

Invloed van de anisotropie op de plastische eigenschappen  
van koudgewalst koper.

Verslag van het afstudeerwerk  
verricht onder leiding van  
Prof. dr M.J. Druyvesteyn

P.M. van Dijk

april 1963

## Inhoud

	pag.
I Inleiding	1
II Materiaal	3
III Experimenten	4
A. Plastische deformatie door rekken van homogene folies.	4
B. Bepaling van de deformatie ten gevolge van één deformatieband.	6
C. Plastische deformatie door rekken van folies met kleine inhomogeniteiten.	6
IV Theorie	9
A. Beschouwing met behulp van deformatietheorie.	9
B. Beschouwing met behulp van deformatie en spanningstheorie.	10
V Discussie	14
A. Discussie van de deformatietheorie en de meetresultaten.	14
B. Discussie van de deformatie-spanningstheorie en de meetresultaten.	16
VI Suggesties over nog uit te voeren experimenten.	19
VII Het opbrengen van Rasters.	20
VIII Literatuur.	22

-1-

## I Inleiding.

Bij het walsen van metalen treden plastische deformaties op. Deze deformaties zijn de oorzaak van het ontstaan van texturen, die bij een hoge walsgraad zeer sterk kunnen zijn.

Metalen die een sterke textuur vertonen bezitten anisotrope eigenschappen.

Het onderzochte koperfolie, dat een hoge walsgraad bezit, heeft volgens de literatuur een mengtextuur bestaande uit twee componenten: (110)  $[\bar{1}12]$  en (112)  $[11\bar{1}]$ . De textuur is voor het onderzochte koperfolie niet gecontroleerd en er kan dus ook niets gezegd worden over de verhouding, waarin de componenten voorkomen. De anisotrope eigenschappen van het onderzochte koperfolie zijn van mechanische aard. Ze omvatten zowel homogene als inhomogene plastische deformatie eigenschappen.

In sommige gevallen treden bij plastische deformatie van homogene folies inhomogene deformaties op. De inhomogene deformatie bij homogene folies verschijnt in de vorm van deformatiebanden.

Onder een deformatieband verstaan we een langwerpig gebied waar de plastische deformatie aanzienlijk groter is dan in zijn omgeving.

De banden zijn met het blote oog zichtbaar. Mechanisch polijsten doet de zichtbaarheid in hoge mate stijgen.

Deformatiebanden maken een bepaalde hoek  $\theta$  met de trekrichting. Deze hoek  $\theta$  hangt af van de anisotropie van het materiaal en dus van de hoek  $\alpha$ , die de walsrichting maakt met de trekrichting.

Daar de vloeigrens experimenteel moeilijk te bepalen is wordt de belasting  $L_{\max}$  bepaald waarbij  $dL/ds = 0$ .

## II Materiaal.

Het onderzochte materiaal is koud gewalst koper van handelskwaliteit (99,9 % Cu). Het materiaal is geleverd door de firma Cochius te Berlijn.

De dikte van alle folies bedroeg 0,10 mm. De korrels hadden een langgerekte vorm met afmetingen 5-15  $\mu$ m in de walsrichting en 3-5  $\mu$ m loodrecht op de walsrichting.

De microhardheid, gemeten met de Leitz "Durimet" hardheidsmeter, bedroeg ongeveer <sup>140</sup>~~70~~ kg/mm<sup>2</sup>.

Onderstaande foto 1 geeft een beeld van de moeilijk zichtbaar te maken structuur van het sterk gedeformeerde koperfolie.

Bovendien zien we in foto 2 de structuur van zacht koper.

### III Experimenten

De uitgevoerde experimenten kunnen onderscheiden worden in

A. Plastische deformatie door rekken van homogene folies.

B. Bepaling van de deformatie ten gevolge van één deformatieband.

C. Plastische deformatie door rekken van folies met kleine inhomogeniteiten in de vorm van ronde gaatjes (diameter 0,13 mm).

De trekproeven zijn uitgevoerd met behulp van de Instron trekbank. Alle folies hadden dezelfde afmetingen.

De lengte  $l$  tussen de inklembekken bedroeg ongeveer 82 mm. De breedte 11 mm. en de dikte 0,10 mm. De variatie in de doorsnede was ongeveer 1% en we kunnen dus spreken van een homogeen folie.

Bij de trekproeven is als variabele ingevoerd de hoek  $\alpha$ ; dit is de hoek die de walsrichting maakt met de trekrichting.

De nauwkeurigheid in  $\alpha$  bedraagt ongeveer  $1^\circ$ .

Bij elke waarde van  $\alpha$  werden drie of vier folies getrokken, waarbij de trek-rek krommen werden opgenomen.

De wijze waarop de folies in de trekbank bevestigd werden is te zien op foto 3.

A. Plastische deformatie door rekken van homogene folies.

De resultaten van deze trekproeven zijn van verschillende aard.

1. Bepaling van de maximale belasting  $L_{\max}$  als functie van de walsrichting  $\alpha$ .

De treksnelheid bedroeg 0,2 cm/min voor alle experimenten, tenzij anders wordt vermeld.

De afhankelijkheid van  $L_{\max}$  als functie van de treksnelheid is niet bepaald.

Het verloop van  $L_{\max}$  als functie van  $\alpha$  wordt weergegeven in fig.1.

2. Bepaling van de hoek  $\theta$  die de deformatiebanden met de trekrichting maken.

De waarden van  $\theta$  werden gemeten met een nauwkeurigheid van  $0,5^{\circ}$ . Bij de meeste waarden van  $\alpha$  worden twee waarden van  $\theta$  gevonden, die respectievelijk  $\theta_t$  en  $\theta_m$  genoemd worden.

Bij een bepaalde waarde van  $\alpha$  blijken  $\theta_t$  en  $\theta_m$  ongeveer constant te zijn. De resultaten verkregen bij deze experimenten zijn weergegeven in fig.2. De resultaten van andere onderzoekers <sup>2,3,4</sup> zijn weergegeven in fig.3.

Bij vele waarden van  $\alpha > 25^{\circ}$  werden over het algemeen geen resultaten verkregen, waarbij  $\theta_m$  bepaald kon worden binnen een nauwkeurigheid van  $2^{\circ}$ . Dit is de reden waarom de kromme van  $\theta_m$  gedeeltelijk met een onderbroken lijn is weergegeven in fig.2.

3. Bepaling van de strain ratio  $r$  bij homogene rek.

De strain ratio  $r$  wordt weergegeven door  $r = \xi_b / \xi_a$  waarbij

$\xi_l$  de rel. rek in de x-richting is (trekrichting)

$\xi_b$  de rel. rek in de y-richting

$\xi_a$  de rel. rek in de z-richting

De x en y-richting liggen in het vlak van tekening fig.2-3-4-5.

De rel. rekken  $\xi_l$  en  $\xi_b$  werden gemeten, nadat het folie ontspannen was. Beginnende met een rel. plastische rek van 0,15 werd de strain ratio bepaald en telkens weer als de rel. plastische rek met ongeveer 0,1% was toegenomen.



Dit proces werd vervolgd totdat zichtbare inhomogene deformatie begon op te treden bij  $\varepsilon_1 \sim 0,6\%$ . In fig.4 is te zien dat:

- a)  $r$  is onafhankelijk van  $\varepsilon_1$
- b)  $r$  is afhankelijk van  $\alpha$ .

Uitvoerigere resultaten staan vermeld in het Candidaatsverslag van P.M. van Dijk <sup>7</sup>.

#### B. Bepaling van de deformatie tengevolge van één deformatieband.

Met behulp van een raster van 0,10 mm wordt de richting van de verplaatsingsvector ten opzichte van de trekrichting bepaald. De methode van het opbrengen van het raster wordt beschreven in de bijlage.

In fig. 5 is op zeer schematische wijze weergegeven hoe de verplaatsings vector verkregen wordt. Met behulp van foto 4-5-6 is in te zien hoe de verplaatsingen  $\Delta b$  en  $\Delta l$  verkregen worden door de verplaatsingen van het raster zowel in horizontale als verticale richting te meten.

Bij verschillende waarden van  $\alpha$  is zowel  $\Delta b$  als  $\Delta l$  bepaald. Hieruit kan de richting  $\beta$  bepaald worden want  $\text{tg } \beta = \Delta b / \Delta l$ . De resultaten zijn weergegeven in tabel 1.

#### C. Meting van de deformatie tengevolge van één deformatieband die ontstaat door twee gaatjes van 0,10 mm in het folie te boren op plaatsen, die zo gelegen zijn dat de verbindingslijn tussen de centra van de gaatjes samenvalt met een richting, waarin een deformatie band gevormd wordt.

Voor een meer gedetailleerd beeld wordt verwezen naar F.A.M.M. van Meel<sup>3</sup>.

