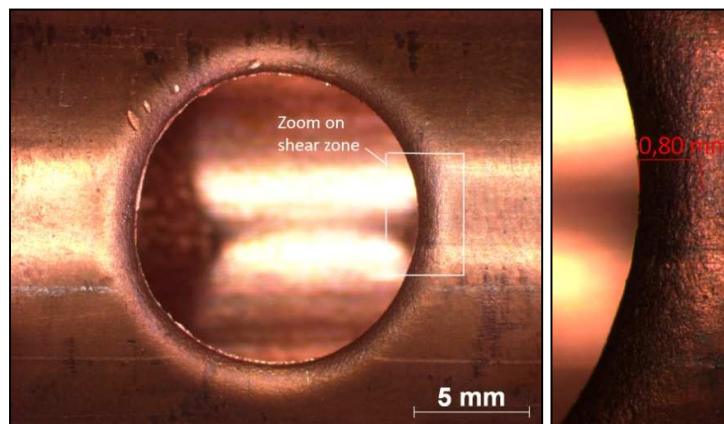
Het belangrijkste verschil dat geconstateerd wordt bij de proeven met de beide materialen is de gevoeligheid aan scheuren van de aluminium werkstukken. Deze zijn gericht naar het centrum van het geponste gat (zie Figuur 8) en treden op vanaf een bepaald energieniveau. De hoeveelheid en de grootte van deze scheuren neemt toe voor een hogere laadspanning van de capaciteiten.

Bij de experimenten met aluminium werkstukken treedt voor een toenemend energieniveau eveneens een transitie op van complete afschuiving naar het optreden van smeltverschijnselen. Bij gebruik van een hoog energieniveau wordt materiaal aan de rand van de snede gesmolten (zie Figuur 8).

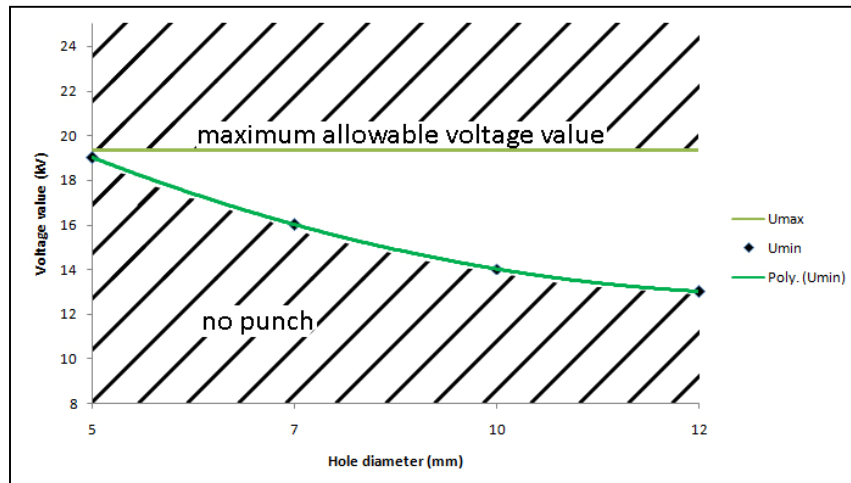
Voor gedetailleerde resultaten van de perforatieproeven wordt verwezen naar bijlage B, van het technisch eindverslag.



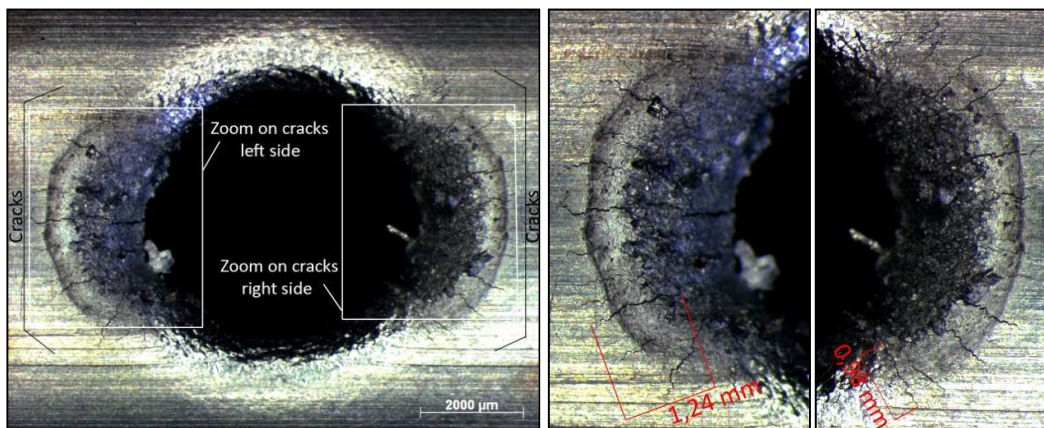
*Figuur 5 : Resultaat van experiment P\_Al\_04 (voltage = 11,0 kV - 9,7 kJ)*



*Figuur 6 : Kwaliteit van experiment P\_Cu\_12 (voltage = 13,5 kV - 14,6 kJ).  
(afschuifradius = 0,8 mm)*



Figuur 7 : Procesvenster voor het perforeren van koperen buizen (buitendiameter : 25 mm, wanddikte : 1,5 mm).  $U_{max}$  is the maximum toelaatbare spanning (19,37kV) en  $U_{min}$  is het minimale energieniveau waarbij nog een perforatie verkregen wordt.



Figuur 8 : Onderzoek van de kwaliteit van experiment P\_Al\_07 (voltage = 15,0 kV - 18,0 kJ).

### III.2.2. Snijden van buizen (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.3)

Het snijden van buizen is vergelijkbaar met het perforeren van buizen. Dezelfde vaststellingen werden gemaakt, meer bepaald i.v.m. :

- het belang van de stijfheid van de matrijs,
- het krimpen van de werkstukken rond de matrijs,
- de hoogste kwaliteit van de snede wordt verkregen voor het laagste energieniveau,
- de aanwezigheid van scheuren in de aluminium werkstukken.

