

Vloeigedrag van ARMCO-staal, staal C22 en messing 63 bij niet-spanningswegen

Citation for published version (APA):

Jongeneelen, J. A. A. M. (1989). *Vloeigedrag van ARMCO-staal, staal C22 en messing 63 bij niet-spanningswegen*. (TH Eindhoven. Afd. Werktuigbouwkunde, Vakgroep Produktietechnologie : WPB; Vol. WPA0820). 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

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.

VLOEIGEDRAG VAN ARMCO-STAAAL, STAAL C22
EN MESSING 63 BIJ NIET-RECHTE REKWEGEN
verslag van een doctoraal-onderzoek *hamings*

J.A.A.M. JONGENELEN

WPA-rapportnr. 0820

Samenvatting

Vloeikrommen vormen een belangrijke schakel tussen de materiaalkunde enerzijds en de plasticiteitsmechanica anderzijds. Inzicht in de factoren die de vloeikromme van een materiaal bepalen is voor beide kennisgebieden van belang.

Dit verslag handelt over een van deze factoren, namelijk over de invloed die de gevolgde rekweg op de vloeikromme heeft.

Voor een drietal materialen: Armco-staal, staal C22 en messing KMS 63 zijn eerst de standaard-vloeikrommen bepaald: de vloeikrommen die volgen uit de trek-, de stuik en de wring- of torsieproef. Vervolgens is voor elk materiaal een reeks vloeikrommen opgenomen met gekombineerde proeven: proeven waarbij tussentijds wordt overgegaan van de ene standaardproef op de andere. Zo zijn de combinaties trek-stuik, trek-torsie en torsie-trek onderzocht. Als variabele is de plastische rek voor de overgang (de 'voorrek') gehanteerd.

De veranderingen in de vloeikrommen zoals die optreden ten opzichte van de standaardkrommen zijn vastgelegd in een drietal karakteristieken als functie van de voorrek. Aan de hand hiervan is een kwantificering en een interpretatie van de waargenomen effecten mogelijk.

INHOUDSOPGAVE

	blz.
Samenvatting	1
0. Inleiding	2
1. Materialen en experimenten	3
1.1 materialen	3
1.2 experimenten	3
2. Resultaten	6
2.1 de referentie-proeven	6
2.2 de gekombineerde proeven	6
3. Discussie en conclusies	11

0. Inleiding

In de omvormtechnologie spelen vloeikrommen een sleutelrol. Vloeikrommen beschrijven het verloop van de vloeispanning van een materiaal als functie van de effectieve plastische rek. Standaard proeven om deze vloeikrommen te verkrijgen zijn de trekproef, de stuikproef en de wring- of torsieproef. Introduceert men in een proefstaaf een rek-omkeer door bijvoorbeeld eerst te trekken en vervolgens te stuiken, dan kan een spanningsverandering optreden.

Sinds Bauschinger een eeuw geleden het naar hem vernoemde effect ontdekte, is er veel onderzoek naar dit verschijnsel gedaan. Bauschinger zelf beschreef alleen een afname van de initiële vloeispanning na een volledige rek-omkeer, anderen hebben later de definitie als volgt verbreed om het hele vloeigedrag na rek-omkeer te kunnen beschrijven:

- 1— een verminderde initiële vloeispanning na de rek-omkeer,
- 2— een 'rondere' vloeikromme in het gebied direkt na rek-omkeer en
- 3— een blijvende ontsteviging: de vloeispanning is voor iedere rek, gerekend als totaal van voor- en einddeformatie, kleiner dan de vloeispanning bij diezelfde totale rekwaarde zonder rek-omkeer.

In industriële processen kunnen ook andere rekwegveranderingen dan volledige omkeer optreden: bij achterwaartse hulsextrusie bijvoorbeeld ondergaat het materiaal een overgang van stuik naar afschuiving. Deze overgang manifesteert zich als een knik in de rekweg. Verklaringen van het Bauschinger effect op metaalkundige basis doen vermoeden dat ook in zulke gevallen ontsteviging kan ontstaan en dat deze ontsteviging door een nieuwe uitbreiding van de Bauschinger definitie beschreven kan worden.

W. Sillekens [LIT.] heeft dit onderzocht en gevonden voor het koolstofstaal C45 bij deformatie van trek naar torsie (de geknikte rekweg) en van stuik naar trek (de volledige rek-omkeer). Hij heeft daarbij de drie bovengenoemde kenmerken gekwantificeerd met behulp van drie onafhankelijke parameters.

Het hierna beschreven onderzoek is een vervolg op dat van Sillekens: er zijn drie materialen onderzocht, te weten: ARMCO-staal, C22-staal en messing KMS 63 en op ieder materiaal zijn drie soorten proeven gedaan: trek-stuik, trek-wring- en wring-trekproeven, alsmede uiteraard standaard trek-, stuik- en wringproeven als referentie.

