



Delft University of Technology

## Smeden

### (not) safe for designers? - XIV

Tempelman, Erik

#### Publication date

2021

#### Document Version

Final published version

#### Published in

De Constructeur

#### Citation (APA)

Tempelman, E. (2021). Smeden: (not) safe for designers? - XIV. *De Constructeur*, 61(6), 20-24.

#### Important note

To cite this publication, please use the final published version (if applicable).  
Please check the document version above.

#### Copyright

Other than for strictly personal use, it is not permitted to download, forward or distribute the text or part of it, without the consent of the author(s) and/or copyright holder(s), unless the work is under an open content license such as Creative Commons.

#### Takedown policy

Please contact us and provide details if you believe this document breaches copyrights.  
We will remove access to the work immediately and investigate your claim.

# Smeden

## (NOT) SAFE FOR DESIGNERS – XIV

Wie het over smeden heeft, ziet vaak het traditionele beeld van de smid voor zich. Met ferme klappen hamert hij (zelden een zij...) het roodgloeiende staal in vorm, in een fascinerend schouwspel van kracht en kunde. Zo af en toe houdt hij het werkstuk boven het vuur om het weer op te warmen<sup>1</sup>, en gaat daarna onverdroten door. Zwijgend – het werk spreekt voor zich. Is de gewenste vorm bereikt, dan volgt het sissend afkoelen in een bad. Het is zwaar, maar dankbaar werk: smeedstaal heeft een hoge sterkte en hardheid, en was een onmisbare sleutel in de ontwikkeling van onze beschaving.

ERIK TEMPELMAN, ADVIESBUREAU ERIKTEMPELMAN.COM,  
UNIVERSITAIR HOOFDDOCENT TU DELFT – INDUSTRIEEL  
ONTWERPEN

Ook vandaag de dag is het aloude smeedproces nog springlevend en onmisbaar – maar onbekend, en daardoor onbemind. Wie staat er eigenlijk bij stil dat die onbeduidende boutjes die uw auto bij elkaar houden gesmeed zijn<sup>2</sup>, of de muntjes in uw broekzak? Of uw gereedschap, tal van fiets- en auto-onderdelen, enzovoorts (afbeelding 1)? Hoog tijd voor een herwaardering!

1 Inderdaad, 'men moet het ijzer smeden als het heet is' – al is het wel staal dat we smeden, niet ijzer.

2 Leest u Over bouten gesproken er nog eens op na; Constructeur nr. 5 2016, pag. 6-9.

### **Vooral staal**

Om te beginnen is het handwerk vrijwel geheel vervangen door machines, die snel en met hoge betrouwbaarheid jaarlijks duizenden en duizenden smeedstukken produceren. In de regel hebben deze enige nabewerking nodig, maar ook dat is industrieel goed georganiseerd – en bij het zogeheten *net shape forging*, één van de diverse smeedmethoden, is het zelfs geheel niet meer nodig. Behalve staal smeden we tegenwoordig ook aluminium, magnesium en titanium – al neemt staal nog wel de ruime meerderheid van alle smeedstukken voor zijn rekening, mede dankzij diverse verbeteringen in dat onmisbare metaal zelf.

### **Hoge vermoeiingssterkte**

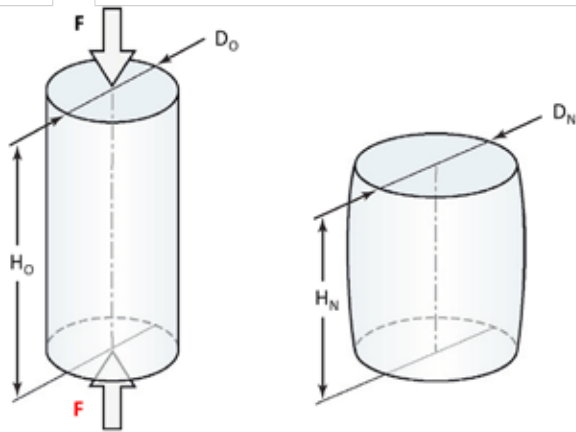
Smeedwerk wordt door de constructeur verkozen boven vervaardiging met gieten, verspanen of 3D-printen als het onderdeel een hoge sterkte moet hebben – in het bijzonder hoge vermoeiingssterkte. Dit komt doordat het smeedproces ons van al deze opties de best mogelijke materiaalstructuur biedt. En als sterkte het doel is, dan volgt in de regel na het smeden een warmtebehandeling. Dit verklaart de materiaalvoorkeuren die het smeden heeft. We komen daar later op terug; eerst behandelen we de basis van het smeedproces.