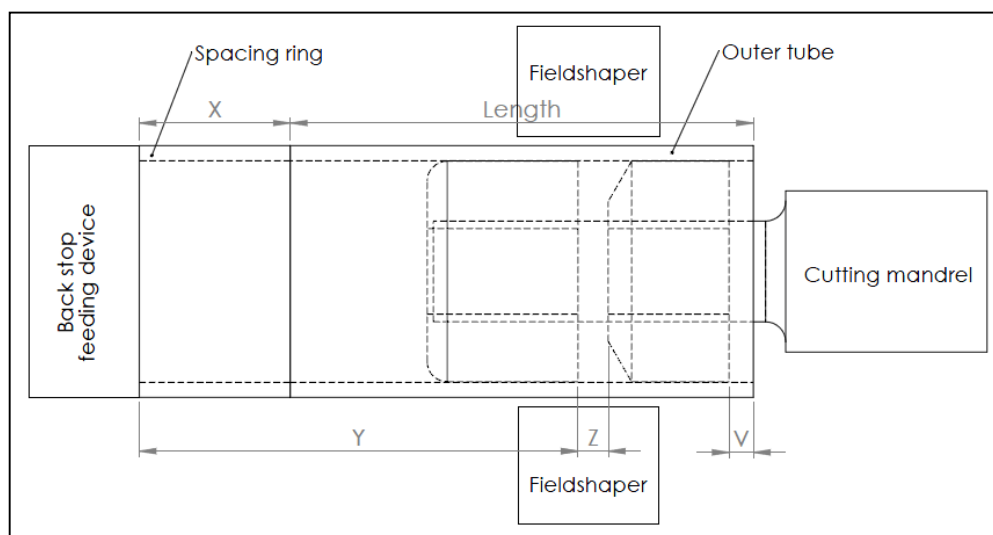
Voor het snijden van buisvormige werkstukken moet de matrijs het werkstuk ondersteunen aan beide zijden van de snede, om te voorkomen dat de buis met een te hoge snelheid met de matrijs impacteert. Hiervoor werden twee matrijzen met een V-vormige inkeping ontworpen (zie Figuur 9). Met deze matrijzen werden snij-experimenten uitgevoerd met werkstukken in aluminium (EN AW-6060 T6) en koper (SF-Cu R290, zie Figuur 10). Het procesvenster voor het snijden van deze materialen werd bepaald (zie Figuur 11).

De invloed van de axiale positie van de werkstukken in de field shaper werd bestudeerd. Er wordt vastgesteld dat deze geen invloed van betekenis heeft op het eindresultaat, zolang de zone waarin de snede moet gemaakt worden niet buiten de field shaper gelegen is.

Er wordt ook vastgesteld dat de straal waarover het materiaal afgeschoven wordt lineair evenredig is met het gebruikte energieniveau.

Twee geoptimaliseerde matrijzen werden ontworpen. De eerste matrijs werd ontwikkeld voor het uitvoeren van snijbewerkingen bij een laag energieniveau, terwijl de andere matrijs zeer geschikt is voor het maken van snedes met een kleine afrondingsstraal.

Voor gedetailleerde beschrijving van de experimenten wordt verwezen naar bijlage B van het technisch eindverslag.

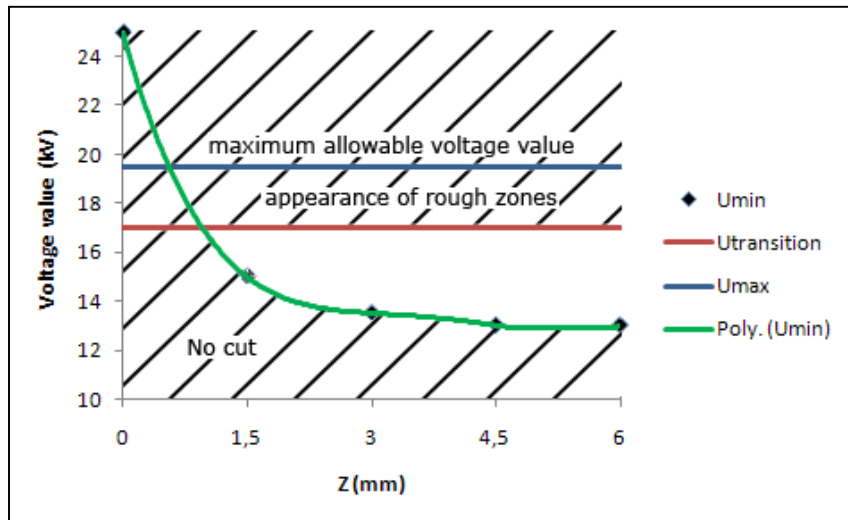


*Figuur 9 : Experimentele opstelling voor het snijden van buizen.*

*Geometrische parameters : X = lengte van een afstandsring (bepaalt de positieve in de field shaper), Y = afstand tussen de aanslag en de te maken snede, Z = afstand tussen de twee gedeelten van de matrijs, Length = lengte van het te snijden buisje*



*Figuur 10 : Resultaat van experiment C30\_Cu\_08 (voltage = 18,0 kV - 25,9 kJ).*



Figuur 11 : Procesvenster voor het snijden van buisjes in aluminium (EN AW-6060 T6), buitendiameter = 25 mm, wanddikte = 1,5 mm

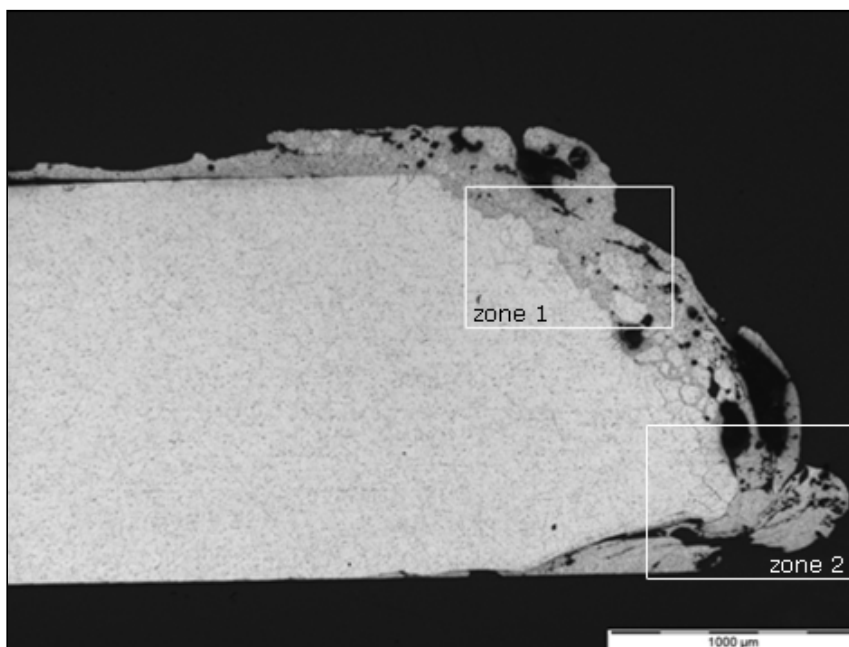
### III.2.3. Smeltverschijnselen bij het snijden en perforeren van buizen

