

## Flitsgieten van aluminium schrootmaterialen

***Citation for published version (APA):***

Sillekens, W. H. (1989). *Flitsgieten van aluminium schrootmaterialen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0687). Technische Universiteit Eindhoven.

***Document status and date:***

Gepubliceerd: 01/01/1989

***Document Version:***

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

***Please check the document version of this publication:***

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

***General rights***

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

[www.tue.nl/taverne](http://www.tue.nl/taverne)

***Take down policy***

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

[openaccess@tue.nl](mailto:openaccess@tue.nl)

providing details and we will investigate your claim.

Technische Universiteit Eindhoven  
Faculteit der Werktuigbouwkunde  
Vakgroep Productietechnologie en -Automatisering  
Laboratorium voor Omvormtechnologie

"Flitsgieten van aluminium  
schrootmaterialen"

tussenverslag T.U.E.

door ir. W.H.Sillekens

januari 1989  
IOPF

WPA 0687

"Directe verwerkbaarheid en omvormbaarheidsgedrag"

## INHOUD

1. Inleiding	pag. 1
2. Onderzoek naar de directe verwerkbaarheid van flitsgegoten lint	pag. 2
2.1. Stafextrusie van "flakes" bij kamertemperatuur	pag. 4
2.2. Consolidatie van "poeder" bij kamertemperatuur	pag. 6
2.3. Sinteren	pag. 8
3. Geschiktheid van flitsgegoten en warm-geëxtrudeerd "scrap" voor verdere omvormprocessen	pag.10
4. Perspectief	pag.11
5. Literatuur	pag.14

---

Bijlage	Verificatie van het opgestelde extrusiemodel	pag.15
---------	--	--------

## 1. INLEIDING

In de eerste periode waarin de T.U.-Eindhoven heeft deelgenomen aan het "flitsgietsproject" is vooral aandacht besteed aan de bestudering van het extrusieproces met behulp van het eindige-elementen programma FARM en aan het opstellen van een nieuw extrusiemodel voor verstevigend, incompressibel materiaal. De ervaringen met het eindige-elementen programma zijn vastgelegd in een artikel dat voor publicatie in het tijdschrift "MB-produktietechniek" wordt ingezonden (lit.1). Het nieuwe extrusiemodel is behandeld in een intern T.U.E.-rapport (lit.2). Dit nieuwe model is nog experimenteel getoetst voor wat betreft de extrusiekracht; het resultaat hiervan is gegeven in de bijlage bij dit rapport.

In de afgelopen maanden heeft het accent gelegen op het onderzoeken van mogelijkheden om flitsgegoten lint direct te verwerken tot (half-)product. Het is mogelijk enige parameters te onderscheiden die de verwerkbaarheid bepalen. Hiermee is een schema opgesteld van mogelijke procesroutes. Het werk dat op dit gebied werd verricht is gepresenteerd in hoofdstuk 2. Om een indruk te krijgen van de eigenschappen van het flitsgegoten en warm-geëxtrudeerde materiaal uit Delft zijn hiermee enkele proeven uitgevoerd die zijn beschreven in hoofdstuk 3. Aan de hand van de ervaringen die tot nu toe zijn opgedaan wordt het toekomstig onderzoek geformuleerd in hoofdstuk 4.

## 2. ONDERZOEK NAAR DE DIRECTE VERWERKBAARHEID VAN FLITSGEGOTEN LINT

In de afgelopen periode is een aanzienlijk deel van de inspanning gericht geweest op het onderzoeken van mogelijkheden om op directe wijze uit flitsgegoten lint een massief (half)-product te maken. In eerste instantie zijn hierbij de technisch meest eenvoudige (en dus economisch meest aantrekkelijke) alternatieven onderzocht. Om een indeling te maken van mogelijke procesroutes is nagegaan of er enkele parameters zijn te onderscheiden waarvan verwacht wordt dat deze een belangrijke invloed op het consolidatieproces<sup>1</sup> hebben.

Als eerste parameter komt de verwerkingstemperatuur in aanmerking. De temperatuur heeft niet alleen een directe invloed (diffusie, ductiliteit, etc.), maar ook een indirecte: de vloeispanningsafname door temperatuurverhoging maakt, in verband met de gereedschapsbelasting, processen met grotere deformaties mogelijk, wat gunstig wordt geacht voor consolidatie.

Een tweede parameter wordt gevormd door het al of niet toepassen van een gloeibehandeling vóór de (plastische) bewerking, het zogenaamde "ontgassen". Ontgasbehandelingen worden in de poedermetallurgische verwerking van aluminium toegepast om het aan de oxidehuid geadsorbeerde water te verwijderen en de oxidehuid zelf te dehydrateren. Er bestaan aanwijzingen dat de oxidehuid hierdoor brosser wordt, wat het opbreken van de huid en hiermee het hechten van de deeltjes zal vergemakkelijken. Bovendien wordt gasontwikkeling, met als mogelijke gevolgen porievorming of het losraken van de deeltjes tijdens verdere verwerking, voorkomen (lit.3, pag.11-12).

