

Contactverschijnselen bij het omvormen

Citation for published version (APA):

Ramaekers, J. A. H., & Smeets, M. J. H. (1983). *Contactverschijnselen bij het omvormen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPB0059). Technische Hogeschool Eindhoven.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1983

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

Take down policy

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

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Po 432740

ARK
01
WPA

WPB 0059

In. L. J. A. Houtackers

CONTACTVERSCHIJNSELEN BIJ HET OMVORMEN

Auteur's: J.A.H. Ramaekers

M.J.H. Smeets

WPB-Rapport nr. 0059

dec.'83.

VF code A2

CONTACTVERSCHIJNSELEN BIJ HET OMVORMEN

J.A.H. Ramaekers

M.J.H. Smeets

Contactverschijnselen tussen gereedschap en produkt beïnvloeden in belangrijke mate het verloop van omvormprocessen (extruderen, stuiken etc.). Met name de gebruiksduur van het gereedschap, de kwaliteit van het produkt en de voor het proces benodigde perskracht zijn factoren die sterk afhankelijk zijn van de wrijvingscondities. Uit het reeds verrichte onderzoek blijkt de complexiteit van de verschijnselen, waarbij mechanische, fysische en chemische processen een rol spelen. Echter de kennis omtrent de samenhang tussen deze processen en de optredende wrijvingsspanningen in het contactvlak is nog absoluut onvoldoende, en de gehanteerde wrijvingsmodellen zijn daardoor zeer discutabel. Een aantal theoretische modellen zullen besproken worden en getoetst aan experimenten. Ondanks de vragen van fundamentele aard, welke open blijven, kunnen toch voor de praktijk bruikbare inzichten en modellen geformuleerd worden, toegespitst op de wrijvingsspanning in het contactvlak.

1. Smering.

Doorgaans is de functie van een smeermiddel bij omvormprocessen het beletten van metallisch contact tussen gereedschap en produkt. De relatieve snelheid tussen beiden is meestal laag, zodat zelden sprake zal zijn van hydrodynamische smering, terwijl ter plaatse bovendien vaak extreem hoge drukken heersen. Hieruit volgen een aantal eigenschappen welke smeermiddelen voor omvormprocessen dienen te bezitten. [Lit. o.a. 1 t/m 8].

A. Drukvastheid.

Ten einde wegdrücken van het smeermiddel te minimaliseren, dient het een druvastheid te bezitten. Voor omvormen toegepaste smeermiddelen zijn daarom enigszins taai (c.q. vast) en vertonen een weerstand tegen vormverandering (sterkte) die uitgedrukt kan worden in een vloeispanning.

Lithiumstearaat, zinkstearaat, molybdeensulfide en kopersulfaat zijn enkele van de toegepaste smeermiddelen die een vloeispanning vertonen van $\pm 10 \div 35 \text{ N/mm}^{-2}$.

B. Duktiliteit.

Met name massiefomvormprocessen gaan doorgaans gepaard met aanzienlijke oppervlaktevergrotingen. Het smeermiddel dient deze oppervlaktevergrotingen zoveel mogelijk te volgen. Onder duktiliteit verstaat men nu: de mate, waarin het smeermiddel hiertoe in staat is.

C. Hechting.

De hechting van een smeermiddel aan het oppervlak van vooral het werkstukmateriaal berust op fysische en chemische processen tussen dit materiaal en bepaalde bestanddelen van het smeermiddel. Temperatuur en druk spelen hierbij een grote rol. De mate van hechting heeft uiteraard ook invloed op duktiliteit en drukvastheid van een smeermiddel.

Naast voornoemde eigenschappen dient men bij de keuze van een smeermiddel nog de volgende aspecten in beschouwing te nemen:

- Economische aspecten, zoals kostprijs van het smeermiddel, alsook de kosten voor het aanbrengen maar vooral het weer verwijderen van een smeermiddel met het oog op de volgende bewerkingen.
- Veiligheids- en milieu-aspecten i.v.m. giftige en/of korrosieve eigenschappen onder bedrijfsomstandigheden (druk, temperatuur). Ook eventuele kosten van afvalverwerking.
- Kwaliteitsaspecten, m.n. de oppervlaktekwaliteit van het produkt.

In het algemeen zijn de leveranciers van smeermiddelen in staat omtrent het bovenstaande redelijk goede informatie te verschaffen.

2. Enige basisrelaties uit de plasticiteitsleer

In de hierna volgende beschouwingen is gebruik gemaakt van een aantal basisrelaties uit de plasticiteitsleer; lit. [2,10,11,14].

A. De vloeivoorwaarde van Von Mises, uitgedrukt in de hoofdspanningen

$$\sigma_1, \sigma_2 \text{ en } \sigma_3:$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \}} = \sigma_v \quad (2.1)$$

$\bar{\sigma}$ is de effectieve of vergelijk-spanning.