Zowel bij de snij- als bij de perforatie-experimenten uitgevoerd met aluminium werkstukken werden ruwe zones aan de snijranden vastgesteld (zie Figuur 12), vooral bij deze uitgevoerd met een hoog energieniveau. Metallografisch onderzoek van deze proefmonsters toont aan dat bij deze bewerkingen een aanzienlijk hoge temperatuur bereikt wordt in de snijranden. Nabij het oppervlak van de snede of perforatie wordt een zone opgemerkt waarbij het materiaal gesmolten werd (met nadien een stolling). Precipitaties worden opgelost en dendritische zones zijn duidelijk zichtbaar (zie Figuur 13 en Figuur 14). Naast deze zone is een warmte beïnvloede zone aanwezig, waarin het materiaal gedeeltelijk gesmolten wordt en precipitaties gedeeltelijk ontbonden worden. De breedte van deze warmte beïnvloede neemt toe voor een hoger energieniveau.

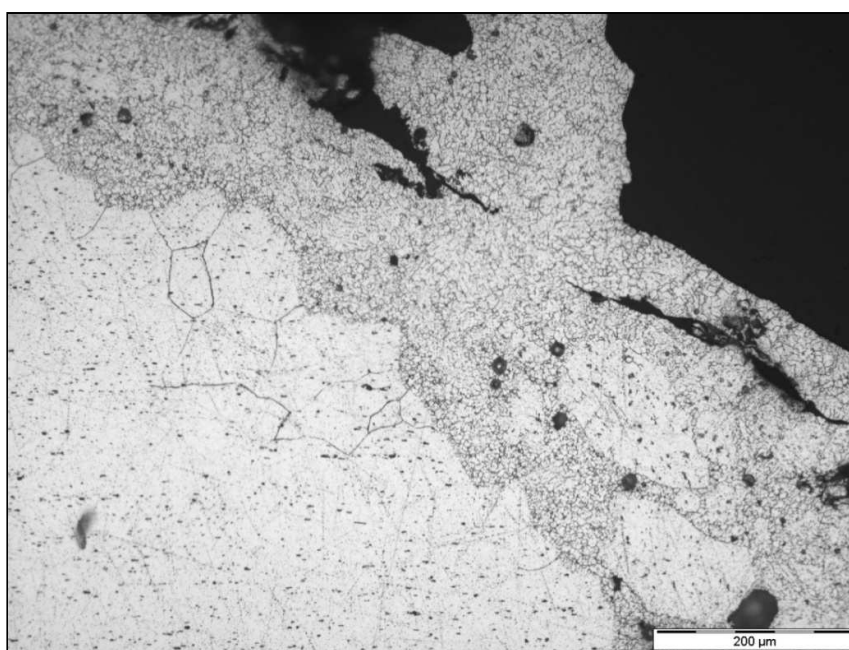
Er zijn twee mogelijke oorzaken waardoor de temperatuur tijdens deze bewerking kan toenemen. Aan de ene kant leiden de geïnduceerde stromen tot Joule verliezen. Dit zijn thermische verliezen die het materiaal opwarmen, en zijn kwadratisch evenredig met de stroom die doorheen het werkstuk vloeit.

Aan de andere kant leidt de plastische vervorming van de werkstukken tot een lokale warmte generatie. Ondanks de zeer goede thermische geleidbaarheid van aluminium, blijkt de lokale warmtegeneratie in het materiaal problematisch te zijn. Door de hoge vervormingssnelheid kan de gegenereerde warmte niet tijdig afgevoerd worden.

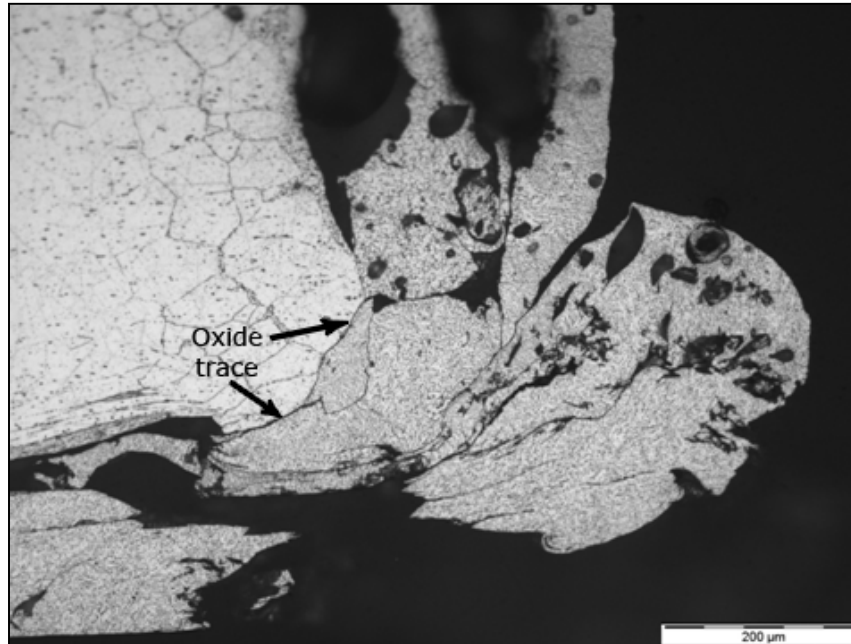
Voor meer informatie wordt verwezen naar bijlage B (technisch eindverslag).