Onderzocht is of er inderdaad veranderingen in de vloeikrommen optreden bij genoemde rekwegen en of de gevonden veranderingen overeenstemmen met de meest uitgebreide Bauschinger definitie. Tevens is onderzocht in hoeverre de krommen na voordeformatie voldoen aan de veelgebruikte verstevigingsfunctie volgens Ludwik, Swift en Nadai: $\sigma_f = C (\bar{\epsilon} + \epsilon_0)^n$.

1. Materialen en experimenten

1.1 De materialen

De gebruikte materialen zijn ARMCO-staal, C22-staal en messing KMS 63. Beide staalsoorten worden in de praktijk bij omvormprocessen gebruikt en hebben een zodanig hoge waarde voor ϵ_k , de rek bij het begin van insnoering in een trekstaaf, dat de meetfouten bij het bepalen van de rek relatief klein konden blijven. Messing 63 heeft deze eigenschap eveneens maar heeft bovendien, in tegenstelling tot staal, een f.c.c. rooster.

De verwachting was dat beide staalsoorten een vergelijkbaar gedrag zouden vertonen en het verschil met het gedrag van messing zou dan terug te voeren kunnen zijn op het verschil in roostertype.

Een andere reden om een f.c.c. materiaal te gebruiken is het feit dat deze materialen geen vloeivlag kennen. De breedte van een vloeivlagtraject kan de werkelijke waarde van de aangebrachte voordeformatie namelijk aanzienlijk beïnvloeden: een voordeformatie van 0.05 verdwijnt geheel in een vloeivlag van diezelfde waarde!

ARMCO en C22-staal werden zachtgegloeid in vacuum, resp. 1/2 en 1 uur op 650° C, messing werd rekristalliserend gegloeid in vacuum op 550° C gedurende 1 uur. Zie voor lichtmicroscopopnamen van de gegloeide materialen bijlage G.

Alle proefstaven werden per materiaal uit één staaf vervaardigd.

1.2 De experimenten

Met de drie standaardproeven, de Trek- de Stuik- en de Wring- of torsieproef (in het vervolg aangeduid als T, S of W proef) kunnen zeven soorten dubbel-proeven gedaan worden. Hiervan drie met rek-omkeer, te weten: T-S, S-T en W-W (wringen, gevolgd door wringen in omgekeerde richting) en vier met een knik in de rekweg: T-W, W-T, S-W en W-S. Van deze zeven mogelijkheden leverden S-T, W-W, S-W en W-S grote praktische problemen op zodat de overblijvende drie proeven gebruikt werden: T-S, T-W en W-T.

De trekproeven

Alle trekproeven (referentie, T-W en W-T) werden uitgevoerd op de computer/datataker-gestuurde trekbank van de sectie omvormtechnologie WPA.

De wringproeven

Bij wringproeven doen zich vrijwel altijd enkele problemen voor. De twee belangrijkste zijn:

- het berekenen van de spanning.

Met behulp van logaritmische regressie kan men uit de moment-hoekverdraaiingskromme een vergelijkspanning berekenen. Hierbij geldt echter als aanname dat het materiaal voldoet aan de vloeifunctie van Ludwik/Hollomon [LIT 2]. In feite is dit een fundamentele

fout want het doel van het opstellen van een $\sigma_{\tau} - \bar{\epsilon}$ kromme is juist het onderzoeken van het vloeigedrag en dan is het vooronderstellen van een bepaald gedrag uiteraard uit den boze.

- het berekenen van de rek.

In een wringstaaf geldt, onder aanname: lengte en diameter konstant tijdens het proces, voor de rek: $\bar{\epsilon} = \frac{r \cdot \theta}{L\sqrt{3}} = \bar{\epsilon}(r)$ met :

L = lengte proefstaaf,
r = diameter proefstaaf,
 θ = torsiehoek in radialen.

Aangezien $\bar{\epsilon}$ aldus een lineaire functie van de staafstraal is, is het niet mogelijk te spreken over de rek en evenmin is het mogelijk een torsie-voordeformatie van één bepaalde waarde in een W-T proef te geven.

Deze problemen zijn opgelost door alle wringproeven (referentie, T-W en W-T) uit te voeren als zogenaamde differentieproeven. Zie voor een beschrijving van deze differentieproeven bijlage A.

De wringproeven werden uitgevoerd op de aangepaste AMSLER torsiebank van de sectie omvormtechnologie WPA.

De stuikproeven

De problemen bij normale stuikproeven zijn voornamelijk:

- wrijving tussen de kopvlakken van de proefstaaf en de oplegvlakken van de testmachine. Deze wrijving verhindert de dikterek van de stuikstaven aldaar. Als gevolg daarvan treedt op:
- uitbolling van het cilinderoppervlak (tonvorming). Immers, de dwarsdoorsneden in het midden van de staaf worden minder belemmerd in hun dikterek dan de kopse vlakken. Dit alles resulteert in:
- een belangrijke afwijking van de lijnspanningstoestand die als aanname geldt in de berekening van de vloeikromme.