σ_v is de vloeispanning c.q. deformatieweerstand.

B. De effectieve of vergelijkrek $\bar{\epsilon}$

$$\bar{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2)} \quad (2.2)$$

Hierin zijn ϵ_1 , ϵ_2 en ϵ_3 de eindige hoofdrekken.

N.B. Deze vergelijking is niet algemeen geldig. Als benaderende berekening van het werkelijke deformatiegedrag is ze doorgaans technisch voldoende nauwkeurig.

C. Het materiaalvolume is onveranderlijk, hetgeen beschreven wordt met:

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0 \quad (2.3)$$

D. De spanning - rek - relatie volgens Levy-Von Mises:

$$\epsilon_1 = \frac{\bar{\epsilon}}{\sigma_v} \cdot \left(\sigma_1 - \frac{\sigma_2 + \sigma_3}{2} \right) \quad (\text{cyclisch}) \quad (2.4)$$

E. Voor de beschrijving van het versterkend gedrag van materialen kunnen verschillende modellen toegepast worden:

1) Voor niet versterkend (ideaal plastisch) materiaal geldt:

$$\sigma_v = \text{constant.} \quad (2.5)$$

2) Voor exponentieel versterkend materiaal:

$$\sigma_v = C \cdot \bar{\epsilon}^n \quad (2.6)$$

en met voordeformatie:

$$\sigma_v = C \cdot (\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n \quad (2.7)$$

Hierin is: C = Karakteristieke deformatieweerstand.

($C = \sigma_v$ bij $\bar{\epsilon} = 1$).

n = Verstevingsexponent.

ϵ_0 = Voordeformatie.

F. Het model enkelvoudige afschuiving. (Fig. 1).

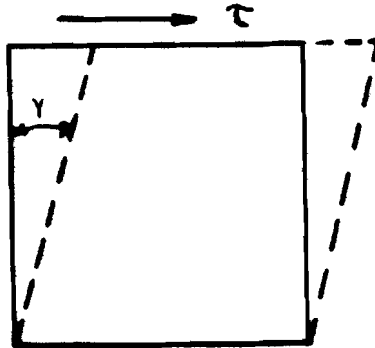


Fig. 1.

Wrijving is in wezen plastische deformatie in het contactvlak [9]. Hiervoor geldt het model enkelvoudige afschuiving, zodat voor de schuifspanning τ afgeleid kan worden:

$$\tau = \tau_{\max} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

τ_{\max} is hier de maximale schuifspanning die volgens het Von Mises vloeicriterium.

3. Wrijvingsmodellen.

In de technische plasticiteitsleer worden in principe twee wrijvingsmodellen gehanteerd:

a. Het Coulomb wrijvingsmodel:

$$\tau_0 = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.1)$$

In dit model veronderstelt men evenredigheid tussen de wrijvingspanning τ_0 en de normaalspanning σ_n , met μ , de wrijvingscoëfficiënt als evenredigheidsfactor.

b. Het Von Mises of "constant friction"-model:

$$\tau_o = m \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Het wezenlijke in dit model is de aanname dat de schuifspanning τ_o constant is over het gehele contactvlak. De evenredigheid met de vloeispanning σ_v wordt nog besproken. Hoewel deze modelvorming vrij arbitrair is, zal blijken dat dit model (3.2) grote voordelen biedt t.o.v. het Coulomb wrijvingsmodel.

3.1. Het Von Mises wrijvingsmodel.

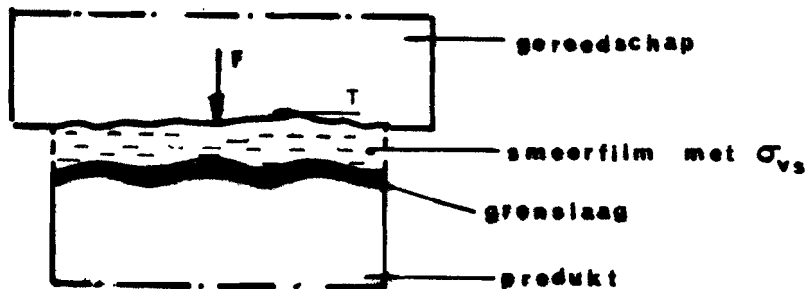


Fig. 2.

Veronderstellen we tussen gereedschap en produkt een dragende smeerfilm, die zó sterk is dat onder invloed van de heersende normaal en schuifspanning geen direkt contact plaats heeft. Tijdens het deformatieproces treedt relatieve verplaatsing op tussen gereedschap en produkt, zodat afschuiving zal optreden in de smeerfilm. Analoog aan vergelijking 2.8 geldt dan:

$$\tau_o = \frac{\sigma_{vs}}{\sqrt{3}} \quad (3.3)$$

Hierin is σ_{vs} de vloeispanning van het smeermiddel.