Bij de bepaling van de verplaatsings vector van deze deformatiebanden, die tussen en in de omgeving van de gaatjes gevormd worden is gebleken, dat de invloed van de gaatjes op de verplaatsingen zeer groot is. Het gevolg is, dat de richting  $\beta$  als functie van de lengterichting van de band erg variabel is. Om deze reden is bovenbeschreven methode vervangen door de methode beschreven onder B.

Tabel 1

No folie	$\theta_t$	$\theta_m$	$\Delta l \mu m$	$\Delta b \mu m$	$\beta_t$	$\beta_m$
14	5°	63°	36,3	23	32,5°	
42	20°	62°	39,6	22,6		30°
54	25°	62,5°	36,6	25,8	35°	
85	35°	56°	52,3	38	36°	
93	40°	55°-58°	47,2	40	41°-39,5°	
221	55°	54°	30,6	25,7		40°
164	65°	54°	22	16,8	37,5°	
171	70°	53°	26,2	20,8	38,5°	
181	75°	53°	30,5	22,2	36°	
193	80°	52°	23	17	36,5°	
203	85°	55°	19,0	14,2		37°

$\Delta l$  is de gemiddelde verplaatsing in de lengterichting.

$\Delta b$  is de gemiddelde verplaatsing in de breedterichting.

Tabel 2

Bepaling van de constanten.

uit  $r(\alpha)$

F = 1,1 H

G = 1,9 H

N = 4,8 H

uit  $\theta(\alpha)$

F = 1,1 H

G = 1,9 H

uit  $\sigma_v(\alpha)$

F = 1,5 H

G = 1,5 H

N = 4,3 H

IV Theorie

A. Beschouwing van de plastische deformatie verschijnselen met gebruikmaking van de deformatie theorie.

Bij de theoretische beschouwingen wordt uitgegaan van de volgende veronderstellingen.

1. De kristallen in het materiaal zijn zo klein, dat het materiaal als homogeen beschouwd mag worden.
2. De spanningstoestand is twee-dimensionaal.
3. De deformatiebanden zijn recht.
4. De deformatieband blijft aan het aangrenzende materiaal passen en het folie blijft vlak. De rek in de richting van de band is nul en er treedt geen buiging op bij trekproeven.
5. De plastische deformatie in de band heeft dezelfde strain ratio als in het geval van homogene plastische deformatie.

We zullen als assen nemen: de trekrichting valt samen met de x-richting de richtingen er loodrecht op de y en z-richting zo, dat y de breedte-en z de dikterichting van het folie is.

De deformatie tensor in dit assenstelsel heeft de volgende vorm

$$\begin{matrix}
 & \epsilon_{xx} & \epsilon_{yx} & \epsilon_{zx} \\
 (1) & \epsilon_{xy} & \epsilon_{yy} & \epsilon_{zy} \\
 & \epsilon_{xz} & \epsilon_{yz} & \epsilon_{zz}
 \end{matrix}$$

Draaling van de tensor om de z-as over een hoek  $\theta$  geeft de volgende transformatie matrix.

$$(2) \begin{matrix} x \\ y \\ z \end{matrix}^1 \begin{pmatrix} l_1 & m_1 & n_1 \\ l_2 & m_2 & n_2 \\ l_3 & m_3 & n_3 \end{pmatrix} \text{ in dit geval } \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

De algemene transformatie formule <sup>5</sup> voor een tweede orde tensor luidt

$$(3) \epsilon_{x^1 x^1} = \epsilon_{xx} l_1^2 + \epsilon_{yy} m_1^2 + \epsilon_{zz} n_1^2 + \epsilon_{yz} m_1 n_1 + \epsilon_{zx} n_1 l_1 + \epsilon_{xy} l_1 m_1 + \epsilon_{zy} n_1 m_1 + \epsilon_{xz} l_1 m_1 + \epsilon_{yx} m_1 n_1$$

Volgens veronderstelling 4 moet  $\epsilon_{x^1 x^1} = 0$  dus

$$(4) \epsilon_{x^1 x^1} = \epsilon_{xx} \cos^2 \theta + \sin \theta \cdot \cos \theta \cdot \epsilon_{xy} + \sin^2 \theta \cdot \epsilon_{yy} = 0.$$

Om lang deze weg de hoeken  $\theta$  te bepalen moeten we zowel de relatieve rekken als afschuiving kennen.

Als we onder  $\beta_t$  de hoek verstaan die de verplaatsings-vector van de deformatie band  $\theta_t$  met de trekrichting maakt dan is eenvoudig in te zien dat  $\theta_m + \beta_t = 90^\circ$

$$(5) \quad \text{tg } \beta_t = \left( - \frac{\Delta b}{\Delta l} \right)_t$$

Immers als we stellen dat de verplaatsings richting tengevolge van een deformatie band  $\theta_t$  wordt weergegeven door  $\beta_t$ , dan is de richting loodrecht op de verplaatsingsrichting een richting waarin de verplaatsing nul is en waarin dus een deformatieband  $\theta_m$  gevormd kan worden omdat de rek in die richting nul is.

Tevens zien we, dat om dezelfde reden  $\theta_t + \beta_m = 90^\circ$ .

Dus

$$(6) \quad \theta_t + \beta_m = \theta_m + \beta_t = 90^\circ$$

B. Beschouwing van de plastische deformatie verschijnselen met behulp van de deformatie en de spannings theorie.

Bovenstaande theorie gaat alleen uit van de deformatie toestanden. Er kan echter ook een theorie uitgewerkt worden die zowel van de deformatie als de spanning gebruik maakt (Hill)<sup>6</sup>.

Bij de volgende beschouwing wordt uitgegaan van dezelfde veronderstellingen als waarvan Hill uitging bij de beschouwing van de plastische deformatie van anisotroop materiaal.

De veronderstellingen zijn, behalve de onder A genoemde,

6. Het vloeicriterium van von Mises gaat op voor anisotroop materiaal als het uitgebreid wordt tot de volgende vorm:

$$(7) \quad 2 f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + \\ 2 L \sigma_{yz}^2 + 2 M \sigma_{xz}^2 + 2 N \sigma_{xy}^2 = 1 \text{ waarin}$$

$\sigma$ 's spanningen zijn en

F, G, H, L, M en N materiaal constanten.

Bij de aanname van bovenstaande vergelijking wordt verondersteld dat:

- a. Er is geen Bauschinger effect<sup>6</sup> en er treden dus geen lineaire termen op.
- b. Een hydrostatische druk van de orde van grootte van de aangelegde spanning heeft geen invloed. Er treden alleen verschillen in de normaalspanningen op.
- c. De anisotropie wordt bepaald door drie onderling loodrechte assen x, y en z als de walsrichting in de x-richting valt. De parameters F, G, H, L, M en N worden bepaald door het folie en veranderen niet door kleine plastische deformaties die optreden tijdens de experimenten.

De vloeispanningen in de x, y en z-richting worden gegeven door X, Y en Z. Dus:

$$(8) \quad G + H = \frac{1}{X^2} \quad ; \quad F + H = \frac{1}{Y^2} \quad ; \quad F + G = \frac{1}{Z^2}$$

7. De infinitesimale rektoename wordt weergegeven door

$$(9) \quad d \varepsilon_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\lambda.$$

Voor de plastische potentiaal  $f$  wordt de functie uit vergelijking (7) genomen.  $d\lambda$  is een scalaire proportionaliteits factor die van de versterking afhangt.

Met behulp van (7) en (9) kan de volgende bitensor gevormd worden.