Om deze problemen te vermijden werden de stuikstaven uitgevoerd als zogenaamde 'Rastegaev' staven (bijlage B en [LIT.], [LIT.])

De rekken en spanningen voor de vloeikrommen werden bepaald uit gemeten krachten en diameters. Hiertoe werd van iedere stuikstaaf tijdens het proces een aantal fotografische opnamen (24x36) gemaakt: ca. 18 opnamen, verdeeld over het totale rektraject. Van iedere opname werd de staafdiameter opgemeten met behulp van een profielprojector (vergroting 50 x) en teruggerekend naar de werkelijke diameter. Het maken van een opname werd automatisch aangegeven op een x-y schrijver waarop de kracht geregistreerd werd. De krachten, behorende bij de gemaakte opnamen, werden daarna van het papier opgemeten. De stuikproeven werden uitgevoerd op de 6.4 MN hydraulische Sack & Kiesselbach pers van de

sectie omvormtechnologie WPA.

Per proef (T-S, T-W en W-T) werden negen voordeformaties toegepast, lineair verdeeld over het rektraject $0 - \bar{\epsilon}_k$, de kritische rek uit de trekproef.

Alle proeven werden uitgevoerd bij kamertemperatuur.

2. Resultaten

2.1 De referentie-proeven

Om het effect van een voordeformatie op een vloeikromme te kunnen beoordelen is het noodzakelijk van alle proeven tenminste één referentieproef te hebben. Elke referentieproef werd driemaal uitgevoerd. Dit levert, uitgevoerd per standaardproef (T, S en W) per materiaal, in totaal dus 27 krommen. In fig. 2.1 zijn alle standaardproeven per materiaal in één figuur weergegeven, met als voordeel dat per proef meteen een indicatie verkregen kan worden over de grootte van de spreiding. In het algemeen is de spreiding van trekproefmetingen slechts enkele N/mm², de spreidingen van de wring- en de stuikproeven kunnen oplopen tot enkele tientallen N/mm². De precieze waarden van alle spreidingen, alsmede de waarden van de berekende n -, C - en ϵ_0 -waarden zijn te vinden in rapportnr. WPA.

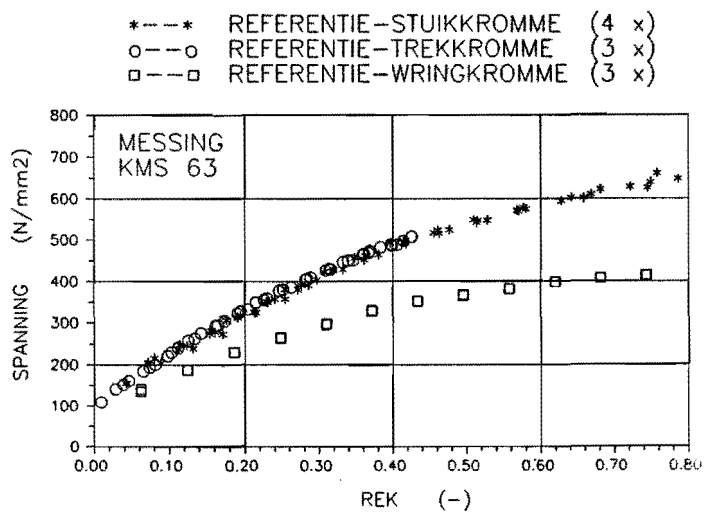
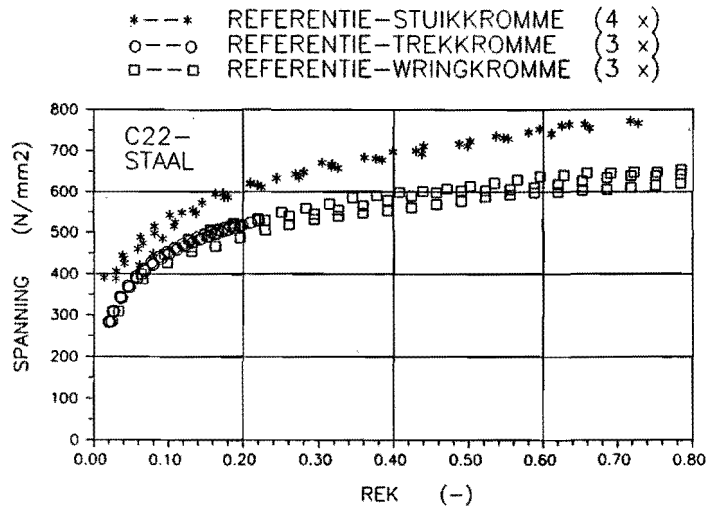
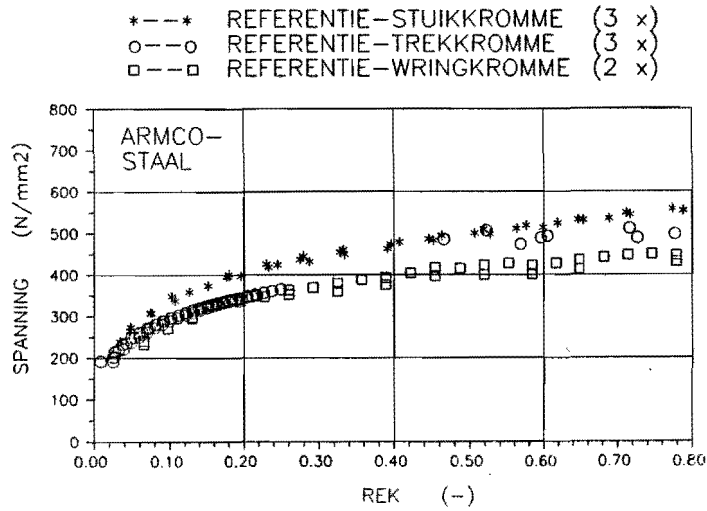
2.2 De gekombineerde proeven