Zoals in §2.2 zal blijken speelt de vorm van het uitgangsmateriaal ook een rol. Er wordt ingedeeld in:

1. "flakes": lint dat in stukjes van enkele millimeters is gehakt. Hierbij is lengte > breedte » dikte.
2. "poeder": flakes die vermalen zijn zodat de dimensies meer aan elkaar gelijk zijn. Hierbij wordt nog naar korrelgrootte onderscheiden.

Deze tweedeling is als derde parameter gehanteerd.

---

<sup>1</sup> consolidatie = hechting van de deeltjes tot stand brengen

Uitgaande van deze drie parameters kan een schema worden opgesteld waarin mogelijke procesroutes zijn aangegeven. Dit is weergegeven in figuur 1. De mogelijke routes zijn aangeduid met de letters A tot en met H.



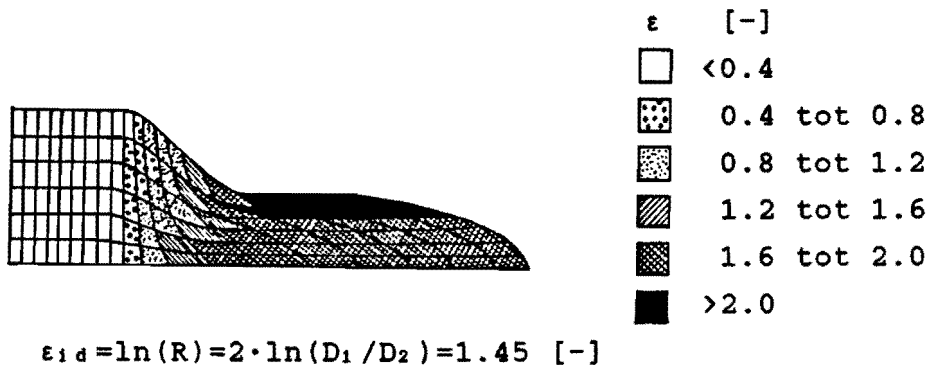
*Figuur 1 Schema van mogelijke procesroutes van flitsgegoten aluminium*

Om enig inzicht in de invloed van de parameters op het ontstaan van hechting tussen de deeltjes te krijgen zijn verschillende experimenten uitgevoerd. In de volgende paragrafen wordt hiervan een overzicht gegeven.

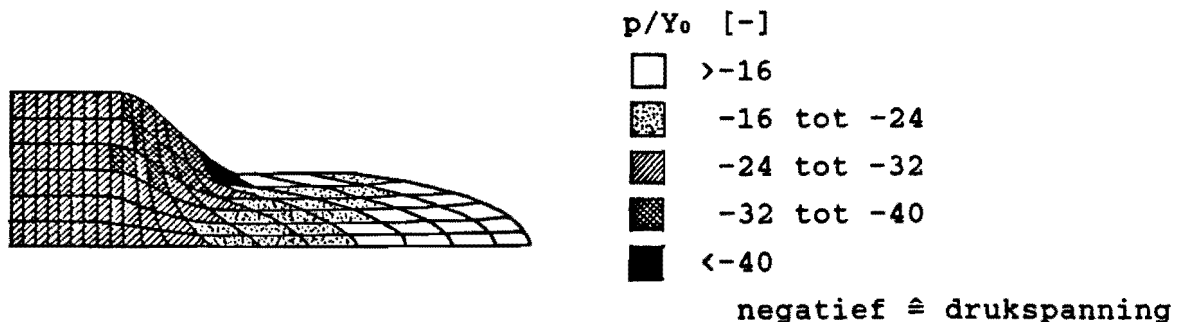
## 2.1. STAFEXTRUSIE VAN "FLAKES" BIJ KAMERTEMPERATUUR

Uit berekeningen met het eindige-elementen programma voor plastische processen (FARM) blijken er bij voorwaartse stafextrusie grote (afschuif-)deformaties en hoge isostatische drukspanningen op te treden (zie figuur 2 voor een voorbeeld). Juist de combinatie van deze twee karakteristieken doet vermoeden dat dit een gunstige invloed op het opbreken van de oxidehuid en het aan elkaar "wellen" van de deeltjes heeft.

### \* effectieve rek



### \* isostatische spanning, genormeerd op initiële vloeispanning



begindiameter  $D_1 = 28.5$  mm, einddiameter  $D_2 = 13.8$  mm

halve matrijshoek  $\alpha = 40^\circ$

wrijvingsfactor  $m = 0.4$  [-], verstergingscoëfficiënt  $n = 0.25$  [-]

*Figuur 2 Resultaten van het eindige-elementen programma FARM (stafextrusie, stationaire toestand)*

Experimenteel is nagegaan of flitsgegoten flakes door staf-extrusie bij kamertemperatuur te consolideren zijn (procesroute C: flakes ontgast). Als belangrijke verschillen met stafextrusie van conventioneel aluminium kunnen genoemd worden:

- \* de compressibiliteit van de billet,
- \* de hoge vloeispanning van het werkstukmateriaal bij kamertemperatuur,
- \* de onmogelijkheid om smering toe te passen.