Nemen we nu gemakshalve een vaste verhouding aan tussen de vloeigrens van het smeermiddel en die van het produkt, zodat:

$$\sigma_{v_s} = m \cdot \sigma_v \quad (3.4)$$

dan volgt vergelijking 3.2, n.l.:

$$\tau_o = m \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$$

In deze vergelijking is geen rekening gehouden met eventueel verstevigend gedrag van het werkstukmateriaal ($\sigma_v = \text{constant}$).

De grenswaarden voor m liggen tussen 0 en 1, of: $0 \leq m \leq 1$. De bovengrens ($m = 1$) is bereikt als de schuifspanning in de grenslaag gelijk is aan $\frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$. Bij waarden groter dan 1 zal het materiaal niet meer afschuiven in de grenslaag, doch in het produktmateriaal. De ondergrens ($m = 0$) spreekt voor zichzelf.

Er kan als uitgangspunt ook een geheel andere situatie gekozen worden. Veronderstellen we hiertoe twee contactvlakken zonder smering.

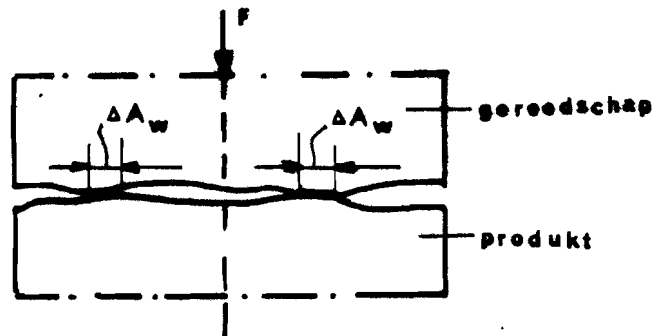


Fig. 3.

T.g.v. de ruwheid zullen de oppervlakken slechts voor een deel aanliggen. Noemen we het werkelijk aanliggende oppervlak A_w dan geldt:

$$A_w = \sum \Delta A_w = m \cdot A \quad (3.5)$$

$$(0 \leq m \leq 1)$$

In het werkelijke contactoppervlak heeft weer afschuiving plaats, waarvoor geldt:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

Middels krachterevenwicht kan nu de gemiddelde schuifspanning τ_o in het contactvlak beschreven worden:

$$\tau_o \cdot A = \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \cdot A_w \quad (3.6)$$

Door substitutie van vergelijking 3.5 in vergelijking 3.6 volgt weer:

$$\tau_o = m \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Omdat bij de beredenering van dit model uitgegaan is van de vloeivoorwaarde van Von Mises, noemt men het doorgaans het "Von Mises"-wrijvingsmodel.

3.2. Het Coulomb-wrijvingsmodel.

Het model, uitgaande van Fig. 3 kan uitgebreid worden met een veronderstelde toename van het werkelijke contactoppervlak t.g.v. afplatten van de ruheidstoppen onder invloed van de normaalspanning σ_n (Fig. 4).

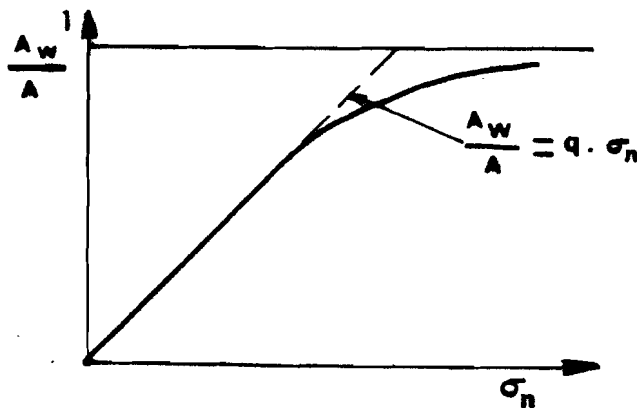


Fig. 4.

Indien lineair verband tussen A_w en σ_n verondersteld wordt, ofwel:

$$\frac{A_w}{A} = q \cdot \sigma_n \quad (3.7)$$

volgt met 3.6:

$$\tau_o = q \cdot \sigma_n \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}} \quad (3.8)$$

Met verwaarlozing van eventueel verstevend gedrag ($\sigma_v = \text{constant}$) geldt tenslotte:

$$\tau_o = \mu \cdot \sigma_n \quad (3.1)$$

Hierin is μ dus gelijk aan $q \cdot \frac{\sigma_v}{\sqrt{3}}$.

Het Coulomb-wrijvingsmodel kan in feite als een bijzonder geval van het Von Mises model gezien worden.