Figuur 2.2 geeft het vloeigedrag als functie van de voordeformatie voor de verschillende proeven en materialen.

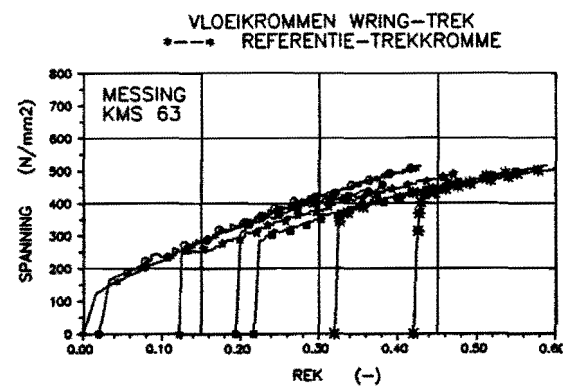
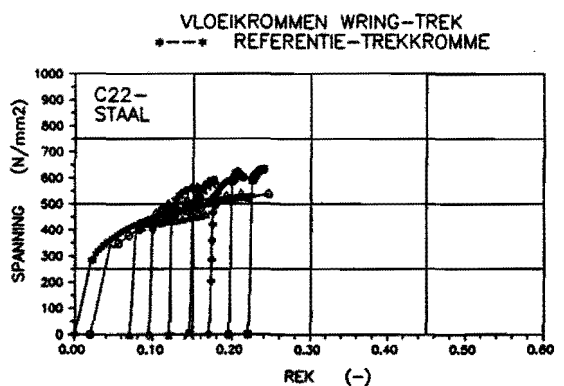
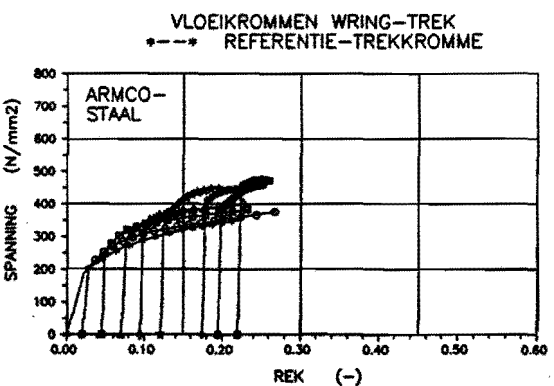
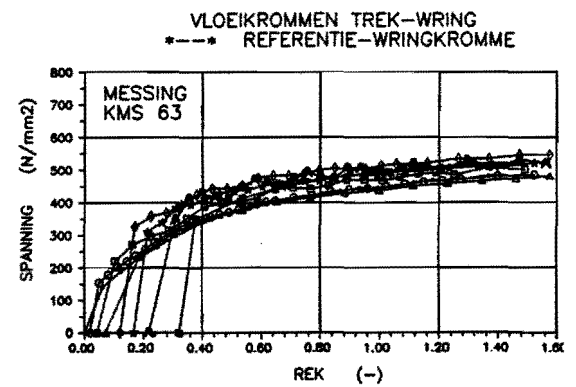
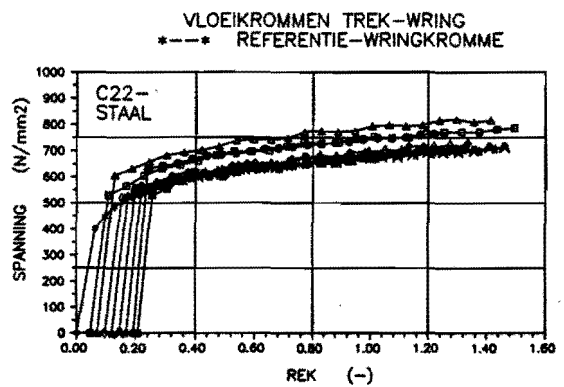
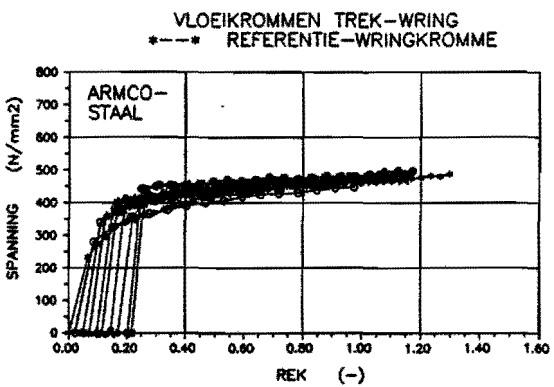
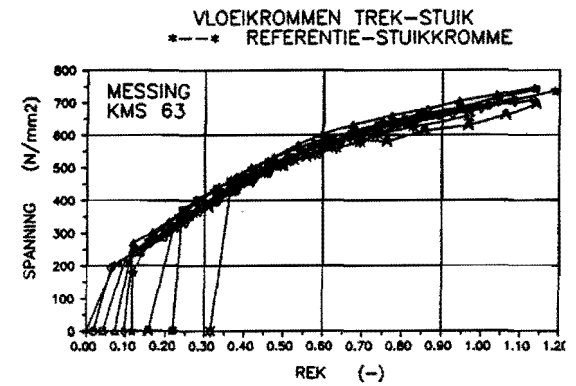
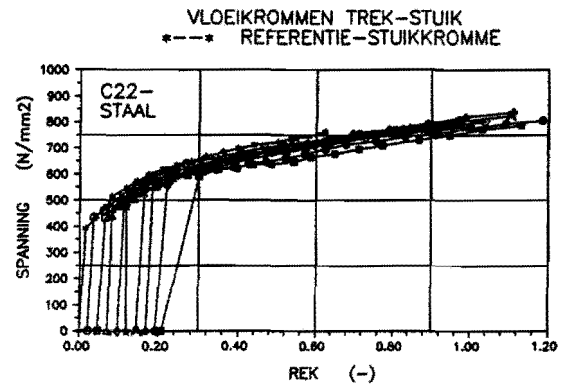
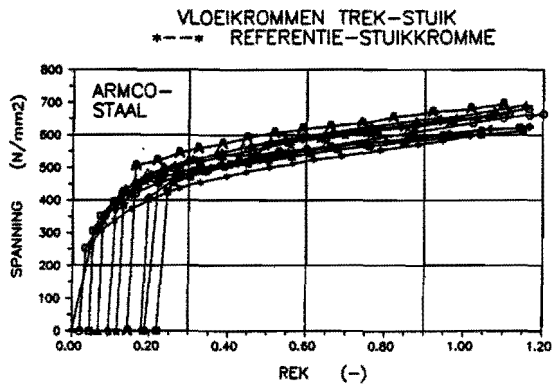
Alle grafieken uit deze figuur, alle grafieken van de referentiekrommen en de grafieken van alle proeven apart, uitgezet tegen de bijbehorende referentiekrommen zijn — in A-4 formaat— gebundeld in WPA rapportnr. . Figuur 2.2 is wellicht wat onnauwkeurig vanwege de verscaling, maar onontbeerlijk voor het overzicht van het totaal.