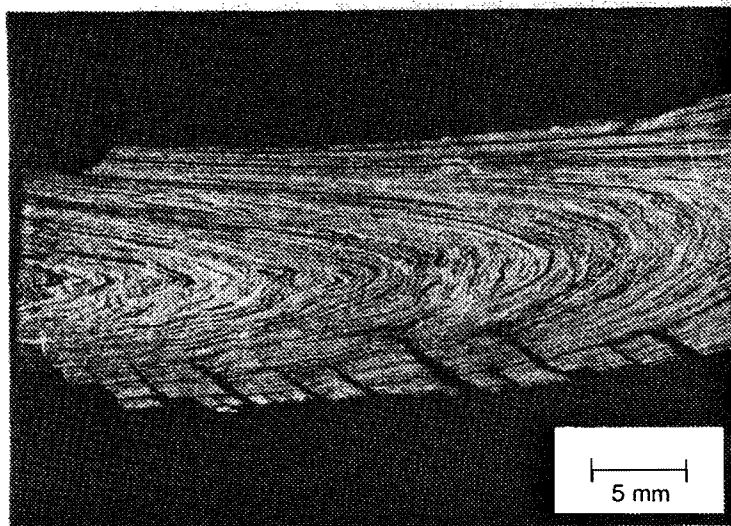
De twee laatst genoemde verschillen leiden tot (in vergelijking) hoge gereedschapsbelastingen. De toepasbare oppervlaktereductie bij stafextrusie van flitsgegoten flakes is daardoor beperkt. Figuur 3 toont een langsdoorsnede van het product dat bij de maximaal mogelijke oppervlaktereductie ( $R=4.3 [-]$ ) ontstaat. Hierbij valt op dat de hechting niet goed is; de oorspronkelijke lamellen zijn nog goed te herkennen. De scheuren aan de rand zijn waarschijnlijk het gevolg van de gebrekkige smering.

begindiameter  $D_1=28.5$  mm  
 einddiameter  $D_2=13.8$  mm  
 halve matrijshoek  $\alpha=40^\circ$

materiaal:  
 flitsgegoten flakes

ontgast in vacuüm  
 (1 uur,  $430^\circ\text{C}$ )

compacteerkracht 1000 kN  
 extrusiekracht 1250 kN



*Figuur 3 Extrusieproduct van flakes bij kamertemperatuur*

Samenvattend: Een grote oppervlaktereductie zal bevorderend werken op het ontstaan van hechting; de toepasbare reductie echter is beperkt door de eigenschappen van het materiaal. Consolidatie van de flakes door stafextrusie bij kamertemperatuur is niet mogelijk.



## 2.2. CONSOLIDATIE VAN "POEDER" BIJ KAMERTEMPERATUUR

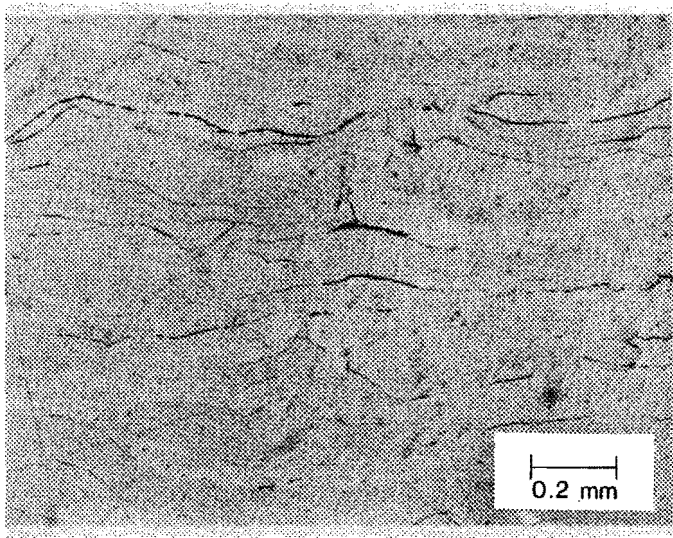
Omdat het vermoeden bestond dat de vorm van de flakes ongunstig is voor het consolidatieproces is er geëxperimenteerd met gemalen flakes, waarbij de deeltjes gelijkmatiger en kleiner zijn. Dit "poeder" is na het malen gezeefd in verschillende zeven en aldus is een indeling in 4 klassen van deeltjesgrootten verkregen: <212  $\mu\text{m}$ , 212-425  $\mu\text{m}$ , 425-710  $\mu\text{m}$  en >710  $\mu\text{m}$ . De deeltjesgrootte is één variabele in de experimenten. Als tweede variabele is het wel of niet toepassen van een ontgasbehandeling genomen. Het ontgassen bestond uit het gloeien van de poeders gedurende 1 uur bij 430 °C in vacuum. Met deze twee variabelen zijn aldus acht mogelijkheden gekregen (procesroutes E en G in het schema van figuur 1).

De verschillende poeders zijn gecompacteerd bij kamertemperatuur in een cilindrische matrijs ( $\varnothing 28.5$  mm) met een perskracht van 1000 kN. De samenhang was op het eerste gezicht goed, zeker vergeleken met het analoge experiment op ongemalen flakes. Hierbij was de samenhang zó slecht dat het proefstuk weer uit elkaar viel (stro-baal).