In de volgende hoofdstukken zal, aan de hand van enkele experimenten en berekeningen, de betrouwbaarheid en de toepasbaarheid van de modellen getoetst worden. Vooruitlopend op de conclusies kan nu al vermeld worden dat het Von Mises wrijvingsmodel (faktor m) veruit de voorkeur verdient.

4. Pletproef met vlakke deformatie.

Als experiment is in eerste instantie gekozen voor een pletproef met vlakke deformatie. Uit Fig. 5 blijkt dat het produkt in y-richting is opgesloten, zodat voor de rek in y-richting geldt:

$$\epsilon_y = 0 \quad (4.1)$$

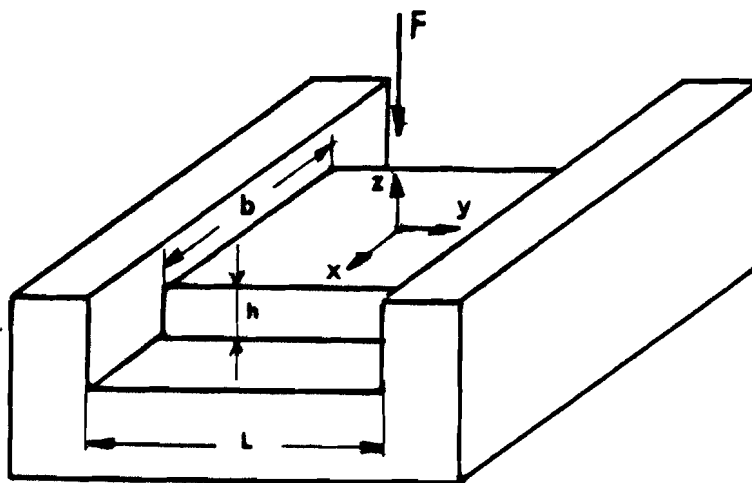


Fig. 5.

Het materiaal wordt geplet in Z-richting, waarbij de oorspronkelijke dikte h_0 reduceert tot een momentane dikte h . Voor de rek in Z-richting geldt:

$$\epsilon_z = \ln \frac{h}{h_0} \quad (4.2)$$

In de X-richting kan het materiaal vrij wegvloeien wegens volumeverandering (vgl. 2.3) geldt voor de rek in Z-richting:

$$\epsilon_x = -\epsilon_z = \ln \frac{h_0}{h} \quad (4.3)$$

Na substitutie van de hoofdrekken ϵ_x , ϵ_y en ϵ_z in vergelijking 2.2 volgt voor de effectieve rek:

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{h_0}{h} \quad (4.4)$$

Voor exponentieel versterkend materiaal bedraagt de momentane vloeispanning (vgl. 2,6):

$$\sigma_v = C \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{h_0}{h} \right)^n \quad (4.5)$$

Voor niet versterkend materiaal is de vloeispanning constant (vgl. 2.5). Met vgl. 2.1, 2.4 en 4.1 kan tenslotte afgeleid worden dat in deze situatie voor effectieve spanning geldt:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (\sigma_x - \sigma_z) = \sigma_v \quad (4.6)$$

5. Het drukspanningsverloop over de stempeldoorsnede.

Met behulp van analytische methoden uit de technische plasticiteitsleer kunnen de voor het proces benodigde spanningen uitgerekend worden. Voor processen met wrijving zijn exacte oplossingen echter vrijwel onbekend. Wel zijn in de technische plasticiteitsleer benaderende analytische methoden ontwikkeld die blijkens confrontatie met de toepassing uitstekend voldoen. In dit geval is gekozen voor de z.g. "schillen"-methode.

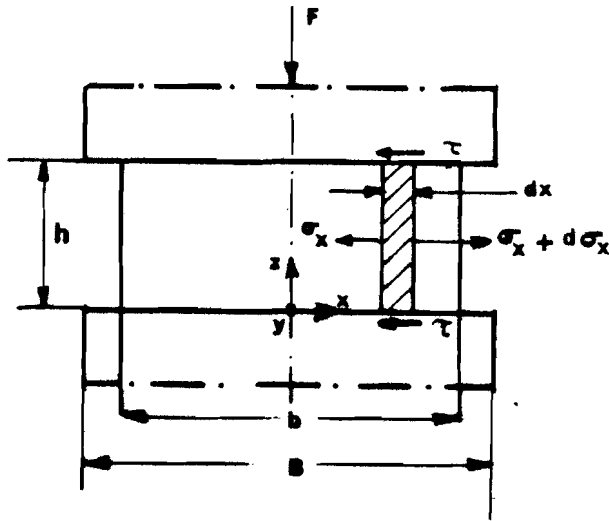


Fig. 6.