Voor alle grafieken geldt dat de voordeformatiekromme niet getekend is, de referentiekromme uiteraard wèl.

Figuur 2.3 geeft een legenda van de gebruikte symbolen met de bijbehorende streeffrekken (voordeformaties). In vrijwel alle gevallen is de werkelijke voordeformatie gelijk aan de streefwaarde $\pm 2\%$; in enkele gevallen is de afwijking groter, tot $\pm 15\%$. In alle gevallen is de werkelijke voordeformatie in de grafieken getekend, niet de streefwaarde.



figuur 2.1: referentie-vloeikrommen



figuur 2.2. overzicht van alle vloeikrommen, per proef en materiaal uitgezet tegen referentiekrommen.

voordeformatie (streefwaarde)	symbool
0.020	○
0.045	□
0.070	△
0.095	◇
0.120	☆
0.145	⊠
0.170	⊕
0.195	●
0.220	■
0.320	⊗
0.420	⊙

figuur 2.3: legenda bij figuur 2.2

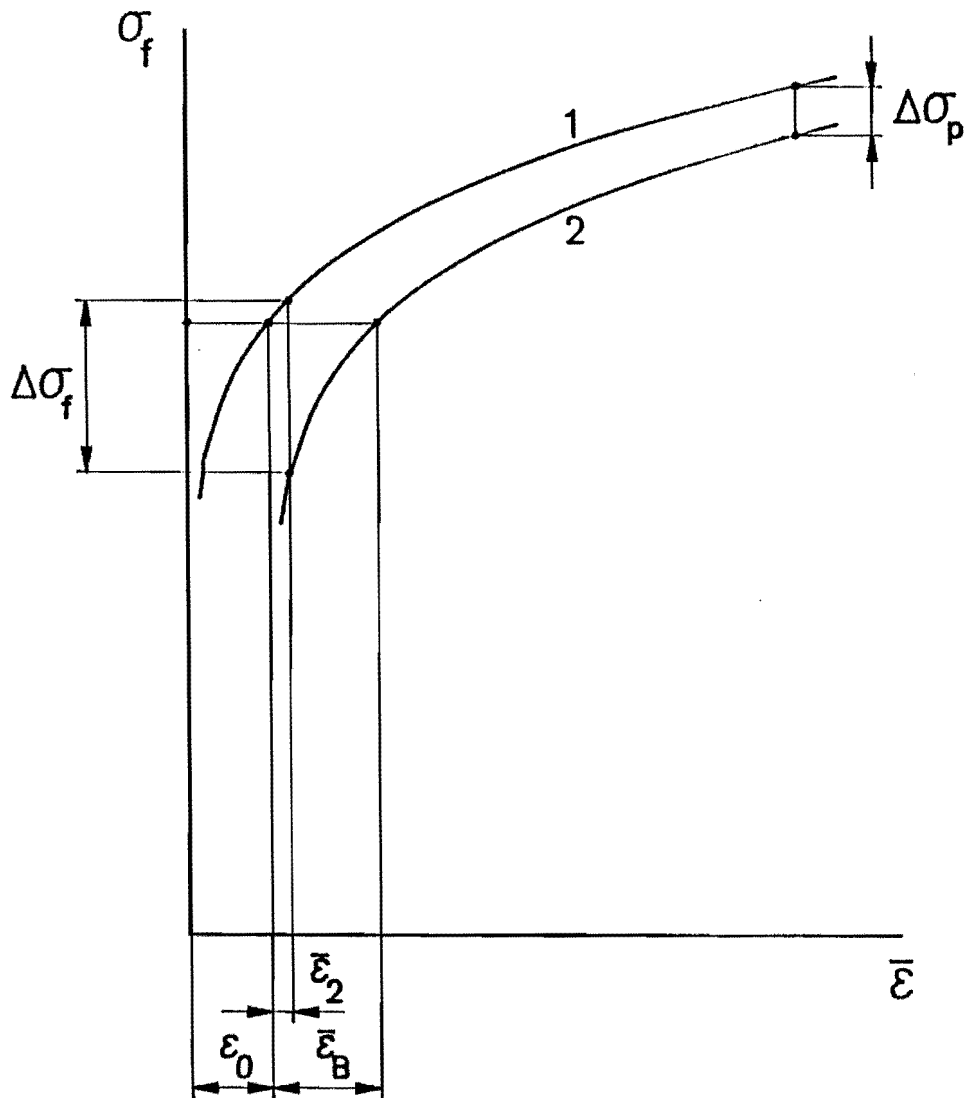
Karakteristieken

De karakteristieken die Sillekens gebruikt om het Bauschinger effect en het uitgebreide Bauschinger effect te beschrijven zijn de volgende (zie figuur 2.4):

- $\frac{\Delta\bar{\sigma}}{\sigma_f}$: de gerekonstrueerde afname van de initiële vloeispanning, genormeerd naar de vloeispanning juist voor de rekverandering;
- $\Delta\bar{\sigma}_p$: de permanente ontsteviging ofwel het spanningsverschil bij grote rekken;
- ϵ_b of ϵ_1 : de Bauschingerrek of de 'level'rek: die rek bij de tweede deformatie die nodig is om de waarde van de vloeispanning juist voor de rekverandering weer te bereiken. Deze waarde kan genormeerd worden door te delen door de voordeformatie en is dan een maat voor de 'rondheid' van de kromme: een waarde groter dan 1 betekent een rondere kromme, kleiner dan 1 betekent een minder ronde kromme dan de referentiekromme. Hier wordt in alle gevallen ϵ_b of 'Bauschingerrek' gebruikt.

Figuur 3.1 geeft een overzicht van deze karakterteristieken.

- | | |
|---|----------------------------|
| 1 | Referentie-vloeikromme |
| 2 | Vloeikromme na de overgang |



figuur 2.4: karakteristieken

3. Diskussie en konklusies

Referentiekrommen

Tegenwoordig wordt veelal aangenomen dat per materiaal geldt dat de trek- en de stuikkromme aan elkaar gelijk zijn terwijl de wringkromme lager dan de trekkromme ligt:

$$\sigma_f \text{ wring} \simeq 0.9 \sigma_f \text{ trek/stuik [. . .]}.$$

Witzel en Haeβner [LIT.] hebben dit verschijnsel op metaalkundige gronden met de Taylorrelatie $\sigma = M_T \cdot \tau_{krit}$ verklaard: bij torsie ontwikkelt zich zowel een andere textuur als een andere dislokatieverdeling dan bij trek of stuik. Het verschil in textuur tussen torsie en trek of stuik zorgt voor een verschil in de Taylorfaktor M_T ; verschil in dislokatieverdeling levert verschillende waarden voor de kritische schuifspanning τ_{krit} op. Beide effecten zouden hierdoor tot een met de rek toenemende divergentie van de torsiekromme en de stuik/trekkromme moeten leiden.