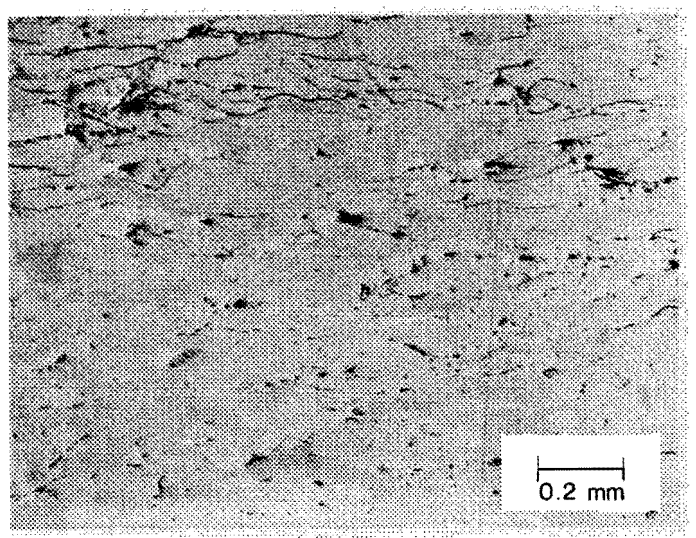
Lichtmicroscopische opnamen van de proefstukken (voorbeelden in figuur 4) laten zien dat het ontgassen een gunstige invloed op de samenhang heeft en dat er een tendens van een betere samenhang bij een kleinere korrelgrootte bestaat.

Wordt een gecompacteerd proefstuk (ontgast poeder, klasse: 710-425  $\mu\text{m}$ ) vervolgens geëxtrudeerd bij kamertemperatuur dan blijken de deeltjes weer herkenbaar en de hechting niet ideaal te zijn (figuur 5).

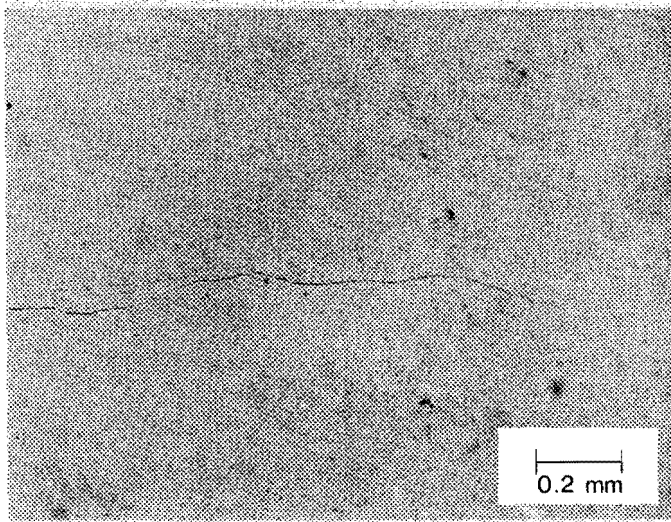
Samenvattend: De vorm van de flakes is ongunstig voor het ontstaan van hechting. Meer korrelvormige deeltjes zijn beter, maar ook hierbij is een goede consolidatie door stafextrusie bij kamertemperatuur niet mogelijk. Ontgassen lijkt een noodzakelijke stap te zijn.



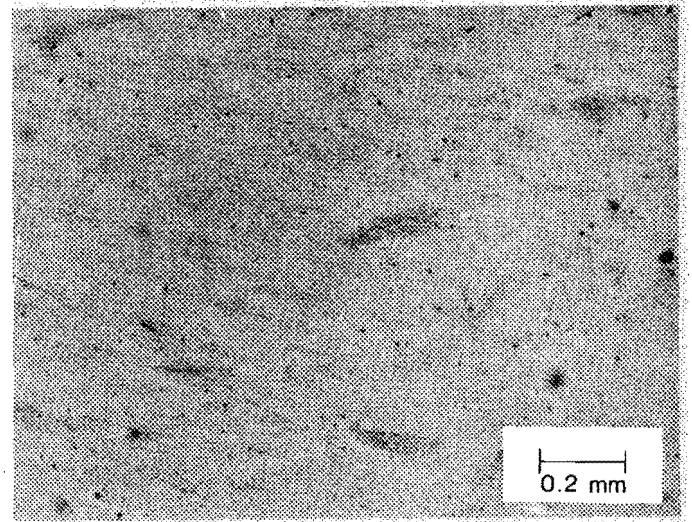
425-710  $\mu\text{m}$ , niet ontgast



<212  $\mu\text{m}$ , niet ontgast



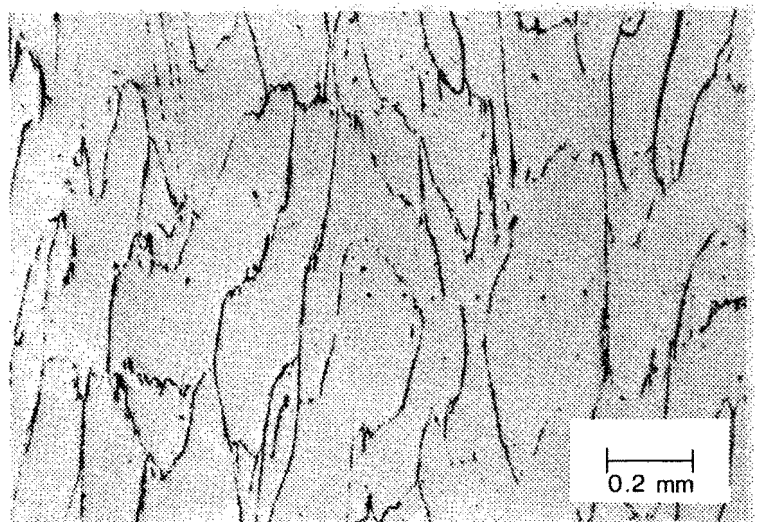
425-710  $\mu\text{m}$ , ontgast



<212  $\mu\text{m}$ , ontgast

*Figuur 4 Invloed van ontgasbehandeling en korrelgrootte van het poeder op de structuur van gecompacteerde proefstukken*