*Figuur 12 : Microscopische opname van een gedeelte van een geponst gat (na etsing)*



*Figuur 13 : Detail van Figuur 12 (zone 1)*



*Figuur 14 : Detail van Figuur 12 (zone 2)*

### **III.2.4. Vervormbaarheid van roestvast staal (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.4)**

Het vervormen van roestvast staal wordt beperkt door de twee tegenstrijdige fenomenen. Aan de ene kant beperkt de relatief hoge sterkte van roestvast staal de vervormingsmogelijkheden van de te vervormen werkstukken. Aan de andere kant is bij roestvast staal de skin-diepte relatief groot, zodat de afscherpende werking van het werkstuk relatief laag is en hiermee ook de magnetische druk. Een vervormingsbewerking van roestvast stalen werkstukken kan het meest efficiënt uitgevoerd worden voor werkstukken met een grote wanddikte, vanwege de grote waarde van de skin-diepte (de grootste mogelijke efficiëntie wordt bereikt wanneer de skin-diepte ongeveer gelijk is aan de wanddikte). Voor AISI 316L gebruikt in de experimenten, is de skin-diepte in de orde van 3,5 mm. Vervormen van werkstukken met een kleinere wanddikte is mogelijk, doch niet zeer energie-efficiënt.

De skin-diepte kan verkleind worden door gebruik te maken van hogere frequenties van de ontladstroom of door gebruik te maken van een goed geleidend zogenaamd “driver” materiaal dat aangebracht wordt op het te vervormen werkstuk. Het veranderen van de frequentie is echter niet mogelijk met de proefopstelling. Verschillende driver-materialen en opstellingen werden daarentegen experimenteel onderzocht.

Er wordt vastgesteld dat door gebruik te maken van de driver-materialen een grotere vervorming kan bereikt worden, en dit bij een veel lager energieniveau. Een driver-materiaal in de vorm van een tape biedt het voordeel dat een grotere vervorming kan bereikt worden en dat het gemakkelijk aan te brengen en te verwijderen is. Het nadeel is dat de werkstukken de neiging hebben om te rimpelen (zie Figuur 15 en Figuur 16).

Het gebruik van een buisvormig driver-materiaal leidt tot een grotere stijfheid van de te vervormen proefstukken, zodat er meer energie noodzakelijk is in vergelijking met een tapevormig drivermateriaal. Dit resulteert in een kleinere vervorming van de roestvast stalen buis. De vervorming is echter homogener, doch het verwijderen van het driver-materiaal na de operatie stelt enige praktische problemen (zie Figuur 17 en Figuur 18).



Bij gebruik van de verschillende tape driver-materialen (koper en aluminium) wordt slechts een klein verschil opgemeten van de totale vervorming van de werkstukken. Geen verschil in de bereikte vervorming wordt waargenomen bij gebruik van de verschillende buisvormige driver-materialen (eveneens in koper en aluminium).

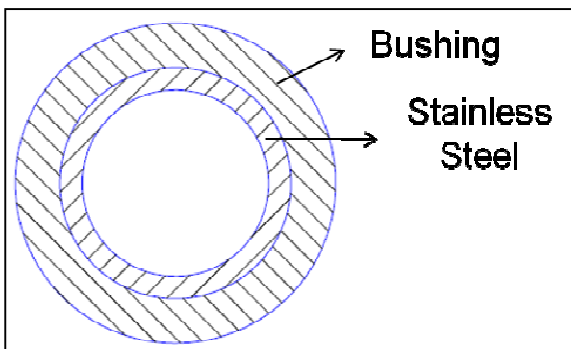
Alle experimenten worden uitvoerig beschreven in bijlage B van het technisch eindverslag.



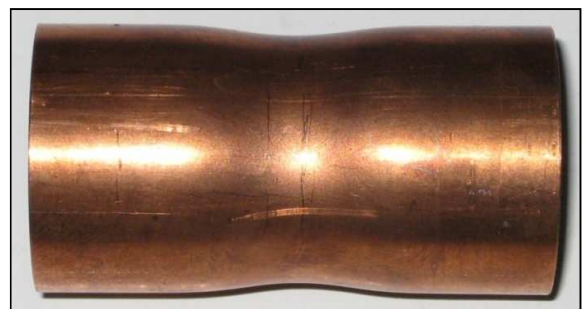
Figuur 15 : Gebruik van een tapevormig driver materiaal (aluminium tape driver, wanddikte : 1 mm), wanddikte van de roestvast stalen buis : 0,4 mm



Figuur 16 : Resultaat van een vrije vervorming, gebruik makend van een aluminium tapevormig driver materiaal (wanddikte : 1 mm). Wanddikte van de roestvast stalen buis : 0,4 mm



Figuur 17 : Gebruik van een buisvormig driver materiaal



Figuur 18 : Resultaat van een vrije vervorming gebruik makend van een koperen buisvormig driver materiaal (wanddikte : 1 mm). Wanddikte van de roestvast stalen buis : 0,4 mm

### III.2.5. Ontwerp van krimpverbindingen (Werkpakket 2 - Deelwerkpakket 2.5)

Een alternatief voor het magnetisch puls lassen zijn magnetisch puls krimpverbindingen. Een onderzoek werd uigevoerd naar de ontwerpsrichtlijnen voor het uitvoeren van axiale krimpverbindingen van werkstukken in koolstofstaal (S235). De te verbinden onderdelen bestonden uit een buis met een diameter van 25 mm en een wanddikte van 1 mm en een massieve staaf met een diameter van 22,8 mm. Voor het opnemen van axiale krachten werden in het inwendige deel twee groeven met verschillende configuraties aangebracht. Ontwerpsrichtlijnen werden opgesteld voor het ontwerp van dergelijke verbindingen. Verschillende ontwerpen werden geëvalueerd via longitudinale metallografische doorsneden en door het uitvoeren van trekproeven.

Er wordt geconcludeerd dat de sterkte van de krimpverbindingen meer kan vergroot worden door het vergroten van de vormweerstand door de groef ( $F_{groove}$ ), dan door het vergroten van de wrijvingsweerstand ( $F_{friction}$ ) tengevolge van de contactdruk tussen beide delen.

Bij alle onderzochte ontwerpen van het binnenste stuk treedt de breuk op door het afschuiven van de buis ter hoogte van de eerste groef (= de linkse groef in Figuur 19). De vermindering van de

wanddikte ten gevolge van de krimpwerking moet in deze zone derhalve geminimaliseerd worden. De vermindering van de wanddikte in andere zones is minder belangrijk vanwege de lagere belasting. Echter, als de wanddikte te sterk vermindert, kan een breuk eveneens in deze zones optreden. De toelaatbare maximale wanddiktereductie moet derhalve bepaald worden voor elk ontwerp van een krimpverbinding.