De grafiek van messing uit figuur 2.1 voldoet uitstekend aan deze kenmerken. Ook het materiaal dat Sillekens gebruikte, koolstofstaal C45, vertoonde dit beeld []. Beide staalsoorten uit figuur 2.1 laten echter iets geheel anders zien: bij deze figuren vallen de trekkrommen samen met de wringkrommen in plaats van met de stuikkrommen!

Het is vooralsnog niet duidelijk of hier sprake is van een afwijking en zo ja, wat de oorzaak van deze afwijking is. Een oorzaak zou kunnen zijn dat de belastingopnemers van een of meer proefmachines grote systematische afwijkingen zouden vertonen. Dit is echter gecontroleerd, voor de torsiebank zelfs door een absolute ijking met behulp van gewichten, door ijking met nauwkeurige drukdozen ($\pm 0.1\%$). Bovendien zou dan het verschil tussen enerzijds beide staalsoorten en anderzijds messing hiermee nog steeds niet verklaard zijn.

Een andere oorzaak zou kunnen zijn dat de gloeibehandelingen niet voldoende zijn geweest om de door de fabricage veroorzaakte plastische anisotropie te neutraliseren. Een reeks hardheidsmetingen op langs- en dwarsdoorsneden van elk (gegloeid) materiaal toonde echter geen significante verschillen tussen beide doorsneden. Dit werd bovendien nog eens bevestigd door de korresponderende lichtmikroskoop-opnamen (zie bijlagen G en H).