begindiameter  $D_1 = 28.5 \text{ mm}$   
 einddiameter  $D_2 = 13.8 \text{ mm}$   
 halve matrijshoek  $\alpha = 40^\circ$   
 materiaal:  
     flitsgegoten poeder  
 compacteerkracht 1000 kN  
 extrusiekracht 500 kN  
     gesmeerd  
 langsdoorsnede



*Figuur 5 Extrusieproduct van poeder bij kamertemperatuur*

### 2.3. SINTEREN

Het snelle afkoelen uit de smelt is een essentiële stap in het recycling-proces omdat hierdoor de legeringselementen worden "ingevroren" die bij normale stolling de materiaaleigenschappen negatief beïnvloeden. Om na te gaan hoe de structuur en de eigenschappen van flitsgegoten aluminium op een sinterbehandeling reageren werd het volgende experiment uitgevoerd:

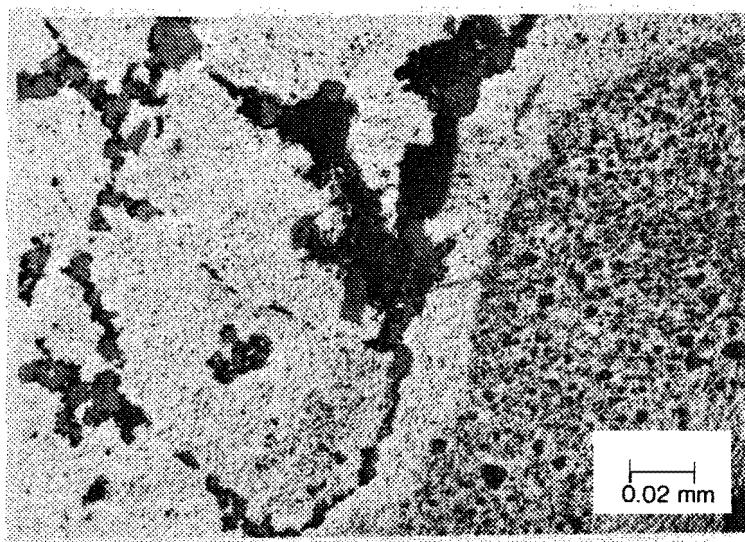
Er werd een sinterblokje geperst van flakes ( $\phi 28.5$  mm, perskracht 1000 kN), nadat deze eerst ontgast zijn (1 uur bij 430 °C in vacuum). Hierna is het blokje een uur lang gesinterd in vacuum bij 600 °C. Deze proef is dus een voorbeeld van combinatie D in het schema van figuur 1.

De structuur van het gesinterde blokje wordt gekenmerkt door een groot aantal uitscheidingen en holtes, zoals blijkt uit lichtmicroscopische opnamen (figuur 6). De uitscheidingen bevinden zich met name op korrelgrenzen. SEM-analyse toonde aan dat deze uitscheidingen uit verschillende elementen en verbindingen bestaan (verbindingen van Al en Si en de oxides, Cu, Fe, S, Cl, Na, K, Ca, etc.). De holtes kunnen enerzijds ontstaan zijn doordat er bij het compacteren geen 100 % dichtheid wordt gehaald. Een andere factor die een rol speelt bestaat hierin, dat er verhit is tot boven de ontgastemperatuur waardoor er alsnog gasontwikkeling heeft plaatsgevonden.