### **Krachtspel bij het smeden**

In afbeelding 2 ziet u een massief metalen cilinder



Afbeelding 1 Enkele alledaagse smeedstukken. (Foto: Shimano en Bahco)



Afbeelding 2 Een drukproef op een stalen cilinder.

die axiaal plat wordt gedrukt. Stel nu, dat we van een uitgangshoogte  $H_0 = 100$  mm naar een nieuwe, kleinere hoogte  $H_N = 60$  mm gaan: wat is daarvoor de benodigde perskracht  $F$ ? Als uitgangsdiameter kiezen we  $D_0 = 30$  mm, dat wil zeggen,  $R_0 = 15$  mm. Voor een geïdealiseerde situatie (geen wrijving, perfect stijve persplaten, pure compressie, etc.) volgt deze kracht uit de vergelijking  $F = \pi R_0^2 (H_0/H_N) K (\ln (H_N/H_0))^n$ . Hierin is  $R_0$  de oorspronkelijke straal van de cilinder, en zijn  $K$  en  $n$  twee materiaalparameters<sup>3</sup>. Voor een typisch smeedstaal met  $K = 920$  MPa en  $n = 0,13$  en de gegeven afmetingen blijkt deze kracht gelijk te zijn aan  $F = -993$  kN. De vergelijking is aardig betrouwbaar, en dergelijke drukproeven, ook wel stuikproeven genaamd, worden dan ook routinematig gebruikt om bij een gegeven materiaal de parameters  $K$  en  $n$  te meten.

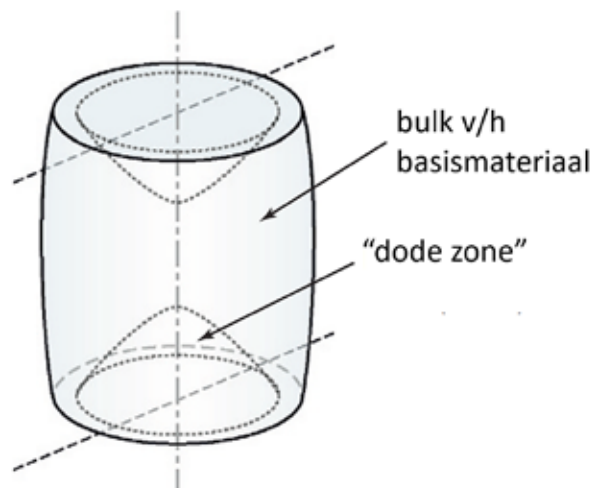
De benodigde drukkracht is in dit geval dus al bijna 100 ton, terwijl het toch een relatief kleine cilinder betrof. Een consequentie is dat de persplaten toch wat zullen vervormen – elastisch, wel te verstaan. Bij het stuiken geldt daarom dat de haalbare toleranties het beste zullen zijn in het vlak dwars op de smeedkracht, en het slechtste in de richting van de kracht zelf.

### Niet homogeen verdeeld

Diepere analyse leert ons dat de vervorming niet homogeen verdeeld is. Als gevolg van wrijving tussen de beide persplaten en het boven- en ondervlak van de cilinder is de spanningstoestand op en bij die vlakken niet éénassig (dat wil zeggen alleen axiale compressie) maar meerassig (dat wil zeggen axiale compressie plus radiale wrijving). Het materiaal zal daar daarom pas bij een hogere spanning gaan vloeien dan het elders gelegen materiaal. Er zijn zelfs twee kegelvormige volumes die niet tot nauwelijks vervormen: de ‘dode zones’ – vergelijkbaar met wat we bij metaalextrusie al eerder zagen (afbeelding 3). Dit heeft ook tot gevolg dat we niet

<sup>3</sup> Om precies te zijn:  $K$  is de ware drukspanning behorend bij een ware rek van 1,0 en  $n$  is de versterkingsexponent: de helling van de ware trekkromme zoals getekend op dubbel-logaritmische schaal.