Vanwege de hoogste belasting uitgeoefend op de eerste (linkse) groef moet het ontwerp van het inwendige werkstuk geoptimaliseerd worden, met als doel het minimaliseren van de wanddiktevermindering in deze zone. De diepte van de groef moet zoveel mogelijk beperkt worden en gelijk gekozen worden aan de experimenteel bepaalde grenswaarde. In dit geval zal het uit elkaar gaan van de op elkaar gekrompen onderdelen vermeden worden.

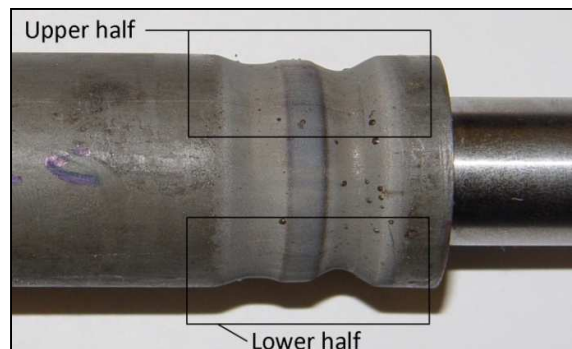
Verder dient de linkse groef afgewerkt te worden met een bepaalde afrondingsstraal. De bovengrens van deze afrondingsstraal moet samen met de diepte van de groef geoptimaliseerd worden, ter vermindering van de scheiding van de onderdelen. Bij de uitgevoerde experimenten was de bovengrens van de afrondingsstraal ongeveer 0,5 mm. Een afrondingsstraal aan de rechterkant van het eerste groef is niet noodzakelijk. Tot slot moet de breedte van de groef, die enkel een invloed heeft op de wrijvingsweerstand, gelijk zijn aan een minimumwaarde, die proefondervindelijk moet bepaald worden. Deze waarde was ongeveer 6 mm bij de uitgevoerde experimenten.

De wanddiktevermindering aan de tweede (rechtse) groef is minder belangrijk. Bij het uitvoeren van trekproeven trad de breuk nooit op aan de tweede groef, zelfs wanneer de wanddiktevermindering na het krimpen gelijk was aan ongeveer 80% van de oorspronkelijke wanddikte. Er wordt verwacht dat nog grotere wanddikte-reducties toelaatbaar zijn zonder dat de breuk zal optreden ter hoogte van de tweede groef.

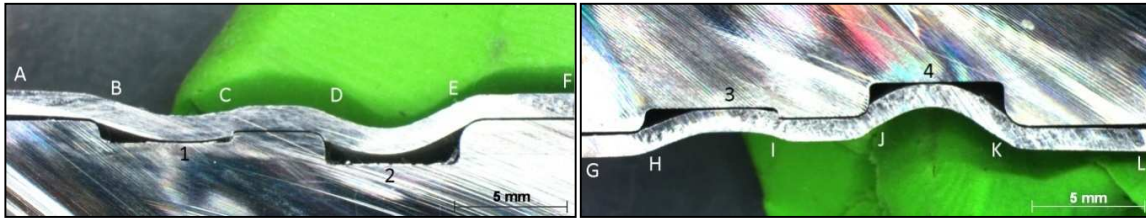
Het ontwerp van de tweede groef moet ook geoptimaliseerd worden. Om een maximale vergrendeling te verkrijgen moet de groefdiepte van de tweede groef gemaximaliseerd worden en gelijk genomen worden aan de experimenteel bepaalde maximale waarde (2 mm bij de uitgevoerde experimenten). De breedte van de groef moet opnieuw worden geminimaliseerd. Het aanbrengen van een afrondingsstraal aan de tweede groef kan vermeden worden, wat gunstiger is uit economisch standpunt.

Er werd ook aangetoond dat het verminderen van de diameter van de opstaande kant tussen beide groeven gunstiger is.

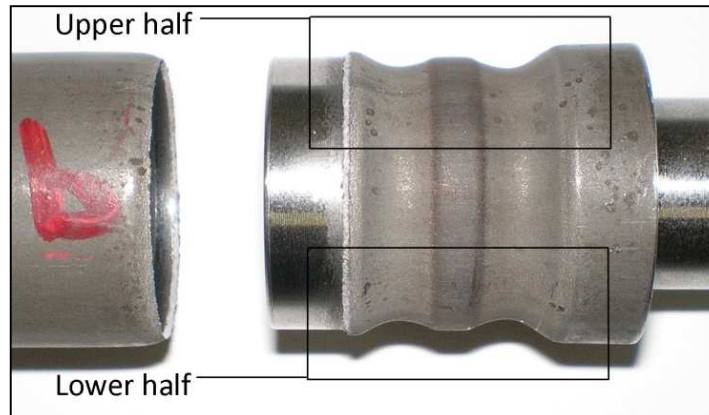
Voor alle details omtrent de krimpverbindingen wordt verwezen naar bijlage B van het technisch eindverslag.



*Figuur 19 : Geoptimaliseerd ontwerp van een krimpverbinding.  
Parameters: Voltage : 20,0 kV (32,0 kJ)*



*Figuur 20 : Langse doorsneden van de verbinding getoond in Figuur 19*



*Figuur 21 : Resultaat van een trekproef uitgevoerd op een geoptimaliseerde krimpverbinding*

### III.2.6. Industriële case studies (Werkpakket 3)

Het gebruik van het magnetisch puls proces voor een aantal industriële toepassingen werd onderzocht (case studies), meer bepaald :

- opkrimpen van een steuning op een gechromeerde zuigerstang,
- afsluiten van stalen buizen via een roestvast stalen eindstuk.

De industriële case studies werden geselecteerd op basis van de inbreng van de leden van de gebruikerscommissie. De volledige beschrijving van de case studies is terug te vinden in bijlage B van het technisch eindverslag.