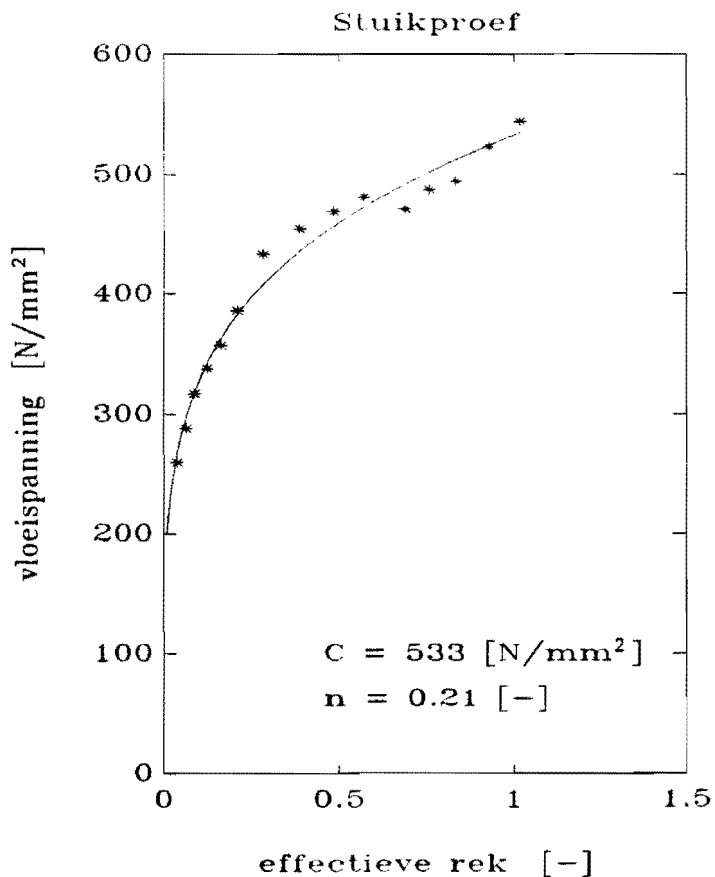
Ondanks deze structuur is het gedrag van het materiaal in een stukproef goed te noemen (figuur 7). Pas bij een effectieve rek  $\epsilon > 1$  [-] beginnen zich aan de omtrek van het proefstuk scheuren af te tekenen. Het vloeigedrag kan redelijk worden beschreven met de Hollomon-relatie ( $\sigma_v = C \cdot \epsilon^n$ ), waarbij  $C = 533$  [N/mm<sup>2</sup>] en  $n = 0.21$  [-]. In vergelijking met het warm geëxtrudeerde laboratorium-strip uit Delft, waarvan  $C = 638$  [N/mm<sup>2</sup>] en  $n = 0.20$  [-] (trekproef), is de vloeikromme verlaagd, wat terug te voeren is op de uitscheidingen. Een vergelijking met hoogwaardige conventionele aluminiumlegeringen (AlCuMg:  $C = 370-530$  [N/mm<sup>2</sup>],  $n = 0.20-0.15$  [-]) toont dat deze waarden toch nog zeer aanzienlijk zijn. Een voorbehoud dat moet worden gemaakt is dat de eigenschappen bij andere beproevingsmethoden (bijvoorbeeld bij trekbelasting) kunnen verschillen ten opzichte van die van de stukproef (bij stuk worden eventuele poriën dichtgedrukt!).

Samenvattend: Door een sinterbehandeling bij 600 °C treedt er een veelheid aan uitscheidingen en holtes op in flitsgegoten aluminium. De stabiliteit van de plastische eigenschappen echter is groter dan verwacht.

Lichtmicroscopische  
opname



Figuur 6 Structuur van een gesinterd blokje (uit flakes)



Figuur 7 Vloeikromme van gesinterd materiaal.  
Experiment (\*) en "gefitte" curve (getrokken lijn)

### 3. GESCHIKTHEID VAN FLITSGEGOTEN EN WARM-GEESTRUDEERD "SCRAP" VOOR VERDERE OMVORMPROCESSEN

Een deel van de taak van "Eindhoven" in het flitsgietsproject bestaat uit het onderzoek naar de geschiktheid van het flitsgegoten en warm-geëxtrudeerde scrap-materiaal voor verdere omvormprocessen. Tot voor kort echter was nog geen materiaal voorhanden dat op industriële schaal geproduceerd is. Een uitgebreide studie van de omvormeigenschappen (van laboratorium-materiaal) leek ons daarom nog niet erg nuttig: deze eigenschappen kunnen niet zonder meer geëxtrapoleerd worden.

Om toch een indruk te krijgen van het gedrag van het materiaal zijn enkele experimenten uitgevoerd met strip (doorsnede: 8.0 mm \* 1.6 mm) dat op laboratorium-schaal in Delft is geproduceerd.

Met de trekproef zijn de parameters C en n volgens de vloeifunctie van Hollomon ( $\sigma_v = C \cdot \epsilon^n$ ) bepaald; parameters die in de procesanalyse vaak gebruikt worden om het vloeigedrag van het materiaal te karakteriseren. Uit de proef volgde een voor aluminium extreem hoog gelegen vloeikromme die met  $C=638$  [N/mm<sup>2</sup>] en  $n=0.20$  [-] goed wordt beschreven (rekbereik:  $0 < \epsilon < 0.12$  [-]).

Een tweede experiment betrof de stabiliteit van de structuur bij temperatuurverhoging en de temperatuur waarbij het materiaal rekristalliseert. Deze factoren zijn zowel bij het gebruik als bij het verwerken op verhoogde temperatuur van belang. Stukjes strip werden gedurende 1 uur in vacuum gegloeid bij verschillende temperaturen: 480 °C, 500 °C, 520 °C, 530 °C, 540 °C en 550 °C. Hieruit werden preparaten gemaakt van langs- en dwarsdoorsnede. Bestudering met het lichtmicroscop leert het volgende:

- \* Bij gloeitemperaturen hoger dan ±530 °C ontstaan er poriën in het materiaal die groter zijn naarmate de temperatuur hoger is geweest.
- \* De lamelbegrenzungen vervagen over het algemeen meer naarmate de gloeitemperatuur hoger is.