	$\sigma_{xx} d\lambda$	$\sigma_{yy} d\lambda$	$\sigma_{zz} d\lambda$	$\sigma_{yz} d\lambda$	$\sigma_{xz} d\lambda$	$\sigma_{xy} d\lambda$
$d \varepsilon_{xx}$	G+H	-H	-G	0	0	0
$d \varepsilon_{yy}$	-H	F+H	-F	0	0	0
(10) $d \varepsilon_{zz}$	-G	-F	G+H	0	0	0
$d \varepsilon_{yz}$	0	0	0	2L	0	0
$d \varepsilon_{xz}$	0	0	0	0	2M	0
$d \varepsilon_{xy}$	0	0	0	0	0	2N

Als de spanning  $\sigma$  aangelegd wordt in een richting gelegen in het XY vlak in een richting, die een hoek  $\alpha$  maakt met de X-richting dan wordt de spanning gegeven door de volgende tensor.

$$(11) \quad \begin{matrix} \sigma \cos^2 \alpha & \sigma \sin \alpha \cos \alpha & 0 \\ \sigma \sin \alpha \cos \alpha & \sigma \sin^2 \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

Om de richting van de deformatieband te kunnen bepalen moeten we de relatieve rek in de  $x^1$ -richting bepalen die een hoek  $(\theta + \alpha)$  met de walsrichting maakt.

$$(12) \quad d_{x^1 x^1} = d \varepsilon_{xx} \cos^2 (\theta + \alpha) + d \varepsilon_{yy} \sin^2 (\theta + \alpha) - d \varepsilon_{xy} \cos (\theta + \alpha) \sin (\theta + \alpha).$$

Combinatie van (10), (11) en (12) geeft voor de richting van de deformatiebanden (de  $x^1$ -richting), die richting waarin de rek nul moet zijn.

$$d \epsilon_{x^1 x^1} = \sigma d \lambda \left\{ (G+H) \cos^2 \alpha \cos^2(\theta + \alpha) - H \sin^2 \alpha \cos^2(\theta + \alpha) + (F+H) \sin^2 \alpha \sin^2(\theta + \alpha) - H \cos^2 \alpha \sin^2(\theta + \alpha) + - 2N \sin \alpha \cos \alpha \sin(\theta + \alpha) \right\} = 0$$

We krijgen voor  $\theta$ :

$$(14) \quad a \operatorname{tg}^2 \theta + 2b \operatorname{tg} \theta - c = 0$$

waarin

$$\begin{aligned} a &= H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \\ b &= \left\{ (N - F - 2H) \sin^2 \alpha - (N - G - 2H) \cos^2 \alpha \right\} \sin \alpha \cos \alpha \\ c &= a + F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha. \end{aligned}$$

In het algemeen zal  $b \neq 0$  en zullen er twee waarden voor  $\theta$  verkregen worden:  $\theta_t$  en  $\theta_m$  zoals in de figuren 2 en 3 weergegeven is.

Zoals onder IV A reeds uiteengezet is, geldt ook hier vergelijking (6).

In hoofdstuk III A 3 is beschreven dat de strain ratio  $r$  experimenteel bepaald kan worden, omdat bij kleine plastische deformatie geldt  $\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz} = 0$ .

De strain ratio  $r$  wordt weergegeven door

$$r = \frac{d \epsilon_{y'' y''}}{d \epsilon_{z'' z''}} \quad \text{waarbij } X'' \text{ de trekrichting}$$

is.

Met behulp van (10), (11), en (12) krijgen we voor  $r$

$$(15) \quad r = \frac{H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha}{F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha}$$

Tenslotte kan ook een vloeivoorwaarde verkregen worden uit (7) en (11)

$$(16) \quad \sigma_v = \left\{ F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha \right\}^{-1/2}.$$



## V Discussie

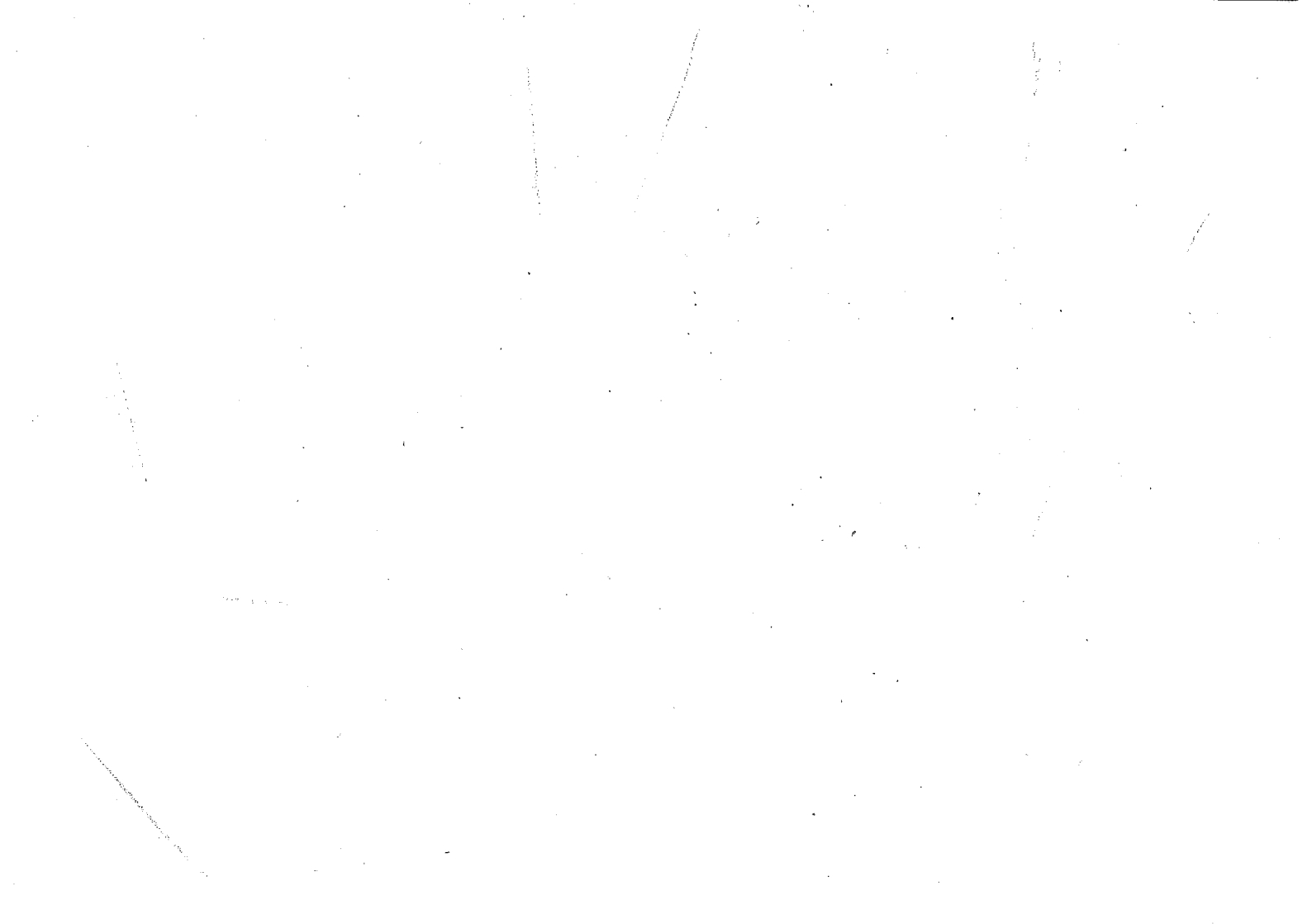
In dit hoofdstuk zal nagegaan worden in hoever de theorie in overeenstemming is met de experimentele resultaten.

A. Met behulp van de deformatie theorie kan nagegaan worden of de gemeten waarden voor  $\theta$  volgen uit de gemeten waarden van de deformaties. Hiervoor is echter nodig dat behalve de relatieve rekken ook de afschuivingen bepaald worden. Deze grootheden kunnen echter alleen bepaald worden bij homogene plastische deformatie voordat inhomogene deformatie optreedt. Om iets over deformatie banden te kunnen zeggen is nodig dat de strain ratio  $r$  onafhankelijk is van de deformatie graad. Uit metingen van van Dijk is gebleken dat de strain ratio  $r$  bij homogene deformatie (rek kleiner dan 0,7%) onafhankelijk is van de plastische rek. Bij de theoretische beschouwing wordt echter aangenomen dat het ook waar is voor veel grotere deformatiegraden.

Daar bij vroegere metingen de afschuiving niet gemeten is kan niet nagegaan worden of het theoretische verband, weergegeven door vergelijking (4), in overeenstemming is met de experimentele resultaten.

Ook bestaat er een verband tussen  $\beta_t$  en  $\theta_m$  of tussen  $\beta_m$  en  $\theta_t$  zoals vergelijking (6) weergeeft.

Opgemerkt moet worden dat de afwijking in één enkele bepaling van  $\theta$  ongeveer  $2^\circ$  kan bedragen van de in fig. 2 weergegeven waarden. Als de deformatiebanden goed scherp te onderscheiden zijn dan kan  $\theta$  met een nauwkeurigheid van  $0,5^\circ$  bepaald worden. Het kan echter voorkomen dat een band uit twee delen bestaat



die verschillende hoeken  $\theta$  maken. De afwijkingen worden voornamelijk veroorzaakt door.

1. De inklemming (foto 7)

2. Het feit dat de band begint aan beide randen van het folie.

Het gevolg is dat vele banden uit twee delen bestaan waartussen een overgangsgebied ligt.

3. Verontreinigingen en inhomogeniteiten.

Er kunnen dan vele banden ontstaan (foto 8 en 9)

De bepaling van  $\beta$  wordt in nog sterkere mate beïnvloed door de kwaliteit van de band. Vaak zijn de banden niet homogeen.

Hieronder wordt verstaan het feit dat de deformatie in de lengte richting van de band niet overal dezelfde is.