Afbeelding 3  
Dezelfde cilinder, nader bekeken.



een rechte cilinder overhouden maar een tonvormig product.

Er is uiteraard nog meer te zeggen over het smeden van zelfs dit soort simpele vormen, maar de belangrijkste boodschap is al duidelijk: smeden vraagt brute kracht. De capaciteit van uw machine wordt snel een beperking – en datzelfde geldt voor de maximale rek die het metaal kan weerstaan. We kunnen de krachten verminderen, en tevens de vervormbaarheid vergroten, door ons werkstuk te verwarmen: laten we eens zien wat dat precies inhoudt.

### Koud of warm?

In de maakindustrie wordt ‘koud’ vervormen van metalen gewoonlijk gedefinieerd als vervormen bij temperaturen onder de  $0,4 T_m$ , in Kelvin. Hierbij  $T_m$  staat voor de smelttemperatuur van het metaal. Op dezelfde wijze noemen we verwerking boven de  $0,8 T_m$  ‘heet’ en alles tussen beide temperaturen ‘warm’. Voor staal zijn de grenswaarden zo’n beetje  $385$  °C en  $1040$  °C, al zijn het geen harde grenzen maar geleidelijke overgangen. Toch zijn ze handig: een verschijnsel als koudversterking komt >



Afbeelding 4 het stapsgewijze smeden van een stuurpen (Bron: Shimano Europe)

– de naam zegt het al – alleen bij koude processen voor, rekristallisatie komt pas in beeld in het warme gebied, en diffusie zien we effectief gezien alleen aan het werk bij hete temperaturen.

### Koud smeden

Bij koud smeden gedragen metalen zich als bij het krachtenspel besproken. Smeedkrachten zijn hoog, vervormbaarheid is laag, en complexe vormen kunnen we alleen maken als we meerdere smeedstappen in sequentie zetten. Afbeelding 4 toont dit voor de twee delen van de stuurpen van een racefiets. Let op, want elke stap vraagt een eigen, kostbare set matrijzen. Een voordeel is wel dat we door koudversterking op een hoge sterkte uit zullen komen – al is het niet makkelijk dit overal in het smeedstuk te bereiken, want in de eerder genoemde ‘dode zones’ treedt versterking niet tot nauwelijks op.

### Heet smeden

Bij heet smeden is de vormvrijheid juist hoog en zijn de benodigde krachten laag. Maar het is lastig om nauwe toleranties te bereiken, niet alleen door thermische uitzetting maar ook door overmatige oxidatie (Engels: *scaling*). Nabewerken is dus vereist. Verwarmen kost verder ook energie, vormt een veiligheidsrisico, en is nog knap lastig ook: hoe zorgt u dat uw smeedmatrijzen of andere gereedschappen

niet te warm worden? Dit hangt ook af van de materiaalcombinatie in kwestie: aluminium smeedwerk met stalen matrijzen is anders dan staal-met-staal. Koudversterking tenslotte kunt u uiteraard wel vergeten; voor voldoende sterkte hebt u een aparte warmtebehandeling nodig.

### Warm smeden

Het warm smeden is een compromis tussen beiden, dat – mits goed uitgevoerd – de nadelen minimaliseert en de voordelen maximaliseert. Onderschat u hierbij vooral niet hoe sterk de vervormingskrachten afnemen! Figuur 5 laat zien wat dit betekent voor EN-AW-6082, een populaire aluminiumlegering voor smeedwerk. In oplossingsgeleide toestand (aanduiding T4) haalt dit materiaal een vloeigrens van 110 MPa, maar dit zakt drastisch in elkaar in het warme gebied. Interessant hierbij is de afhankelijkheid van de reksnelheid: kneden (curves met 0,1 s<sup>-1</sup>) vraagt minder kracht dan hameren (curves met 1 s<sup>-1</sup>). En los daarvan: een ware rek in de richting van – 1.0 (dat wil zeggen nominale rek van – 63%) zal dit materiaal in het koude gebied bij lange na niet halen.