Volledige rekristallisatie trad pas op in een preparaat dat gedurende 1½ uur bij 560 °C gegloeid was. De porievorming was hierbij zó ernstig dat het product totaal onbruikbaar is geworden.

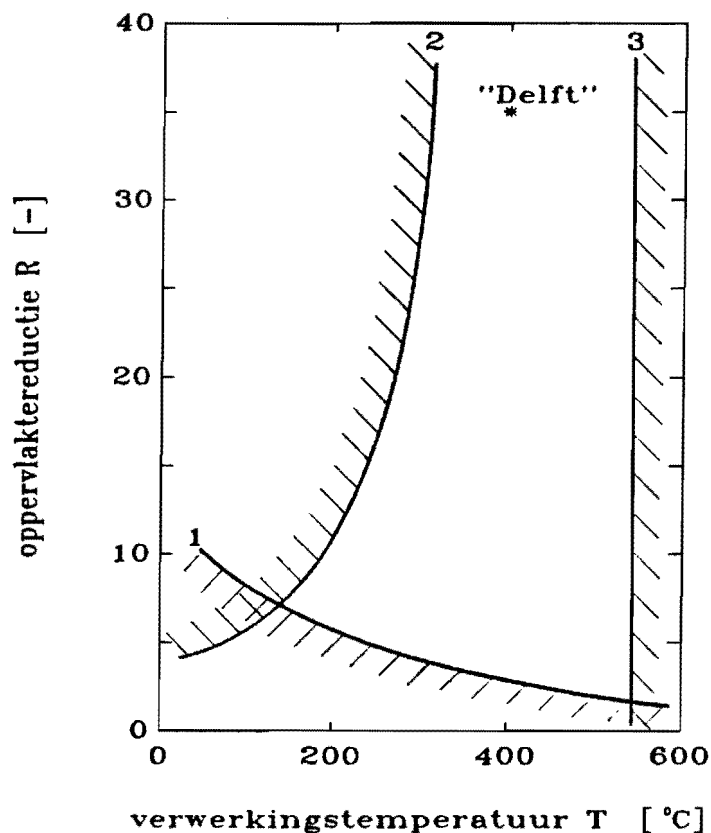
Samenvattend: Het gebruik van het materiaal is aan een maximumtemperatuur gebonden, voornamelijk omdat er boven deze temperatuur porievorming optreedt. Deze temperatuur is in principe te verhogen door te ontgassen op een hogere temperatuur (lit.3).

#### 4. PERSPECTIEF

Dit rapport zal worden besloten met het formuleren van het toekomstig onderzoek.

Voor wat betreft de directe verwerking van flitsgegoten materiaal tot (half-)product is gebleken dat consolidatie (door stafextrusie) bij kamertemperatuur niet mogelijk is. Verhoging van de verwerkingstemperatuur lijkt noodzakelijk: doordat de vloeispanning afneemt kunnen grotere reducties worden toegepast. Voor de korte termijn gaan de gedachten uit naar het opstellen van een grafiek waarin op de horizontale as de temperatuur en op de verticale as de oppervlaktereductie bij stafextrusie zijn uitgezet. Voor elke combinatie van temperatuur en oppervlaktereductie kan experimenteel worden nagegaan of er hechting tussen de deeltjes ontstaat. In de grafiek kan hierna een lijn worden ingetekend die het "gebied" waarin géén hechting ontstaat scheidt van het gebied waarin dat wel het geval is. Verwacht wordt dat in deze grafiek nóg enkele begrenzingslijnen moeten worden getrokken, bijvoorbeeld de grens van maximale gereedschapsbelasting en de grens van maximale verwerkingstemperatuur. In figuur 8 is een schets van de grafiek gegeven; de begrenzingslijnen zijn voorlopig denkbeeldig.

Een andere parameter die van belang is in dit verband is de initiële dichtheid van de billet. Deze kan als derde "as" aan de grafiek worden toegevoegd, waarbij zijn invloed op de consolidatie eveneens experimenteel kan worden vastgelegd. Op basis van de aldus bepaalde uitgebreide grafiek kunnen processen aangegeven worden die geschikt zijn om het materiaal te verwerken ("productie-venster").



Begrenzingslijnen:

1. geen hechting - hechting
2. maximale gereedschapsbelasting
3. maximale verwerkingstemperatuur

Figuur 8 "Productievenster"-grafiek voor consolidatie van flitsgegoten flakes (principeschets)

Als verdere mogelijkheid kan gedacht worden aan het thermo-mechanisch verwerken van het materiaal. Hiermee wordt in principe verwezen naar elke (zinvolle) combinatie van warmtebehandeling en plastische deformatie. Van bijzonder belang zijn de behandelingen waarbij er structuurveranderingen in het materiaal optreden. Voor wat betreft de consolidatie van flitsgegoten materiaal kan gedacht worden aan een omvormende bewerking bij de rekristallisatietemperatuur. Die omvormende bewerking kan bijvoorbeeld extrusie of smeden zijn, d.w.z. een proces dat past in het "productievenster".