Bij de schillen-methode wordt het produkt opgedeeld in schillen. De vorm van de schillen is afhankelijk van de geometrie van het produkt (prismatisch, cilindrisch, bol). Hier (Fig. 5 en 6) is sprake van een vlakke schil, met hoogte h , dikte dx en lengte L . Verondersteld wordt dat de optredende wrijving uitsluitend afschuiving veroorzaakt in een relatief zeer dunne oppervlaktelaag, zodat bij gevolg de spanning σ_x op de schil een hoofdspanning is die bovendien uniform verdeeld is over het oppervlak van de schil. Krachtenevenwicht in horizontale richting impliceert dan:

$$-\sigma_x \cdot h \cdot L + (\sigma_x + d\sigma_x) \cdot h \cdot L - 2\tau_0 \cdot dx \cdot L = 0$$

en:

$$d\sigma_x = 2\tau_0 \cdot \frac{dx}{h} \quad (5.1)$$

Gebruik makend van het Von Mises wrijvingsmodel (3.2) en als randvoorwaarde, $\sigma_x = 0$ voor $x = \frac{b}{2}$, kan berekend worden:

$$\sigma_x = -\frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v \cdot \frac{b-2x}{h} \quad (5.2)$$

Met de vloeivoorwaarde (4.6) volgt dan voor de spanning in z-richting:

$$\sigma_z = -\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v \cdot \left(1 + \frac{m}{2} \cdot \frac{b-2x}{h}\right) \quad (5.3)$$

Met behulp van vergelijking 5.2 en 5.3 zijn voor een overigens willekeurige situatie de spanningen over de doorsnede uitgerekend. Het resultaat is weergegeven in Fig. 7.

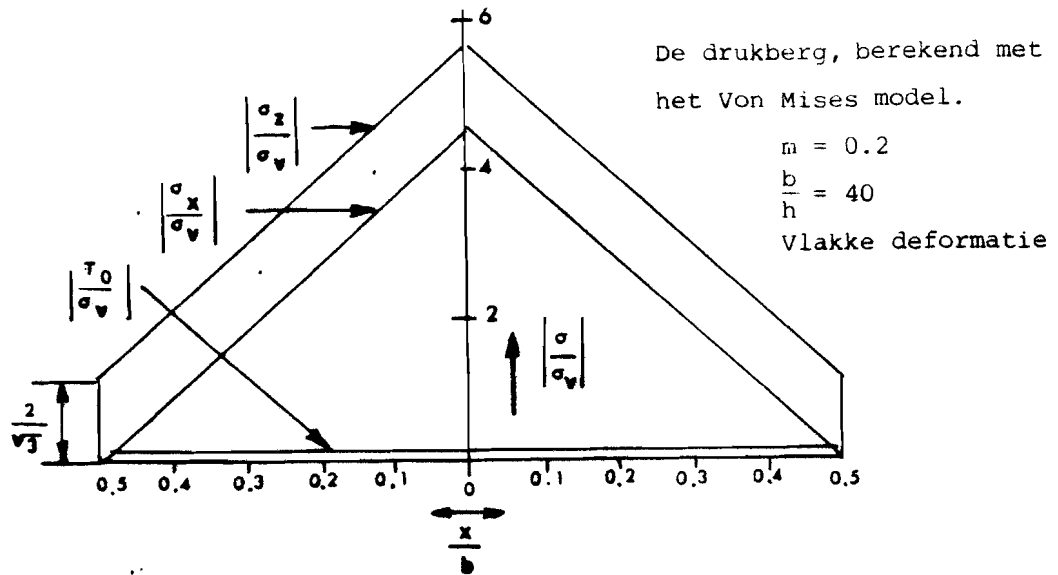


Fig. 7.

De kenmerkende vorm van het spanningsverloop en dus ook van de spanningsverdeling op het gereedschap, wordt aangeduid met het begrip "drukberg" of wrijvingsberg. (friction hill). Het zal duidelijk zijn dat onder bepaalde condities de maximale (lokale) drukspanning op het gereedschap een veelvoud kan zijn van de vloeispanning van het werkstukmateriaal. Bij grote breedte-dikte-verhoudingen ($\frac{b}{h}$) kan daarom een gehard stalen pletgereedschap lokaal plastisch deformereren of zelfs bezwijken, ook met bijvoorbeeld aluminium als werkstukmateriaal. Hierbij dient nog opgemerkt te worden dat tijdens de produktie vaak plaatselijk geplet wordt zonder dat dit als zodanig herkend wordt.

Analoog aan het voorgaande kan de drukberg voor een cilindervormige blenk berekend worden. Fig. 8 toont het resultaat van deze berekening. Tevens zijn hier de drukverdelingen aangegeven, verkregen met gebruikmaking van de zogenaamde eindige elementen -methode en voorts met toepassing van het Coulomb-wrijvingsmodel.