Er is dus wat te kiezen als het om smeden gaat, nog los van de precies te gebruiken methoden – die komen nog. Maar laten we nu eerst eens naar warmtebehandelingen kijken.

### Warmtebehandeling

Het smeden van staal is innig verbonden met het harden en ontlaten. Deze warmtebehandeling – welhaast de belangrijkste die er is! – maakt gebruik van de allotropie van staal, dat wil zeggen, de eigenschap van dit materiaal om verschillende kristalvormen aan te nemen, afhankelijk van de temperatuur<sup>4</sup>. Onder de pakweg 900 °C is staal ferritisch, daarboven austenitisch. In ferritisch staal kan maar zeer weinig koolstof oplossen: slechts 0,022 procent, zo hebben de materiaalkundigen vastgesteld. Nu bevat smeedstaal doorgaans 0,3 procent koolstof of meer, en het meeste daarvan lost niet op maar gaat een verbinding aan met het ijzer, te weten cementiet, Fe<sub>3</sub>C. Die vinden we in het staal in de vorm van microscopisch dunne laagjes, afgewisseld met laagjes ferriet – een combinatie die, onder de microscoop gezien, doet denken aan paarlemoer (Engels: *mother-of-pearl*) en die bekend staat als perliet. Aan dit perliet dankt staal zijn bijzondere combinatie van hardheid en vervormbaarheid. Maar, we kunnen nog verder gaan, en dat gaat als volgt.

4 We gaan hier kort door de bocht, want naast temperatuur speelt de samenstelling ook een rol, alsmede de mate van deformatie. Kijkt u maar eens naar de zgn. TRIP-staalsoorten.

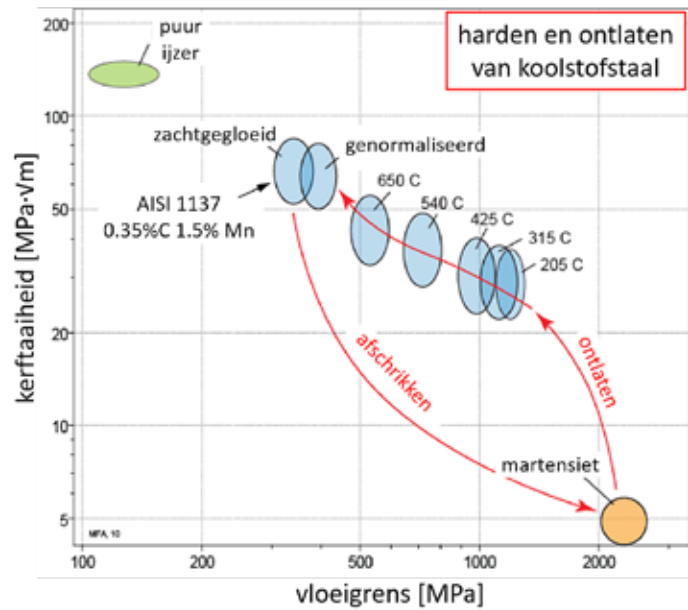
### Martensiet

Eerst brengen we ons staal boven de + 900 °C, dus in de austenitische toestand, zodat alle koolstof netjes oplost. Zouden we nu langzaam afkoelen dan krijgen we weer perliet en ferriet, maar wat als we zeer snel afkoelen? Dit zogeheten afschrikken levert een nieuwe, superharde kristalvorm op, martensiet genaamd, met een vloeigrens van ruim 2.000 MPa. Ter vergelijking: een plaatstaal met 500 MPa vloeigrens krijgt doorgaans al het predicaat ‘hoge-sterkte-staal’ (!).