Aangezien de metingen voor alledrie de materialen op dezelfde machines en met dezelfde methoden verricht zijn en de resultaten met dezelfde computerprogramma's verwerkt zijn, moeten we wel aannemen dat de gevonden resultaten juist zijn.

De gekombineerde proeven

Het eerste wat opvalt aan de grafieken van figuur 2.2 is dat het Bauschinger effect vrijwel nergens volledig optreedt. Ontsteviging treffen we alleen aan bij C22, T-S en bij messing, W-T, bij bijna alle andere groepen treffen we juist een extra *versteviging* aan!

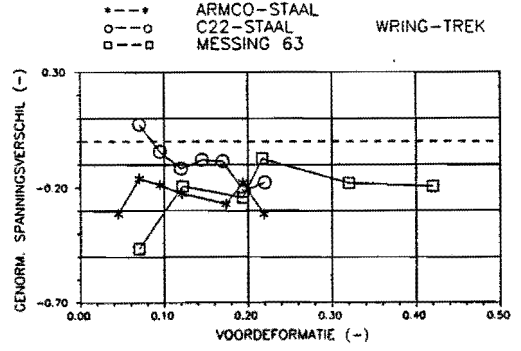
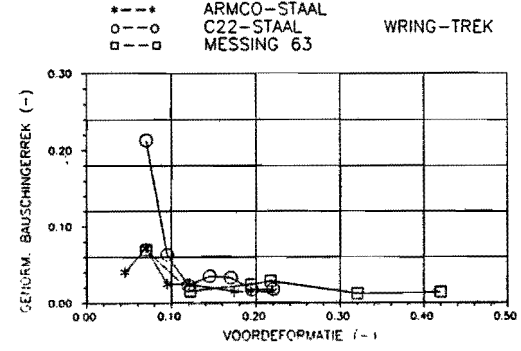
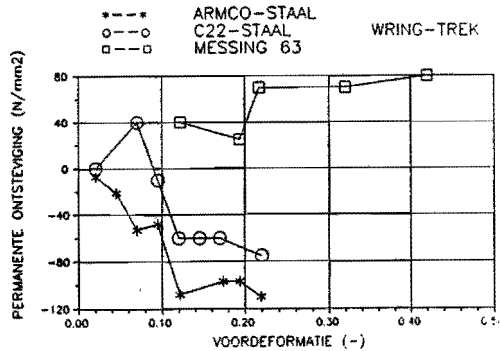
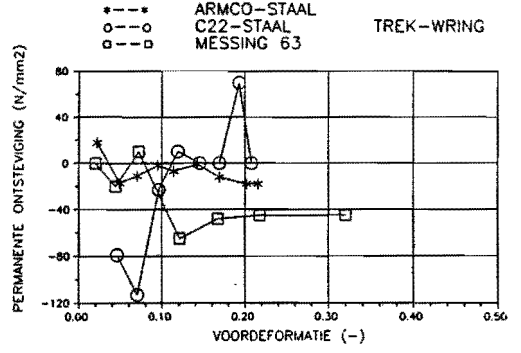
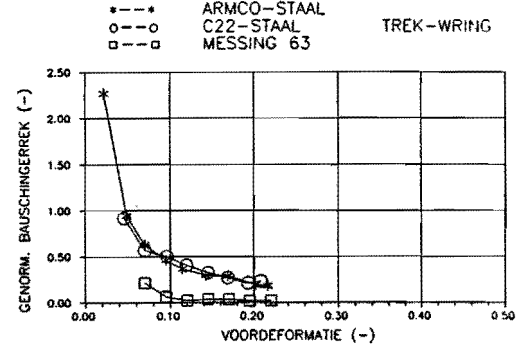
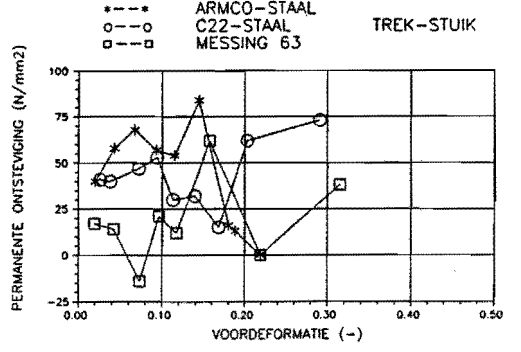
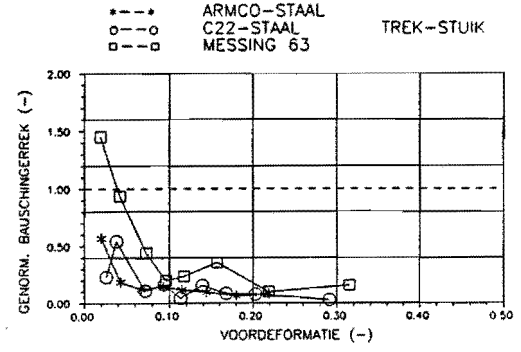
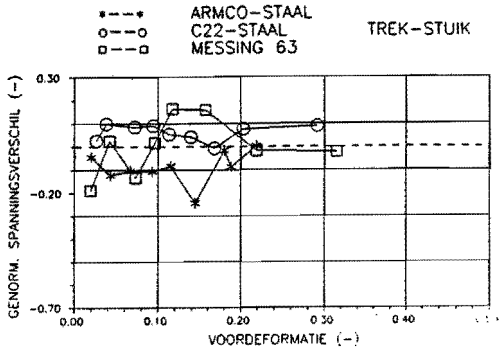
Het in hoofdstuk 2 genoemde kenmerk voor het Bauschinger effect: 'rondere vloeikrommen' is bij de genoemde groepen niet of waarschijnlijk niet aanwezig ('waarschijnlijk niet' voor die gevallen waarin het begin van de vloeikromme te weinig meetpunten heeft om een duidelijke konklusie te trekken).