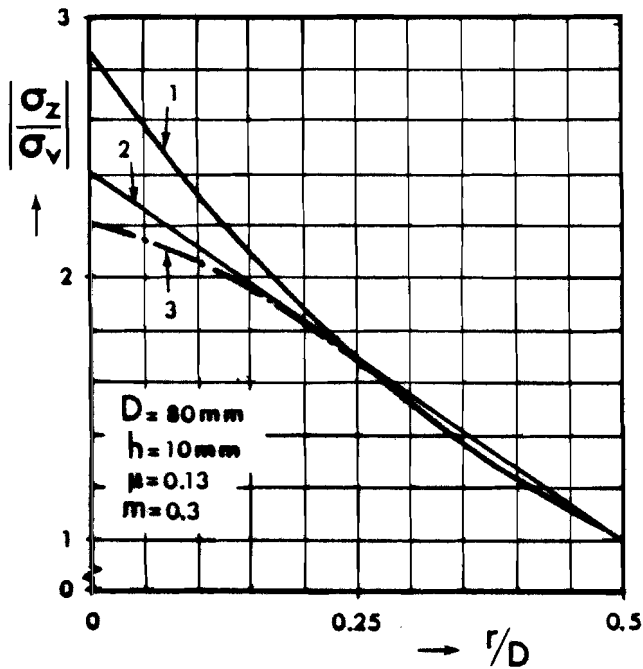


Fig. 8.

De drukberg voor een cirkelcylindrisch produkt volgens:

1. Coulomb; $\frac{\sigma_z}{\sigma_v} = e^{\mu} \cdot \frac{D-2r}{h}$

2. v.Mises; $\frac{\sigma_z}{\sigma_v} = 1 + \frac{m}{\sqrt{3}} \cdot \frac{D-2r}{h}$

3. Eindige-elementen-methode.

De middels het Von Mises-model en eindige elementen-methode berekende krommen tonen slechts geringe verschillen; dit in tegenstelling tot de kromme volgens het Coulomb-model, waarmee onwaarschijnlijk hoge drukspanningen in het centrum van de blenk berekend worden.

6. De perskracht.

Door integratie van de axiale spanning σ_z over het totale oppervlak kan de optredende perskracht berekend worden. Gebruikmakend van vergelijking 5.3, voor vlakke deformatie, volgt dan de voor momentane perskracht:

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_v \cdot L \cdot b \cdot \left(1 + \frac{m}{4} \cdot \frac{b}{h}\right) \quad (6.1)$$

Met de verstevigingsfunctie 2.7 en de stempelweg s ($s = h_0 - h$) kunnen nu punten van de theoretische kracht-weg-kromme uitgerekend worden met de vergelijking:

$$F = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot C \cdot L \cdot B \cdot \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{h_0}{h_0 - s} + \epsilon_0\right)^n \cdot \left(1 + \frac{m}{4} \cdot \frac{b}{h_0 - s}\right) \quad (6.2)$$

Fig. 9 toont zowel de gemeten kracht-weg-kromme als de met vgl. 6.2 berekende punten.

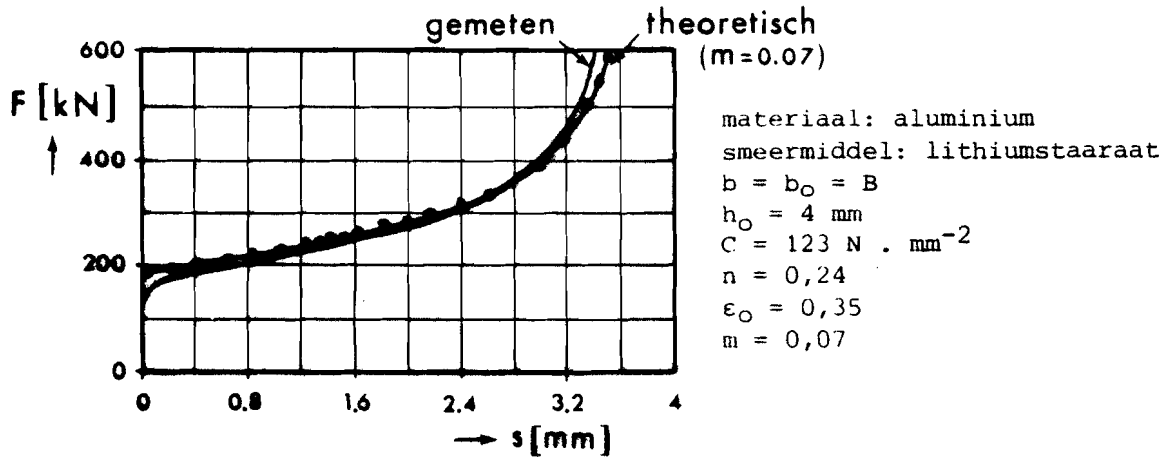


Fig. 9.