#### III.2.6.1. Opkrimpen van een steuning op een gechromeerde zuigerstang

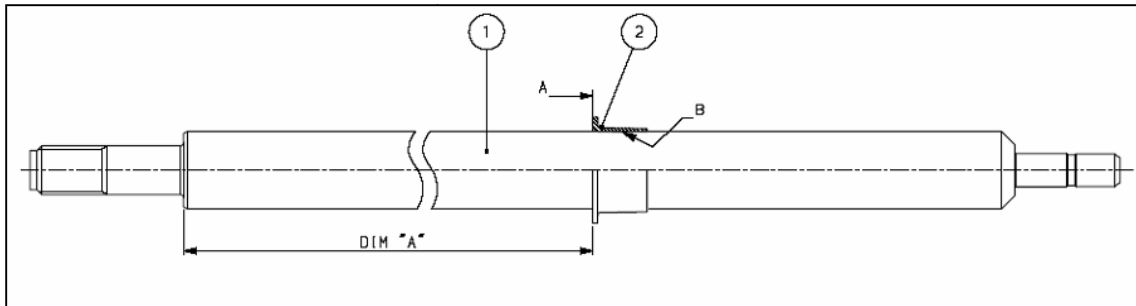
Twee testreeksen werden uitgevoerd voor het onderzoeken van de geschiktheid van het magnetisch puls krimpproces voor het bevestigen van een steuning aan een gechromeerde stalen zuigerstang (zie Figuur 22). In de eerste testreeks werden drie verschillende configuraties onderzocht, waarbij de breedte van de luchtspleet tussen de ring en de staaf gevarieerd werd. Geen profilering in de staaf werd aangebracht.

Uit de experimentele resultaten blijkt dat de ring gekrompen werd rond de staaf, doch dat geen lasverbinding gecreëerd werd. De chroom deklaag blijft in de meeste gevallen intact na de krimpprocedure.

Afschuifproeven werden uitgevoerd om de sterkte van de krimpverbindingen te bepalen. Een afschuifsterkte van 25 kN diende hierbij behaald te worden. Uit de beproeving blijkt dat de sterkte van de krimpverbindingen hoofdzakelijk bepaald werd door twee parameters : het energieniveau en de initiële luchtspleet tussen de ring en de staaf.

Bij gebruik van niet-geprofileerde staven kon de vereiste afschuifsterkte niet behaald worden. Om de sterkte te verhogen werd in de tweede testreeks een aantal ontwerpaanpassingen doorgevoerd. In de staaf werd een groef aangebracht, waarbij de breedte van de groef gevarieerd

werd (3, 5 en 7 mm). De resultaten van deze experimenten waren gunstig; de vereiste afschuifsterkte van 25 kN kon steeds behaald worden. De maximale sterkte wordt behaald voor een breedte van de luchtspleet gelijk aan 1 mm. De breedte van de groef beïnvloedt de sterkte van de krimpverbindingen niet.



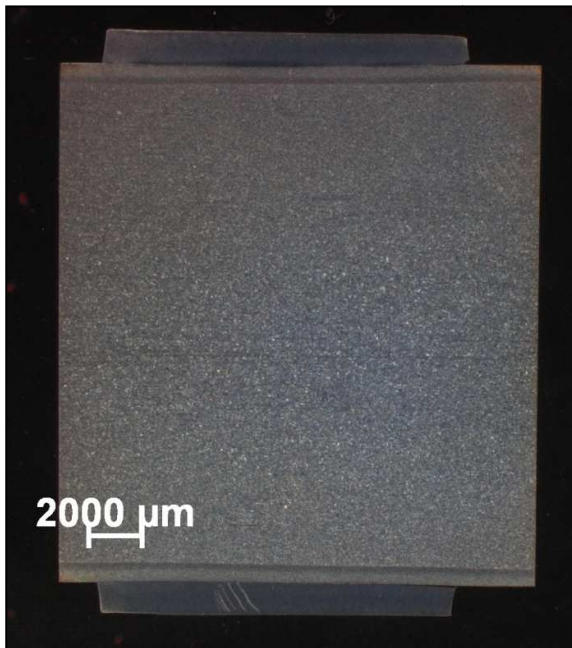
*Figuur 22 : Bevestiging van een ring (2) aan een gechromeerde stalen staaf (1)*



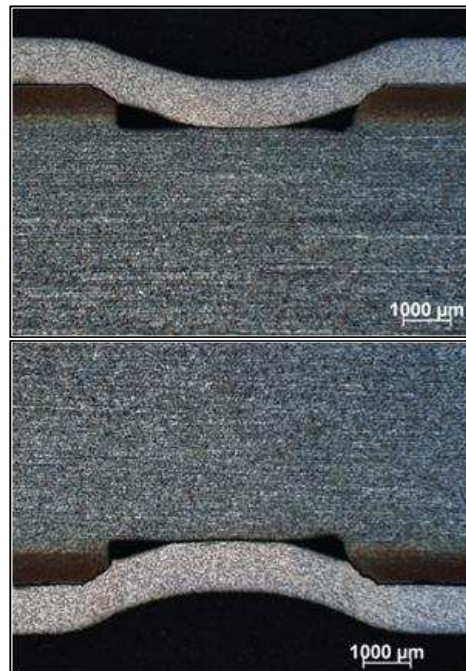
*Figuur 23 : Gekrompen ring op een gechromeerde stalen staaf (geen profilering van het inwendig werkstuk)*



*Figuur 24 : Gekrompen ring op een gechromeerde stalen staaf (geprofileerd inwendig werkstuk)*



*Figuur 25 : Gekrompen ring op een gechromeerde stalen staaf (geen profilering van het inwendig werkstuk) – Detail van Figuur 23*



*Figuur 26 : Gekrompen ring op een gechromeerde stalen staaf (geprofileerd inwendig werkstuk) – Detail van Figuur 24*

### III.2.6.2. Afsluiten van stalen buizen via een roestvast stalen eindstuk

Als tweede industriële case studie werden de mogelijkheden onderzocht voor het afsluiten van stalen buizen met behulp van een roestvast stalen eindstuk. Het buismateriaal was koolstofstaal en roestvast staal.

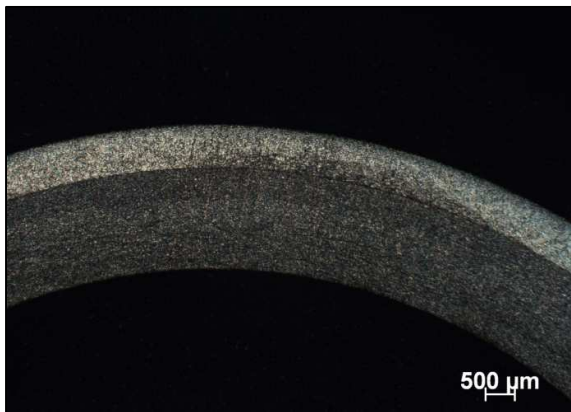
De parameters voor het uitvoeren van deze krimpverbindingen werden geoptimaliseerd. In een eerste fase werd de optimale positie van de werkstukken in de field shaper bepaald. Bij gebruik van buizen in koolstofstaal wordt slechts in enkele gevallen een goede krimpverbinding verkregen. Betere resultaten worden behaald bij gebruik van buizen in roestvast staal. Bij gebruik van koolstof stalen buizen is het immers mogelijk dat deze sterker vervormen van het eindstuk, zodat geen sterke krimpverbinding kan verkregen worden. De sterkte van de krimpverbindingen kan nog vergroot worden door gebruik te maken van een geprofileerde buis (aanbrengen groeven).