Een ander onderzoeksgebied zou het modelleren van het extrusieproces zoals dat in Delft bedreven wordt kunnen zijn. Hier wordt geëxtrudeerd bij hoge temperatuur ( $\pm 400$  °C) en grote oppervlaktereductie ( $\pm 35$  [-]) met een "180°-matrijs". De billets bestaan uit koud gecompacteerd flakes met een dichtheid van  $\pm 60$  %. Hieruit volgt dat de verdichting een essentiële grootheid

in een op te stellen extrusiemodel moet zijn. De plasticiteitsanalyse voor poreuze metalen biedt aanknopingspunten voor een dergelijke procesanalyse (lit.4). Hierbij wordt de dichtheid als een functie van de isostatische druk in rekening gebracht. Doel van een dergelijk model zou kunnen zijn:

- \* het voorspellen van het dichtheidsverloop en de rekverdeling in het product als "kwaliteitskenmerken",
- \* een beter inzicht krijgen in de factoren die de "kwaliteit" beïnvloeden,
- \* het berekenen van de extrusiekracht.

De nadruk dient, in tegenstelling tot veel vroegere modellen, vooral te liggen bij de berekening van lokale grootheden als isostatische spanning, dichtheid en rekken; het ontstaan van hechting immers is een proces dat lokaal plaats moet vinden! Hierbij zijn vooral dié plaatsen van belang waar deze lokale grootheden hun maximale, respectievelijk minimale waarden aannemen.

Het warm-geëxtrudeerde half-product zoals dat door "Delft" wordt geproduceerd kan worden onderzocht op zijn geschiktheid voor verdere plastische verwerking tot eindproduct. Hiervoor worden proefnemingen gedaan die gericht zijn op het vastleggen van materiaaleigenschappen die van belang zijn voor de omvormbaarheid, zoals:

- \* ductiel falen (het ontstaan van scheuren bij plastisch deformereren),
- \* plastische anisotropie (richtingafhankelijkheid van plastische eigenschappen),
- \* het vloeigedrag bij temperatuurverhoging,
- \* het vloeigedrag bij niet-rechte rekweg, waaronder het Bauschinger-effect,
- \* thermische (in-)stabiliteit.

Deze proeven worden gecombineerd met experimenten die de geschiktheid voor bepaalde omvormprocessen concreet onderzoeken. Hierbij wordt gedacht aan processen als dieptrekken, extruderen van hulzen, buigen, smeden en draadtrekken. Als aanverwante processen kunnen ook de scheidende bewerkingen worden onderzocht (ponsen, verspanen).



## 5. LITERATUUR

- [1] van Liempd J.H., Dautzenberg J.H., Kals J.A.G.,  
"Een eindige-elementenpakket voor omvormprocessen op  
personal computer",  
ingestuurd voor publicatie in "MB-produktietechniek".
- [2] Perduijn A.B.,  
"Analyse van voorwaartse stafextrusie m.b.v. de bovengrens-  
methode",  
WPA-rapport 0613, Faculteit der Werktuigbouwkunde,  
Technische Universiteit Eindhoven, september 1988.
- [3] Loué W.R.,  
"Mogelijkheden en beperkingen van de poedermetallurgie voor  
aluminium matrix composieten",  
Sectie Metallurgie en Stollingstechnologie (PT1),  
Faculteit der Metaalkunde/Materiaalkunde, oktober 1986.
- [4] Shima S., Oyane M.,  
"Plasticity Theory for Porous Metals",  
International Journal of Mechanical Sciences 18 (1976)  
pp.285-291.
- [5] Boes P.J.M., Pouw H.P.,  
"De berekening van de krachten bij het extruderen en het  
koudvervormen 1 en 2",  
Metaalbewerking 31 (1965) nr.9 en 10, bladzijden 181-185 en  
215-221.

### VERIFICATIE VAN HET OPGESTELDE EXTRUSIEMODEL

Het in het kader van het onderzoek ontwikkelde extrusiemodel (lit.2) is opgesteld onder de conditie van incompressibiliteit en brengt verstevigend materiaalgedrag in rekening. Dit model is een eerste aanzet en dient (eventueel) uitgebreid te worden naar compressibiliteit.

Om het model te toetsen (voor wat betreft de extrusiekracht) is geëxperimenteerd bij kamertemperatuur met de conventionele aluminiumkwaliteit Al-2S-HH. Uit een stukproef volgt voor de vloeiparameters volgens Hollomon:  $C=138$  [N/mm<sup>2</sup>] en  $n=0.25$  [-]. Deze gegevens dienen samen met de matrijsgegevens als invoer voor het model. Voor de extrusieproef is gebruik gemaakt van een matrijs die de diameter reduceert van  $D_1=28.5$  mm tot  $D_2=13.8$  mm (oppervlaktereductie  $R=4.3$  [-]) en met een halve matrijshoek  $\alpha=40^\circ$ . Het krachtmaximum treedt op in het begin van de slag (185 kN); hierna neemt de kracht af tot aan het einde (167 kN). Het model voorspelt voor een wrijvingsfactor  $m=0$  [-] (wrijvingsloos) een kracht van 168 kN en voor  $m=0.2$  [-] een kracht van 173 kN. De overeenstemming met het experiment is dus goed. Een berekening volgens de vuistformule van Boes en Pouw (lit.5) geeft een kracht van 259 kN, een voorspelling die aanzienlijk slechter is.

---