Als de band uit twee delen bestaat dan zal het overgangsgebied een moeilijk te meten deformatie ondergaan hebben en ook is het moeilijk te bepalen hoe breed de deformatie band in dit gebied genomen moet worden.

De deformatie in de lengterichting van de band verandert continu.

Bij de bepaling van  $\beta$  hebben we met de volgende nadelige invloeden rekening te houden.

1. De afleesfout

2. De instelfout

3. Het is moeilijk te bepalen hoe breed een deformatie band is

De foto's 4,5 en 6 laten zien dat de overgangen van het sterk gedeformeerde gebied in het midden van de band naar de zwak gedeformeerde gebieden aan de randen van de band continu zijn, en niet discontinu zoals we theoretisch zouden willen.

De waarden van  $\Delta b$  en  $\Delta l$  kunnen dus sterk afhankelijk zijn van de bandbreedte die genomen wordt.

4. Niet homogene deformatie in de lengterichting van de band. Uitwerking van de meetresultaten leidt tot de conclusie dat de fout in de waarden van  $\beta$  ongeveer  $1,5^\circ$  bedraagt. In tabel 1 zijn de resultaten vermeld van de metingen van  $\beta$  met de bijbehorende  $\theta$ .

Uit de resultaten mag gezien de onnauwkeurigheid in de bepaling van  $\beta$  en  $\theta$  niet geconcludeerd worden dat de deformatie theorie klopt. Wel kan gezegd worden dat de experimentele resultaten redelijk kloppen met vergelijking (6). De afwijking bedraagt max.  $4,5^\circ$ .

B. Nu zal nagegaan worden in hoeverre de spannings theorie overeenstemt met de experimentele resultaten.

Met behulp van de uitgevoerde experimenten en de daarbij verkregen resultaten is het mogelijk de constanten F, G, H en N op drie verschillende wijzen te bepalen.

1. Met behulp van formule (16) en de meetresultaten uit fig. 1.

$$(16) \sigma_v = [F \sin^2 \alpha + G \cos^2 \alpha + H + (2N - F - G - 4H) \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha]^{-1/2}$$

We moeten ons echter eerst het volgende afvragen:

- a. Mag voor  $\sigma_v$  de kromme  $L_{\max}$  genomen worden? Hill spreekt van vloeispanning. Dit mag alleen als de vloeispanning hetzelfde verloop als functie van  $\alpha$  vertoont.
- b. Mogen we aannemen dat de materiaalconstanten F, G, H, L, M en N onafhankelijk zijn van  $\alpha$ ?

Als we aannemen dat de kromme van  $L_{\max}$  als functie van  $\alpha$  in vergelijking (16) gebruikt mag worden dan is eenvoudig in te zien dat  $F=G$  daar de waarden van  $L_{\max}$  voor  $\alpha = 0^\circ$  en  $\alpha = 90^\circ$  slechts zeer weinig verschillen.

Maar als  $F = G$  dan is met formule (14) in te zien dat  $\theta$  bij  $\alpha = 0^\circ$  gelijk is aan  $\theta$  bij  $\alpha = 90^\circ$ , terwijl het verschil experimenteel ongeveer  $7^\circ$  bedraagt. De conclusie is dus dat bovenstaande vragen niet positief beantwoord kunnen worden. Opgemerkt moet worden dat de spanning, waarbij voor het eerst plastische deformatie op begint te treden experimenteel veel moeilijker te bepalen is.

2. De constanten kunnen ook berekend worden met behulp van de metingen waaruit de strain ratio  $r$  bepaald is als functie van  $\alpha$ . Het nadeel van de metingen is dat de waarden van  $r$  slechts voor vijf waarden van  $\alpha$  bepaald zijn. Het is mogelijk dat daardoor verschillende belangrijke details verloren zijn gegaan zoals bij een vroegere meting van  $L_{\max}$  als functie van  $\alpha$  is gebeurd.

Uit de in fig. 4 vermelde krommen kunnen  $F$ ,  $G$  en  $N$  als functie van  $H$  berekend worden. De resultaten staan vermeld in tabel 2.

3. De constanten kunnen ook nog berekend worden met behulp van de gemeten hoeken  $\theta$ . Bij de berekening blijkt echter dat de constanten niet aangepast kunnen worden aan de kromme uit fig. 3.

In tabel 2 staan de resultaten van de berekeningen van de constanten. De berekeningen zijn gedaan met behulp van gegevens uit fig. 4, fig. 3 en de kromme voor  $L_{\max}$  zoals die gemeten is door van Meel.

De constanten die verkregen zijn met behulp van de kromme voor  $r$  uit fig. 4 en formule (15) zijn gebruikt om de kromme voor  $\theta$  als functie van  $\alpha$  te berekenen. Het resultaat is weergegeven in fig. 3.

Twee afwijkingen vallen op.

1. Het snijpunt van  $\theta_m$  en  $\theta_t$  ligt experimenteel bij een waarde  $\lambda_e > 45^\circ$  en theoretisch bij een waarde  $\lambda_t < 45^\circ$ . Dit verschil in  $\lambda$  geeft een te groot verschil in de grootte van de constanten om  $\alpha_t$  samen te laten vallen met  $\alpha_e$ .
2. Het verschil tussen  $\theta_t$  en  $\theta_m$  bedraagt experimenteel minder dan  $7^\circ$  en in de theoretische kromme soms wel  $11^\circ$ . De oorzaak is gelegen in een te grote waarde voor de coëfficiënt  $b$  uit vergelijking (14).

Samenvattend kan gezegd worden dat

- 1°. Het verband tussen de grootheden die alleen met behulp van deformatie theorieën vergeleken worden is beter dan in het geval waarbij ook de spanning in de theorie betrokken wordt.
- 2°. De theorie die tevens de spanning beschouwt, mag niet als fout aangeduid worden, omdat in de eerste plaats de betekenis van  $\sigma_v$  en van de vloeiregels uit formule (9) aan een nader onderzoek onderworpen moeten worden.

VI Suggesties over nog uit te voeren experimenten.

1. Het verkrijgen van één of enkele deformatie banden in een homogeen folie blijkt in het bijzonder bij koper niet veel moeilijkheden op te leveren. Wel is het moeilijk om één rechte band te krijgen. Het verdient wellicht aanbeveling smallere folies te gebruiken, bij voorbeeld met breedte van 5 mm.
2. Gezien de kwalitatief goede overeenstemming tussen de experimentele resultaten en formule (6) verdient het aanbeveling het onderzoek in de richting van de beschouwing van deformaties voort te zetten. Dit kan gedaan worden door een meting waarbij behalve de rel. rekken ook de afschuivingen gemeten worden, maar dan voor vele waarden van  $\alpha$ .
3. Zoals uit de foto's (4, 5 en 6) blijkt treden in de deformatie banden vele gebiedjes op die sterk gedeformeerd zijn en andere die haast niet gedeformeerd zijn. De richting van de sterk gedeformeerde gebiedjes blijkt afhankelijk te zijn van de walsrichting. Voor deze experimenten is het noodzakelijk dat het folie vooraf gepolijst wordt met fijne diamantpasta, omdat het anders onmogelijk is de glijlijntjes in de sterk gedeformeerde gebiedjes waar te nemen.

Bijlage

VII Het opbrengen van rasters

De hieronder beschreven methode behandelt de wijze waarop een duidelijk waarneembare verbetering in de kwaliteit van het raster, op metaal folies aangebracht, bereikt wordt.

De handelingen die verricht moeten worden zijn de volgende en gelden bij het gebruik van Klimsch Clichosol Kopierlösung geleverd door de firma de Atlas Delft.

1. Het verdient aanbeveling het metaaloppervlak vooraf te polijsten, anders is de opgebrachte film niet gelijkmatig verdeeld.
2. Het oppervlak moet vooraf goed vetvrij gemaakt worden. Als hier niet voldoende aandacht aan besteed wordt laat de film bij het ontwikkelen los.
3. Er wordt een dunne film clichosol op het metaaloppervlak aangebracht. Eerst wordt het oppervlak met water bevochtigd. Daarna brengt men met een in de clichosol gedompelde wat een dunne film op het materiaal aan. De dikte van de film is erg kritisch.
4. Het van een dunne clichosol film voorziene folie wordt gedroogd en daarna in een houder met raster geplaatst. De gevoelige kant van het raster rust op de film. Zeer belangrijk is dat het folie zeer goed gedroogd wordt anders plakt het folie vast aan het raster en worden beide beschadigd waardoor het raster onbruikbaar wordt.