Martensiet is echter ook zeer bros, en ongeschikt voor de meeste toepassingen. Deze brosheid uit zich in een zeer lage breukrek en een dito kerftaaiheid. Door nu als derde stap het staal weer enige tijd te verwarmen, dat wil zeggen ontlaten, komt de taaiheid weer terug, tegen een bescheiden verlies van sterkte. Afbeelding 6 toont het effect van deze behandeling, die feitelijk een win-win scenario voortbrengt. Merk op dat dit alles te danken is aan de allotropie en aan de bijzondere rol van koolstof. Met andere metalen kan dit dus niet, en het lukt ook alleen als het staal voldoende koolstof bevat.

### Probleem

Nu is er wel een probleem. Echt snel afschrikken lukt alleen bij dunne, plaatvormige delen – bij smeedstukken lukt dat niet. De transformatie naar martensiet is dan onvolledig en de behandeling sorteert te weinig effect. We kunnen de ‘doorhardbaarheid’ verbeteren door te legeren. Smeedstaal bevat daarom vaak wat extra chroom, molybdeen en vanadium<sup>5</sup>. Borium is bijzonder effectief gebleken in het verbeteren van de doorhardbaarheid: zo’n 0,001



Afbeelding 5 Drukkrommes voor aluminium 6082 voor diverse temperaturen.

5 Toevoegen van deze elementen sorteert nog diverse andere effecten: corrosiebestendigheid, lasbaarheid, warmtevastheid, en zo meer kunnen verbeterd of verslechterd worden.

6 Verschillende andere metalen zijn precipitatiehardbaar: beryllium-koper bijvoorbeeld, en zelfs sommige soorten staal en RVS. Deze warmtebehandeling is dus niet voorbehouden aan aluminium.

procent toevoeging van dit element is vaak al genoeg. Mocht u dit element zien in relatie tot staal, dan weet u nu waarom.

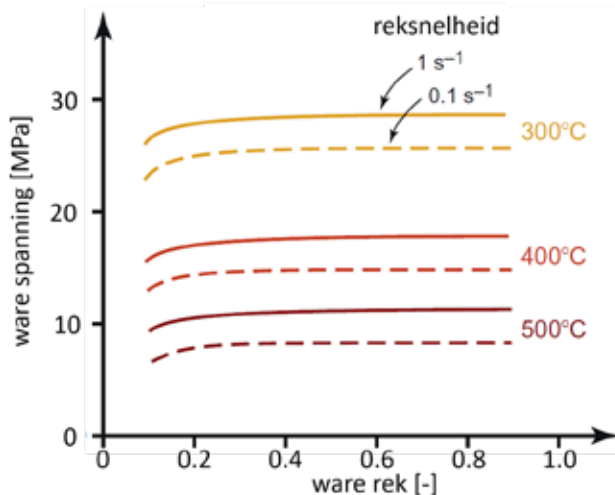
Bij aluminium is harden en ontlaten dus niet mogelijk, maar bij bijvoorbeeld de 6000-serie is wel de precipitatieharding beschikbaar<sup>6</sup>. Smeedaluminium wordt vrijwel altijd op deze wijze gehard. Logisch, want smeden doen we primair voor de sterkte, en dan levert een relatief goedkope warmtebehandeling veel waar voor zijn geld. Een veelvoorkomende smeedaluminium is EN-AW-6082-T6, waarbij de ‘T6’ de geharde toestand aangeeft. We komen daarmee op een vloeigrens van zo’n 260 MPa en een treksterkte van rond de 310 MPa. En dat bij een derde van de dichtheid van staal, wat de populariteit voor lichtgewicht toepassingen onderstreept.

### Klein leger

Het voorgaande moet niet doen vermoeden dat alle smeedwerk een warmtebehandeling nodig heeft, of dat het legeren zoals geschetst geen nadelen zou hebben. Smeedwerk wordt immers vaak nabewerkt door middel van boren of frezen, of moet worden gelast: processen die een afgewogen materiaalkeuze vragen, met aandacht voor de hele procesketen, niet alleen de warmtebehandeling. De dorpssmid van toen deed alles wellicht op gevoel en ervaring, maar vandaag de dag wacht u een klein leger van specialisten om (tegen passende vergoeding uiteraard) zaken mee te doen.