Bij de experimenten was de oorspronkelijke breedte van de blenk (b_0) gelijk aan de stempelbreedte B , zodat in de vergelijking geldt:

$$b = b_0 = \text{constant}$$

De hoge waarde voor ϵ_0 is ontstaan door het persen van de blenk op de gewenste beginbreedte. De overeenkomst tussen de berekende en de gemeten kromme is alleszins bevredigend. Voor wat betreft het berekenen van de benodigde perskrachten levert het Von Mises wrijvingsmodel dus goede resultaten.

7. De gemiddelde stempelbelasting.

Teneinde de invloed van de wrijving op het pletproces beter te kunnen onderzoeken wordt de grootheid F^* ingevoerd, zijnde de genormeerde gemiddelde belasting, welke dimensieloos is.

$$F^* = \frac{F}{b \cdot L \cdot \sigma_v} \tag{7.1}$$

Door substitutie van vgl. 6.1 volgt:

$$F^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \frac{m}{4} \cdot \frac{b}{h}\right) \quad (7.2)$$

Fig. 10 toont de relatie tussen F^* en $\frac{b}{h}$.

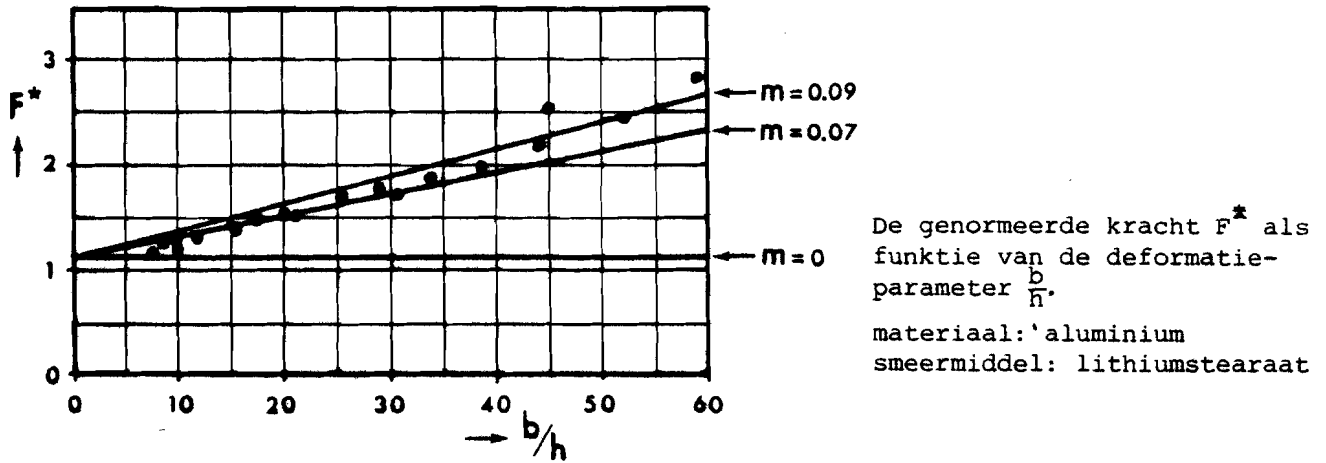


Fig. 10.

Het theoretische verband is hier weergegeven door de rechte lijnen. De aangegeven punten zijn resultaten uit metingen, De overeenstemming tussen de experimentele en de berekende relatie is alleszins redelijk. De wrijvingscoëfficiënt is echter kennelijk niet constant tijdens het proces. Met gebruikmaking van vergelijking 6.2 is voor een reeks pletproeven op aluminium de wrijvingscoëfficiënt m bepaald. In Fig. 11 is deze experimenteel bepaalde wrijvingscoëfficiënt uitgezet tegen de genormeerde perskracht F^* .

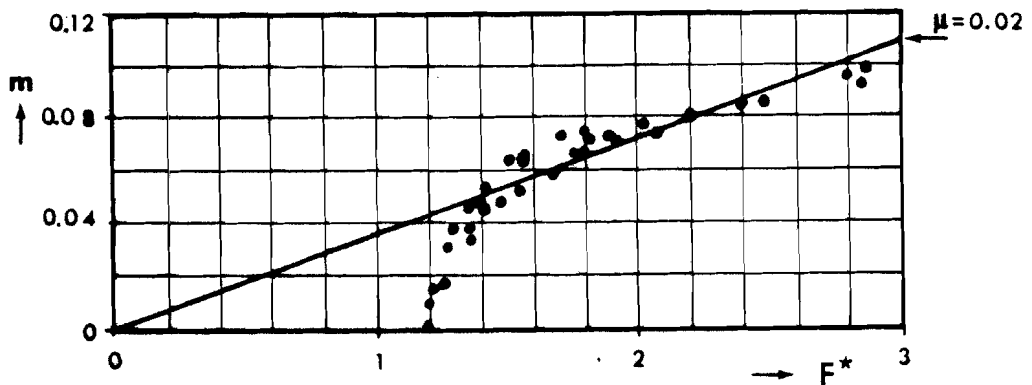


Fig. 11.