5. Het van een clichosol film voorziene folie wordt gedurende anderhalve minuut belicht met een sterke bundel ultra violet licht van een hogedruk kwik lamp.
6. Het belichte folie wordt ongeveer 20 sec. in een bad met water gedompeld van 30-40°C. De beweging van het water mag slechts zeer zwak zijn anders ontstaat een gekartelde rand die bij een vergroting van 400 maal storend is.
7. Het raster wordt gedurende 10 sec. gekleurd in een inktbad.
8. Het gekleurde folie wordt in stilstaand water afgespoeld.  
Geen waterstraal of douche gebruiken.
9. Het afgespoelde folie wordt weer gedroogd.

Opmerking. Het opbrengen van de film met behulp van een in de clichosol gedoopte wat is niet erg reproduceerbaar. Een betere methode is om het folie aan alle zijden zeer goed vetvrij te maken en dan in een clichosol bad te dompelen. De clichosol moet met gedistilleerd water verdund worden. Hoe sterk de clichosol verdund moet worden hangt af van het metaaloppervlak en zal dus voor elk metaal experimenteel bepaald moeten worden. Na het dompelen laat men het folie afdruipe en droogt het.

De kwaliteit van het raster is goed als de randen bij een vergroting van 400 maal nog scherp zijn.

De foto <sup>10</sup> toont een beeld van een raster dat 1000 maal vergroot is.

VIII Literatuur

1. Wassermann G. - Texturen Metallischer Werkstoffe,  
Berlin 1939.
2. Klostermann F.Th. - Afstudeerverslag juni 1962
3. Meel F.A.M.M. van - Afstudeerverslag oktober 1962
4. Dijk P.M. van - Candidaatsverslag januari 1962.
5. Zener - Elasticity and Anelasticity of metals,  
The University of Chicago Press.
6. Hill R. - The mathematical theory of plasticity,  
Oxford.

Algemene literatuur.

7. Nadai, A. - Theory of flow and fracture of solids,  
Mc Graw-Hill, New York.
8. Radelaar S. - Candidaatsverslag oktober 1962
9. Körber F. und Hoff F. - Über die Festigkeitseigenschaften und  
den Reiwinkel kaltgewalzter Metalle,  
Mitt. K.W. Inst. Eisenforsch. 10(1928)  
175-187.
10. Lomer W.M. - The Yield Phenomenon in polycrystalline  
mild steel,  
Journ. of the mech. and physics of  
solids 1 (1952) 64-73.

## Summary

There have been made some mechanical experiments on cold rolled copper foils. Some plastic mechanical properties were tested: The maximum load  $L_{\max}$ , the angle  $\theta$  of the deformation band and the tensile direction, the angle  $\beta$  of the displacement vector caused by one deformation band and the tensile direction, the strain ratio  $r = \frac{d \epsilon_b}{d \epsilon_d}$ .

All the properties were measured as a function of the angle  $\alpha$  between the rolling direction and the tensile direction.

It has been verified if there was agreement between the experimental results and the theory. The deformation theory gives qualitatively a good agreement between the experimental results of  $\beta$  and  $\theta$ . This theory also gives a reasonable quantitative agreement for the same properties.

Hill's theory of anisotropic materials gives a bad quantitative agreement between theory and experiment. Only a qualitative agreement between the measurements of  $r$  and  $\theta$  have been obtained.

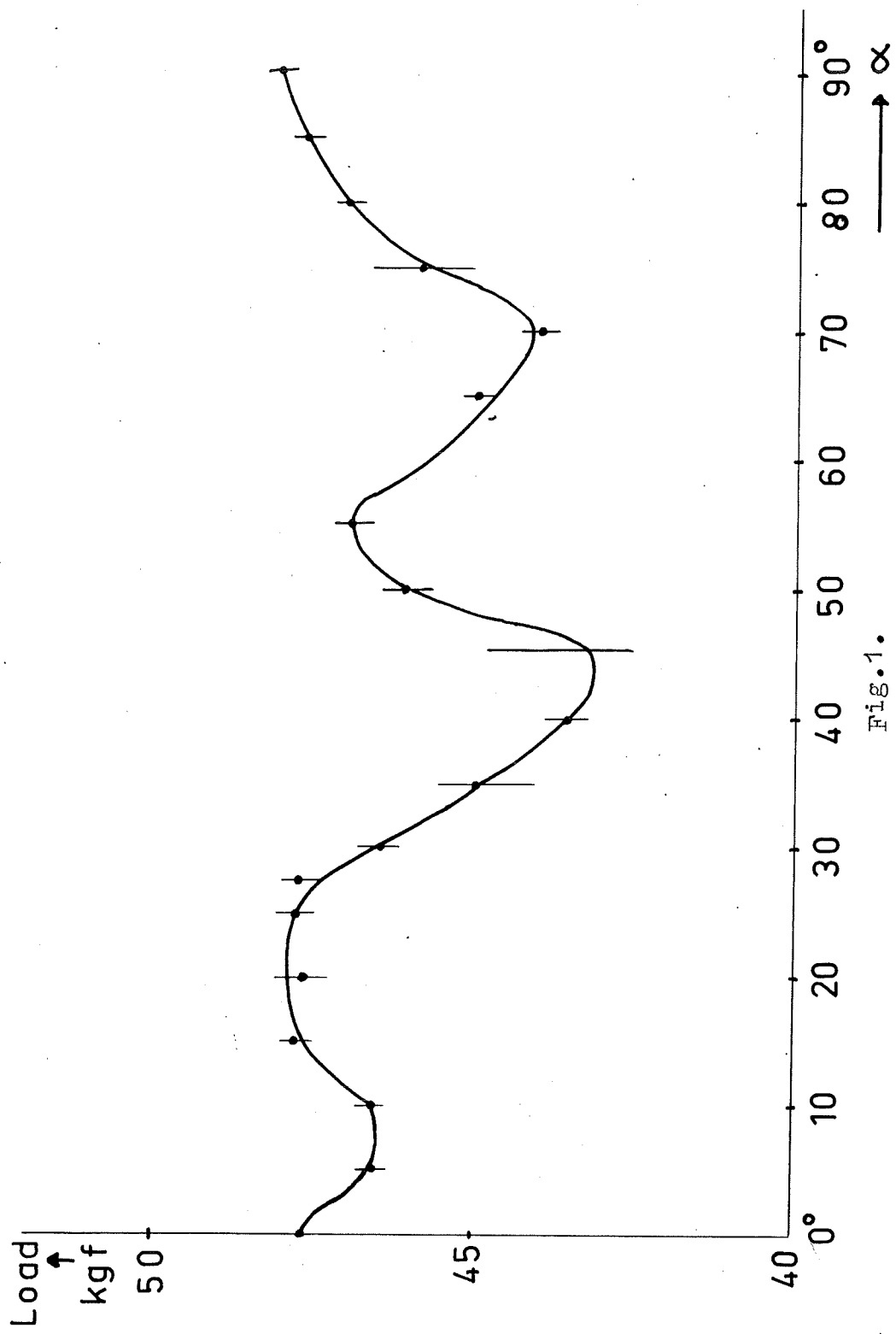
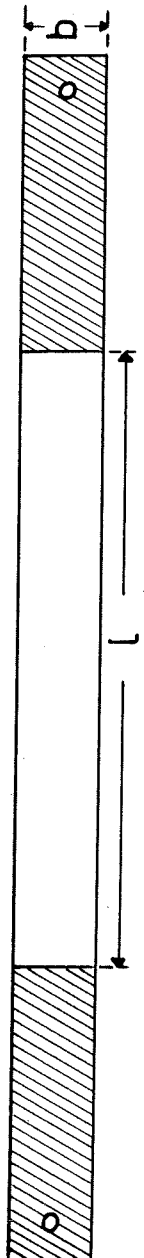


FIG. 1.