### Smeedmethodes – Openmatrijs smeden

Tot besluit van dit artikel spenderen we nog enige woorden aan diverse smeedmethodes. Elk kan in principe “koud, warm of heet” worden uitgevoerd en met elk metaal, maar in de praktijk zijn er duidelijke voorkeuren. De eerste methode is het >



Afbeelding 5 Drukkrommes voor aluminium 6082 voor diverse temperaturen.

open-matrijs-smeden . Deze is o.a. geschikt voor ver-  
vaardiging van prototypes en kleine series. Het traditio-  
nele werk van de smid met hamer en aambeeld valt hier  
ook onder, maar de methode is tegenwoordig verre-  
gaand geautomatiseerd.

### Gesloten-matrijssmeden

Vervolgens is er het gesloten-matrijssmeden, dat veel  
wordt gebruikt voor serieproductie. Zoals in het voor-  
beeld van de stuurpen zien we vaak bewerking in meer-  
dere stappen, elk met een eigen set matrijzen. Merk op  
dat het product goed lossend moet zijn om uitgenomen  
te kunnen worden! Geheel gesloten is de matrijs overi-  
gens niet – er is altijd enige formatie van “flash” d.w.z.  
een dunne rand om het deelvlak, die nabehandeling be-  
hoeft. Zoals gebruikelijk komt dit materiaal daarna in  
aanmerking voor recycling als productieafval.

### Persen

Het persen is vergelijkbaar met de vorige methode,  
maar nu wordt de deformatie niet met een snelle klap  
aangebracht, maar meer geleidelijk. Juist in combinatie  
met warm smeden geeft dit diverse voordelen. Het ver-  
lengde contact tussen matrijs en smeedstuk zorgt wel  
voor meer transport van warmte tussen beide; persen  
stelt mede hierom hogere eisen aan de procesvoering en  
–controle.

### Hoge-definitie-smeden

Tot slot noemen we het hoge-definitie-smeden, beter  
bekend als *net shape forging*. Dit is feitelijk gelijk aan ge-  
sloten-matrijs-smeden, maar met meer mogelijkheden  
voor details. Doel is om nabewerking te minimaliseren  
of zelfs geheel te vermijden. Het is eenvoudig te begrij-  
pen dat deze methode niet bijster geschikt is voor warm  
smeden (laat staan heet) en bij voorkeur koud wordt ge-  
daan, dit vanwege de tolerantie- en oxidatieproblemen  
bij die hogere temperaturen.

### Voor verder onderzoek

De websites [www.forging.org](http://www.forging.org) (USA, Forging Industry  
Association) en [www.icfg.info](http://www.icfg.info) (Europa, International  
Cold Forging Group) verdienen aanbeveling voor wie  
verder wil zoeken. Wie toegang heeft tot wetenschappe-  
lijke publicaties kan terecht bij onder andere:

- *Metal Science and Heat Treatment of Metals*
- *Journal of Metals*
- *Advanced Materials and Processes*

Het *ASM Handbook Vol. 14A: Metalworking: Bulk Forming*  
tenslotte is ook beslist de moeite waard. Zoals u zult  
zien is het traditionele beeld van de smid allesbehalve  
passend bij deze moderne tak van de industrie.  
En voor een échte klapper kunt u terecht bij het YouTu-  
be-kanaal *Machine Thinking*: kijkt u naar *America's Iron  
Giants* en u zult versteld staan van wat we als mensheid  
hebben bereikt. ◉

Volgende keer in (Not) Safe for Designers?: verspanen



**Drives & Controls** | 

Power, Control & *Green* Solutions

Official partner  
Benelux





## Aandrijf & besturingspecialist

- ✓ Motoren (met rem/ATEX)
- ✓ Motorreductoren
- ✓ Planetaire reductoren
- ✓ Frequentieregelaars & HMI
- ✓ Lineaire aandrijvingen
- ✓ Servo aandrijvingen
- ✓ Koppelingen & componenten











T +31(0)88 7865200  
E [info@elsto.eu](mailto:info@elsto.eu)

# elsto.eu