Uit deze figuur blijkt eens te meer dat m niet constant is; bij voortgaande deformatie c.q. toenemende druk, neemt hij in waarde toe. Blijkens Fig. 9 behoeft dit voor de krachtberekening geen problemen op te leveren. Volgens het Coulomb wrijvingsmodel met $\mu = 0,02$ ontstaat een rechte door de oorsprong, welke eveneens in Fig. 11 is aangegeven. Blijkbaar heeft ook het Coulomb-wrijvingsmodel een zeker geldigheidsgebied. Het verband tussen wrijvingsspanning en normaaldruk is echter meer complex dan het Coulomb-model suggereert. Nader onderzoek zal hier opheldering moeten verschaffen.

8. Samenvatting en conclusies.

Uiteengezet zijn een tweetal wrijvingsmodellen, zoals deze in de omvormtechnologie gehanteerd worden. De pletproef als experimentele methode ter bepaling van de wrijvingscoëfficiënt is beschreven. Uit de literatuur en eigen onderzoek blijkt:

- Het Von Mises wrijvingsmodel verschaft betere resultaten bij het berekenen van de belasting op het gereedschap (drukberg) dan het Coulomb-wrijvingsmodel.
- Uitgaande van het Von Mises wrijvingsmodel, met constante wrijvingscoëfficiënt m , zijn eenvoudige en relatief betrouwbare berekeningen van proceskrachten mogelijk.
- Zeer weinig is nog bekend omtrent factoren die de grootte van de wrijving beïnvloeden (druk, temperatuur, oppervlaktelagen, oppervlakteruwheid, relatieve snelheid tussen gereedschap en produkt etc.).
- De wrijvingscoëfficiënt beschrijft in het merendeel der empirische en theoretische vergelijkingen slechts ten dele de zuivere wrijvingsinvloed; hij heeft doorgaans meer de functie van correctiefactor.

Literatuur.

- [1] W.J. Bartz, J. Wolff.
Lubrication in Metal working.
3e Int. Coll. - 12-14-1982.
Techn. Akad. Esslingen.
- [2] K. Lange.
Lehrbuch der Umformtechnik.
Springer - 1972.
- [3] D. Schulz.
Eignung verschiedener Schmiermittel zum Tiefziehen nichtrostender
Stähle bei Verwendung von Werkzeugstahl und Bronze werkzeuge.
Blech 4. (1971) blz. 135-140.
- [4] J. Rosochowicz.
Ziefette für Stahldrähte auf der Basis von hersölen und synthetische
Fettsäuren.
Dracht 14 (1963)6 blz. 311-315.
- [5] M. Kobayashi, Y Kurosaki, N. Kawai.
Influence of friction and Metalproperties on pure stretchability
of sheet metals.
Trans. A.S.M.E. 102 (1980)5. Blz. 142-15.
- [6] A. Oldewurtel.
Beschichtung und Diffusionsverfahren als Mittel zur standmengen-
erhöhung von Werkzeugen der Blechumformung.
Blech 28 (1981) 4 blz. 146 t/m 148.
Blech 28 (1981) 5 blz. 197 t/m 201.
- [7] Th. Gräbener.
Schmierstoffprüfung in der Kaltmassivumformung durch streifenziehen
und Ringstanchen.
Metall 36 (1982) 4 blz. 375 t/m 279.
- [8] G. Schmitt.
Untersuchungen über das Rückwärts Napffliessperssen von Stahl bei
Raumtemperatur.
Ber. a.d. Inst. für Umformtechnik. U. Stuttgart 1968.

- [9] J.H. Dautzenberg.
Reibung und Gleitverschlies bei Trockenreibung.
Dissertatie Technische Hogeschool Eindhoven 1977.
- [10] J.A.G. Kals, J.A.H. Ramaekers, L.J.A. Houtackers.
Plastisch omvormen van metalen.
- [11] P.C. Veenstra, S. Hoogenboom.
Technische Plasticiteitsleer.
Collegedictaat Technische Hogeschool Eindhoven.
- [12] J.A.H. Ramaekers, J.A.G. Kals.
Instable materialflow in extrusion and upsetting.
Annals of the C.I.R.P. 31 (1982) blz. 191 t/m 192.
- [13] J.A.H. Ramaekers, J.A.G. Kals.
Vormbeheersing bij massiefomvormen.
Metaal en Kunststof 19 (1981) 22 blz. 32 t/m 35.
- [14] J.A.G. Kals.
Het begrip deformatie.
Metaalbewerking 39 (1974) 10 jan.