$\theta_1 + \beta_{\text{min}} = 90^\circ$   
 $64 + \beta_{\text{min}} \rightarrow \beta_{\text{min}} = 26^\circ$

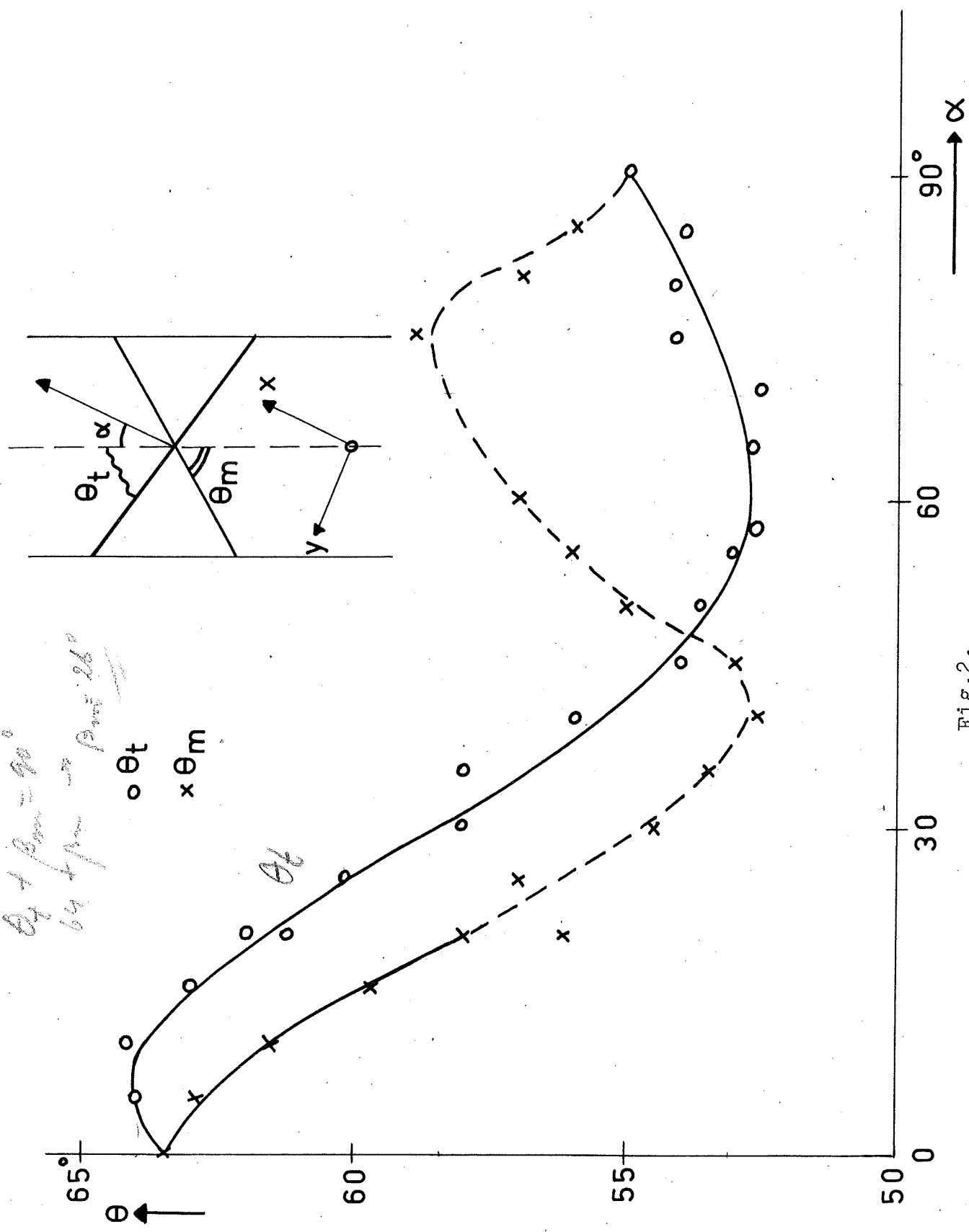


Fig.2.

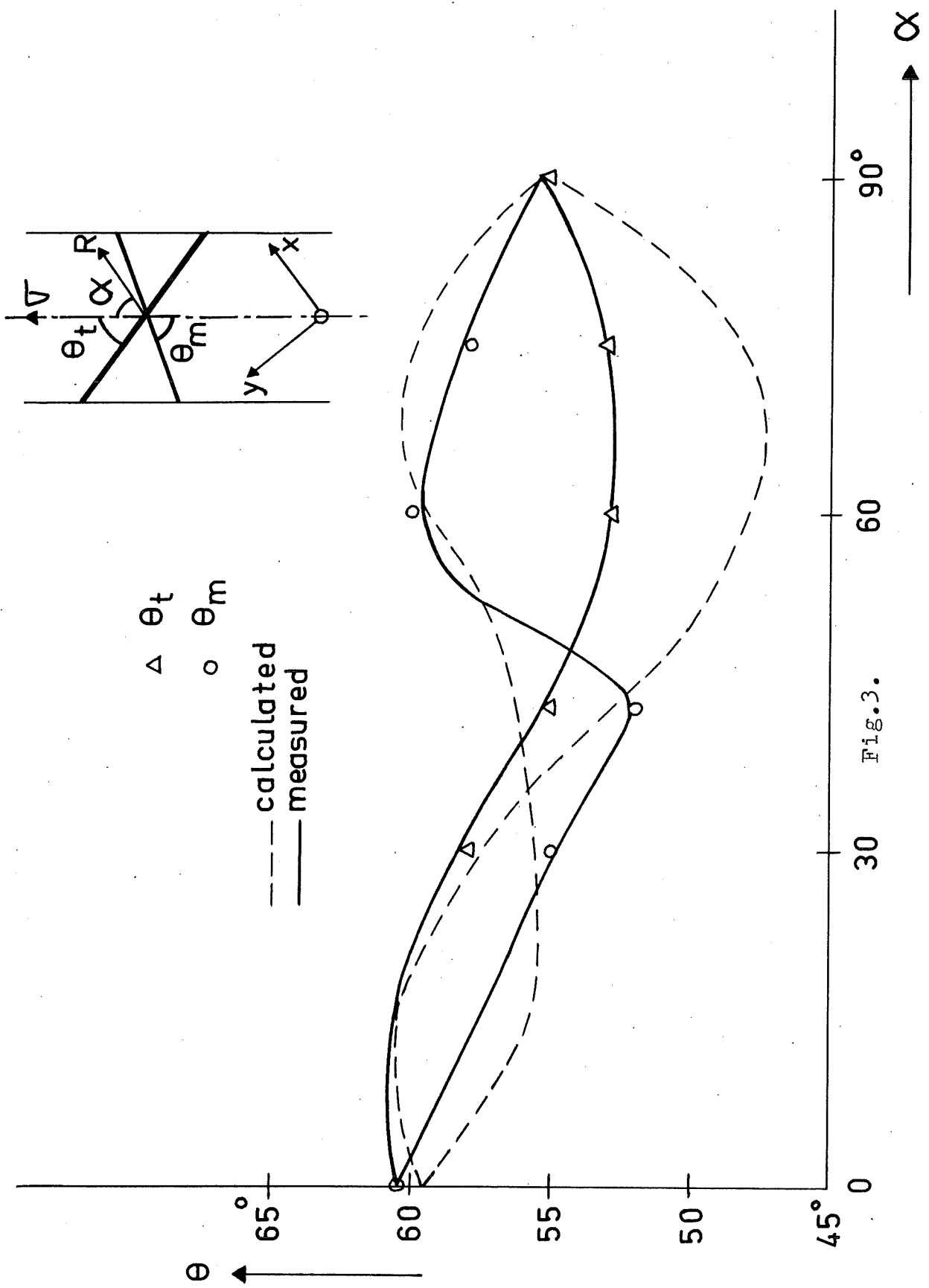


Fig. 3.