*Figuur 27 : Afsluiten van een koolstof stalen buis met een roestvast stalen eindstuk*



*Figuur 28 : Afsluiten van een roestvast stalen buis met een roestvast stalen eindstuk*



*Figuur 29 : Macroscopische opname van het opgekrompen eindstuk (zie Figuur 28)*



*Figuur 30 : Detail van Figuur 29 (maximale spleetbreedte : 90 μm)*

### III.2.7. Modelleren van het elektromagnetisch vervormen (Werkpakket 4)

#### III.2.7.1. Modelleren van het elektromagnetische hoge-snelheids-vervormingsproces (Deelwerkpakket 4.2)

Een volledig gekoppeld numeriek model van het magnetisch puls vervorm proces werd ontwikkeld, meer bepaald voor het comprimeren van buisvormige stukken. Het model werd ontwikkeld gebruik makend van de commerciële software Comsol Multiphysics, aangezien dit het enige softwarepakket is dat een directe koppeling toelaat van verschillende fysische fenomenen.

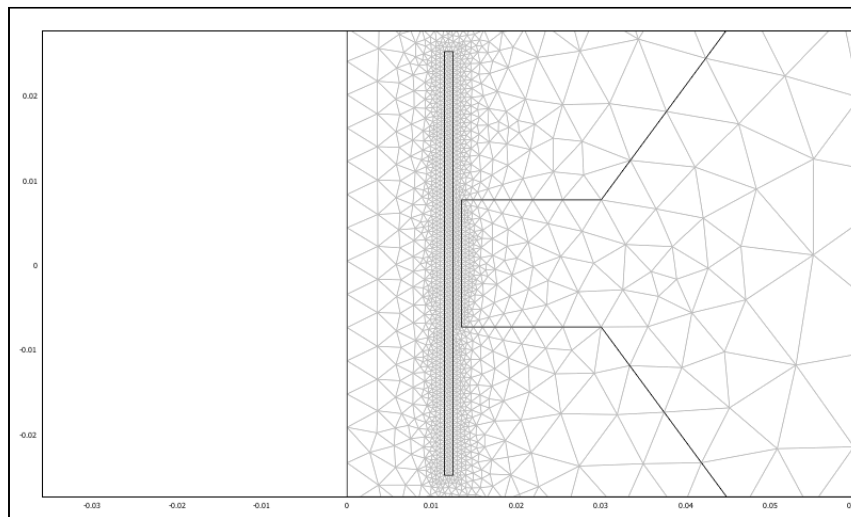
Numeriek modelleren van het elektromagnetisch vervormen vereist het gelijktijdig oplossen van elektromagnetische, mechanische en thermische vergelijkingen, aangezien deze zeer sterk gekoppeld zijn. De koppeling kan beschreven worden als volgt :

- Elektromagnetisme – Mechanica : De elektrische en magnetische velden genereren krachten die inwerken op ladingen en elektrische stromen in geleidende werkstukken. Deze krachten leiden tot de vervorming van het werkstuk.
- Mechanica – Elektromagnetisme : De vervorming van het werkstuk verandert de geometrie van het werkstuk, die op zijn beurt het elektromagnetische veld beïnvloedt. Het ontrekt eveneens energie aan het elektromagnetische veld.
- Elektromagnetisme – Thermodynamica : De stromen die vloeien in de werkstukken zorgen ervoor dat de temperatuur verhoogt, tengevolge van het Joule-effect.
- Thermodynamica – Elektromagnetisme : De temperatuursverandering in het werkstuk verandert de elektromagnetische eigenschappen ervan (temperatuursafhankelijkheid van de conductiviteit).
- Mechanica – Thermodynamica : De mechanische arbeid uitgeoefend door de Lorentz-krachten wordt gedeeltelijk opgeslagen als elastische potentiële energie. Wanneer het materiaal begint te vervormen, wordt deze energie omgezet in warmte. Dit verhoogt de temperatuur van het werkstuk.
- Thermodynamica – Mechanica : De temperatuurstoename leidt tot thermische spanningen en beïnvloeden de mechanische eigenschappen van het werkstuk (verzachting, zoals beschreven door het Johnson-Cook model).

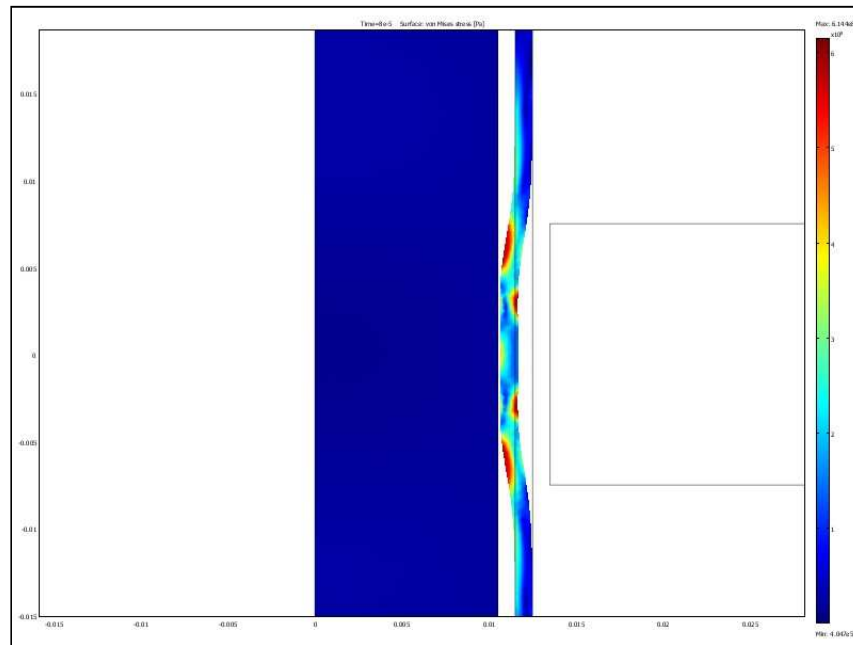
Een 3D-elektromagnetisch model van de field shaper werd opgesteld om de stroomdistributie in dit onderdeel te bepalen. De modellen kunnen ook gebruikt worden voor optimalisatie van dergelijke field shapers.