Voor alle trekkrommen geldt: slechts 1 op de 5 (in sommige gevallen 1 op de 3) meetpunten is in de grafieken ingetekend. Bij messing, W-T is dit goed zichtbaar: de verbindinglijnen verbinden alle punten, ook de niet-ingetekende. De oorzaak van deze grillige lijnen is het schoksgewijs deformereren van messing: tijdens een trekproef blijft iedere keer de diameter gedurende enkele seconden konstant terwijl de kracht toeneemt met de toenemende (opgelegde) verlenging, waarna plotseling de diameter afneemt onder gelijkblijvende kracht om vervolgens weer een tijdje konstant op die nieuwe waarde te blijven, enz. enz.

Eveneens voor alle trekkrommen geldt, dat geen metingen verricht zijn vanaf het begin van insnoering: in [LIT.] is aangetoond dat de Bridgmankorrektie niet mag worden toegepast op trekstaven met torsie-voorformatie.

Figuur 3.1 geeft een overzicht van de karakteristieken zoals beschreven in hoofdstuk 2 en []. Vergelijkt men deze figuren met de overeenkomstige figuren uit het werk van Sillekens dan blijkt de daar gevonden regelmaat hier vrijwel geheel afwezig te zijn. Voor een verklaring van deze afwezigheid is nader onderzoek noodzakelijk.

Voor de trek-wringkrommen kon het (genormeerde) spanningsverschil bij gebrek aan meetpunten niet bepaald worden. De oorzaak hiervan is een verschijnsel dat bij trek-wringproeven nauwelijks te voorkomen is: door de trek-voorformatie liggen de hartlijnen van de koppen van de proefstaaf vaak niet meer exakt in elkaars verlengde. Bij de einddeformatie, het torderen, gebeurt dan het volgende: behalve het torderen van het cilindrische gedeelte van de proefstaaf worden de koppen van de proefstaaf in één lijn met elkaar gedwongen. De extra buigenergie die hiervoor nodig is wordt uiteraard geleverd door de torsiebank en dus ook genoteerd door de drukopnemer die het torsiemoment opneemt. De meeste trek-wringkrommen vertonen hierdoor in het begin een extra bult die het meten van de initiële vloeispanning onmogelijk maken.



Figuur 3.1: overzicht van de karakteristieken als functie van de voordeformatie