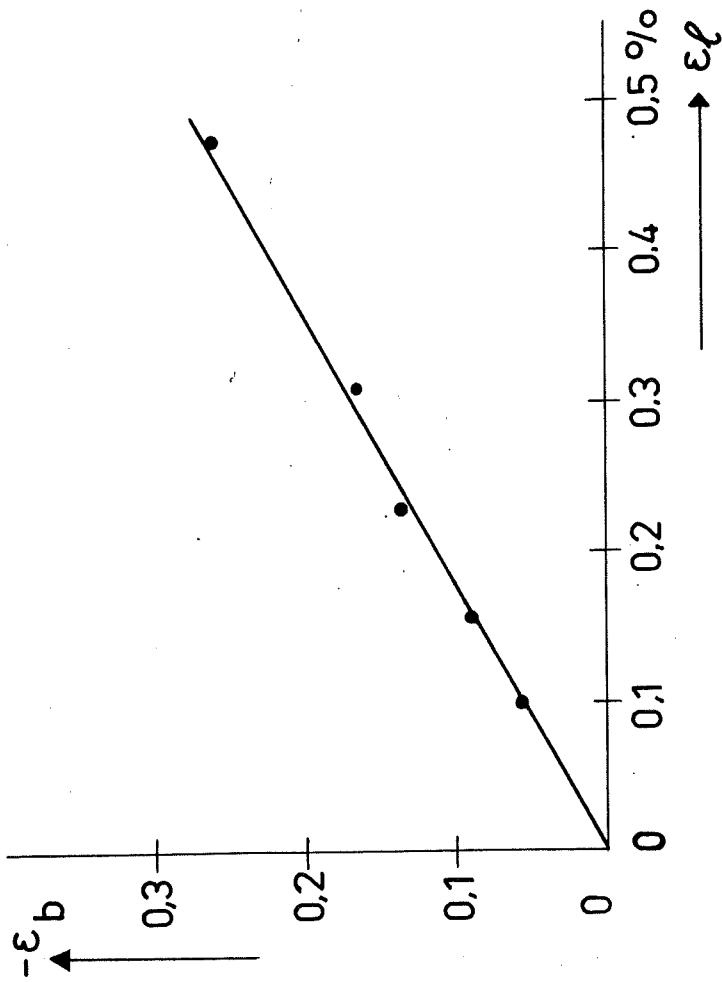
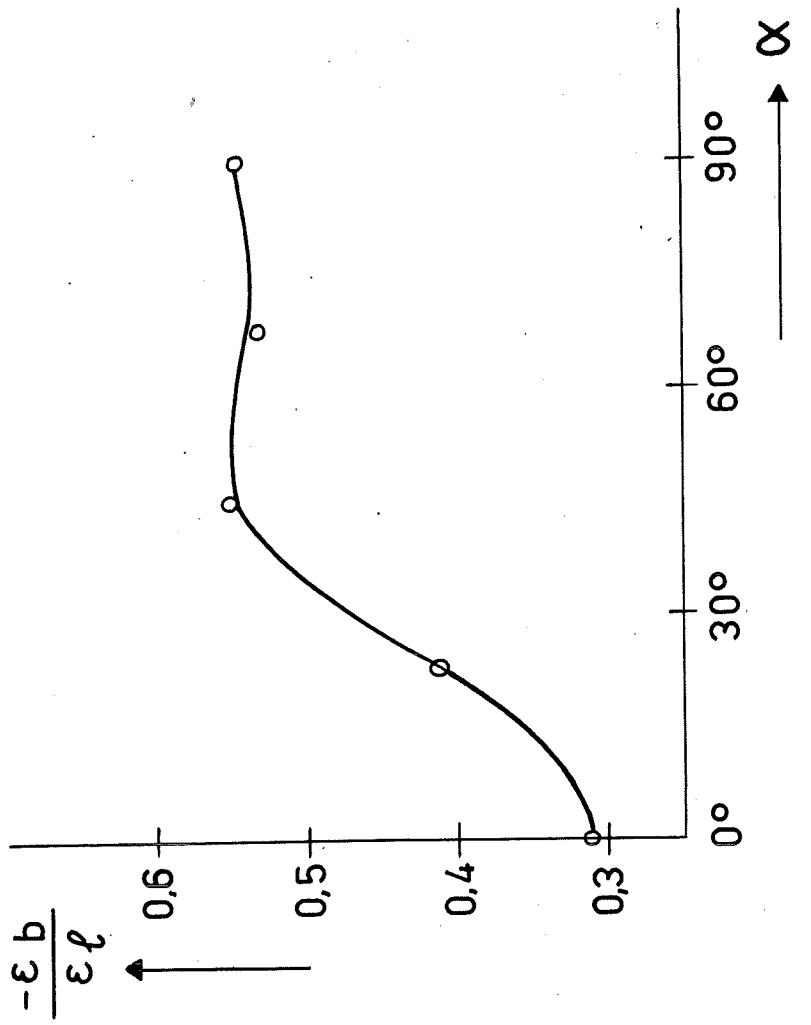


Fig. 4.

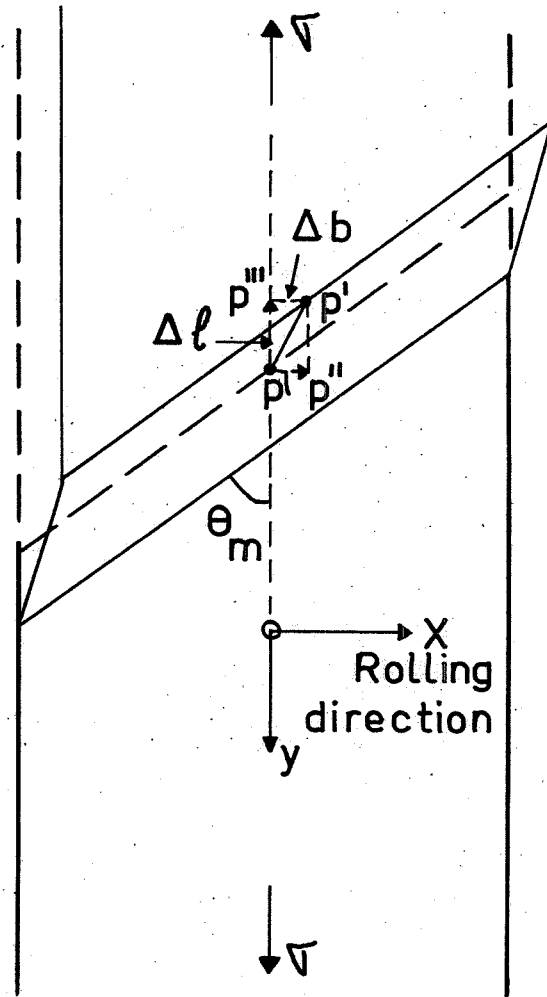


Fig.5.



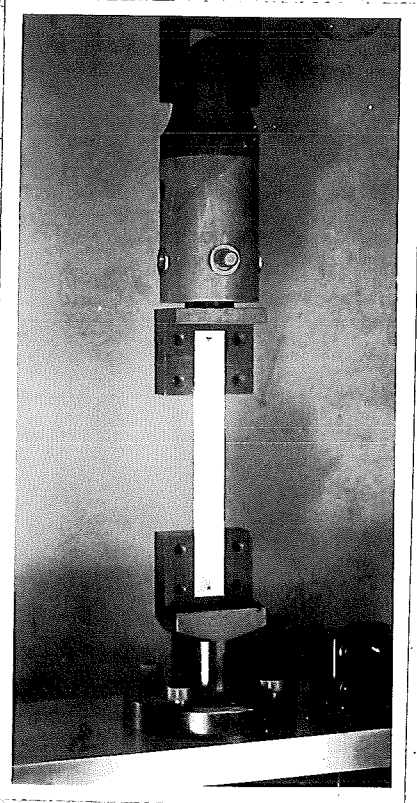
De tekst bij de foto's



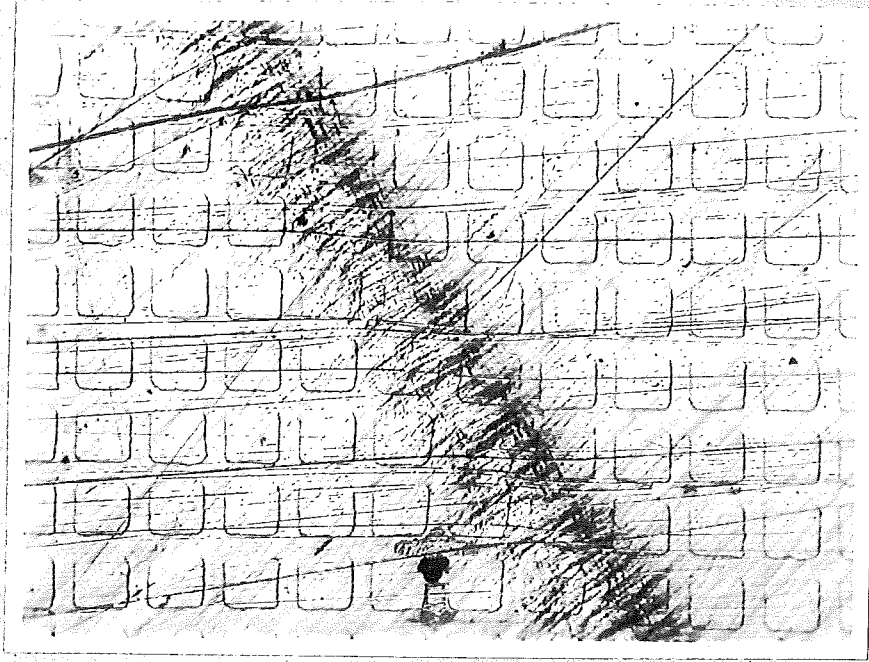
No.1. structuur van koudgewalst  
koper. vergroting 600 x