Het model laat toe om de elektromagnetische, mechanische en thermische fenomenen te beschrijven en te voorspellen. Meer bepaald werd een model ontwikkeld voor het comprimeren van buisvormige stukken. Ter validatie van het model werden met de proefopstelling experimenten uitgevoerd voor het comprimeren van buizen in S235. Het model vertoont goede overeenkomsten met de experimentele resultaten.

De resultaten van het model toegepast voor minder goed geleidende materialen zoals bv. staal, laat toe een aantal fenomenen te onderzoeken die voorheen nog niet beschreven werden in de literatuur. Het incorporeren van een contact algoritme in het model laat toe om verbindingprocessen te bestuderen.



*Figuur 31 : Detail van het model van de field shaper en spoel*



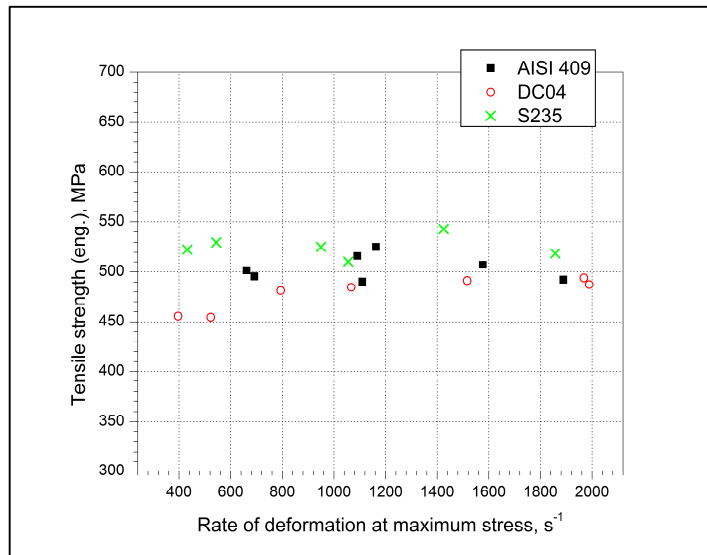
*Figuur 32 : Gemodelleerde spanningen bij een krimpbewerking*

### III.2.7.2. Bepaling van de inputgegevens (Deelwerkpakket 4.1)

De onderzoeksgroep Mechanica van Materialen en Constructies (MMS) van de Universiteit van Gent is gespecialiseerd in het karakteriseren van materialen bij hoge vervormingsneden. Hiervoor beschikt deze onderzoeksgroep over verschillende zelf-ontworpen Split Hopkinson Bar (SHB) proefopstellingen.

In het MAGPULS project heeft deze onderzoeksgroep een aantal materialen onderzocht, die gebruikt werden in de eindige-elementen modellen, meer bepaald het roestvast staal AISI 409, het dieptrekstaal DC04 and het constructiestaal S235. De afhankelijkheid van de materiaaleigenschappen van de vervormingssnelheid en de temperatuur werd hierbij onderzocht.

In Figuur 33 wordt de treksterkte getoond in functie van de vervormingssnelheid voor de 3 onderzochte materialen. De invloed van de vervormingssnelheid is duidelijk materiaalafhankelijk. Voor het dieptrekstaal DC04 is een positieve invloed merkbaar : het spanningsniveau neemt toe als de vervormingssnelheid toeneemt, terwijl voor de andere materialen de invloed beperkt blijft.



Figuur 33 : Treksterkte in functie van de vervormingssnelheid van de onderzochte materialen (de aangeduide vervormingssnelheid is deze bereikt bij de maximale spanning)

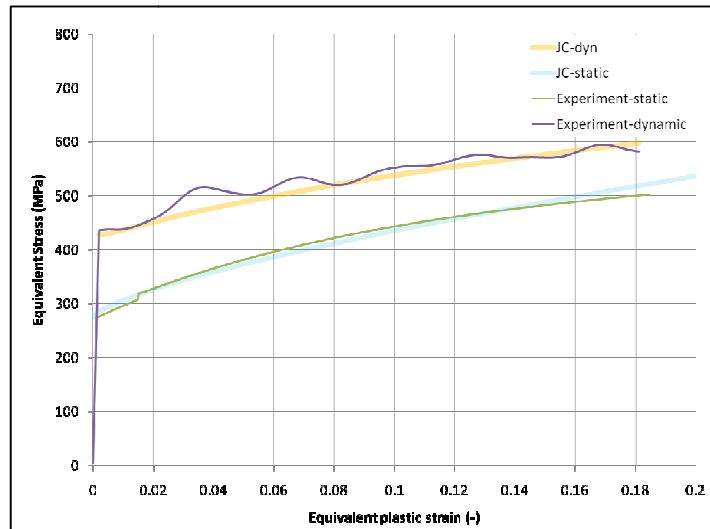
De resultaten hiervan werden aangewend om de constitutieve wetten op te stellen, die vervolgens gebruikt werden door OCAS in de eindige-elementen modellen. Het Johnson-Cook fenomenologisch model werd gebruikt om de relatie te beschrijven tussen de spanning  $\sigma$  en de rek  $\epsilon$  :

$$\sigma = \left( A + B\epsilon^n \right) \left( 1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \left( 1 - \left[ \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right]^m \right)$$

Deze modellen houden rekening met de versterking door de vervorming en met thermische effecten. Bij een vervorming aan hoge snelheid neemt de temperatuur in het proefstuk toe tengevolge van adiabatische opwarming. De modelparameters A, B en n werden bepaald op basis van de statische trek-reekurven. C en m werden berekend via de resultaten van de hogesnelheidstrekproeven.

Het Johnson-Cook model roestvaste staal AISI409 wordt getoond in Figuur 34.





*Figuur 34 : Experimentele statische en dynamische trek-rek diagrammen en gesimuleerde curves via het Johnson-Cook model voor AISI409 staal.*

### III.2.8. Werkpakket 5 : Dienstverlening en innovatiestimulering

Voor de taken verricht voor werkpakket 5 wordt verwezen naar het valorisatieverslag.