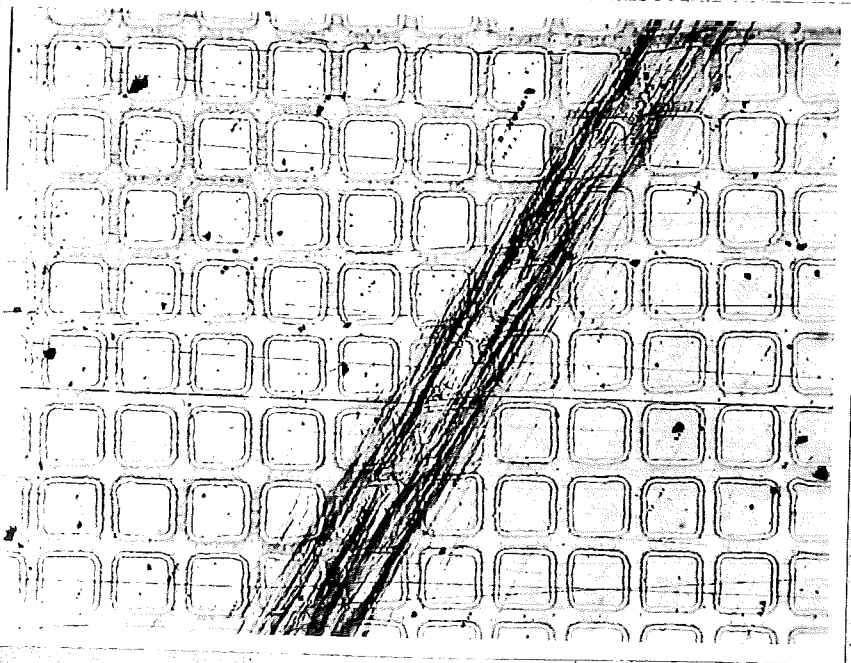
No.2. structuur van zacht koper.  
600-x



No.3. Aanbrenging van  
het folie in de trekbank

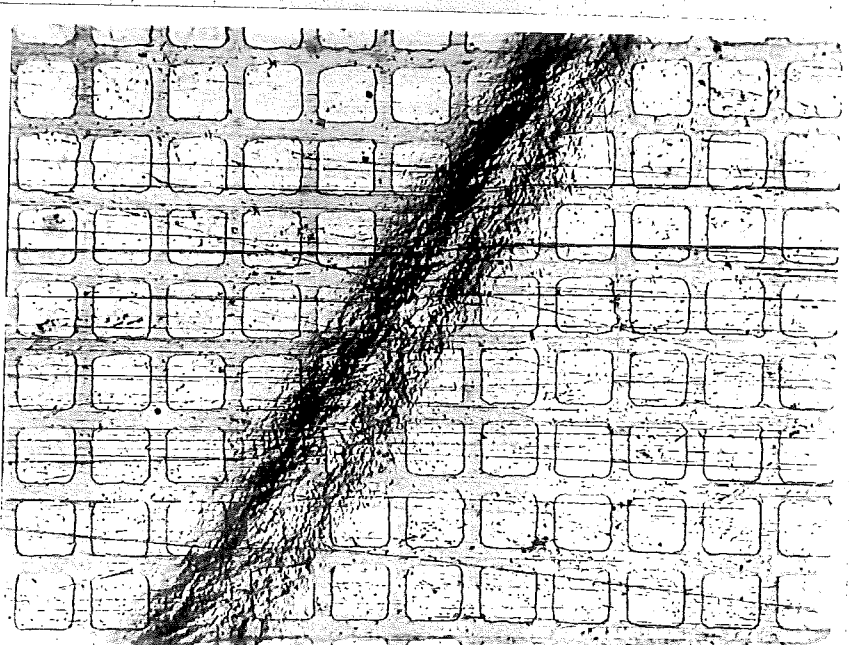


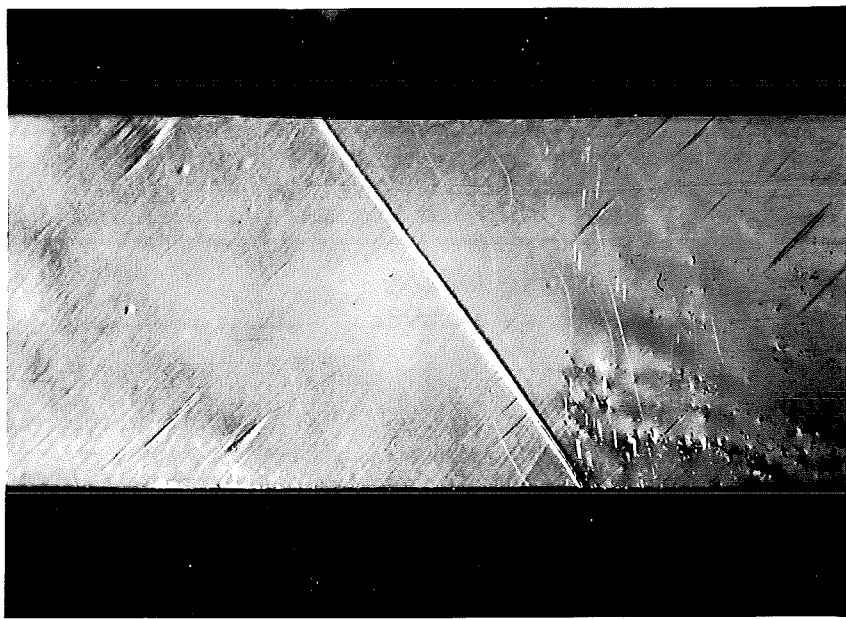
No.4. Gedeelte  
van een deformatie  
band, vergroting  
100 x



no.5. Gedeelte van een defor  
matieband, vergroting 100 x

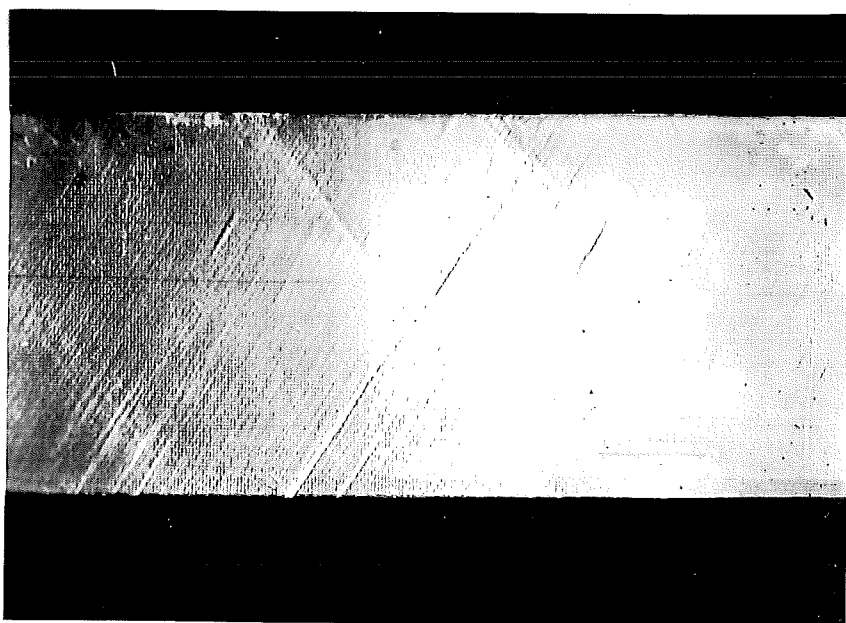
No.6. Gedeelte van  
een deformatieband,  
vergroting 100x



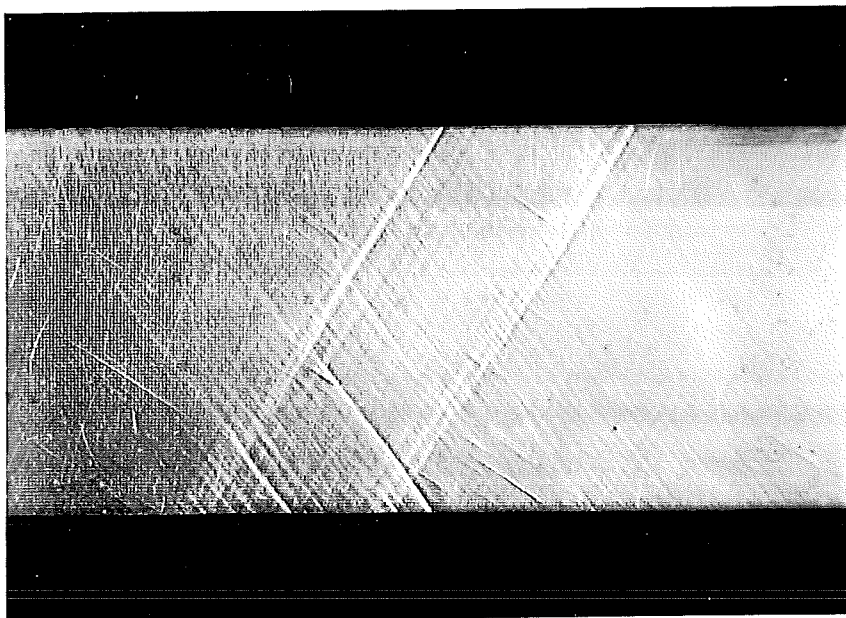


No.7. Deformatieband,  
vergroting 4,5 x

No.8. Netwerk van  
deformatiebanden,  
vergroting 4,5 x



No.9. Netwerk van  
deformatiebanden,  
vergroting 100 x.



No.10. Ongedeformeerd raster ,  
vergroting 100 x

