

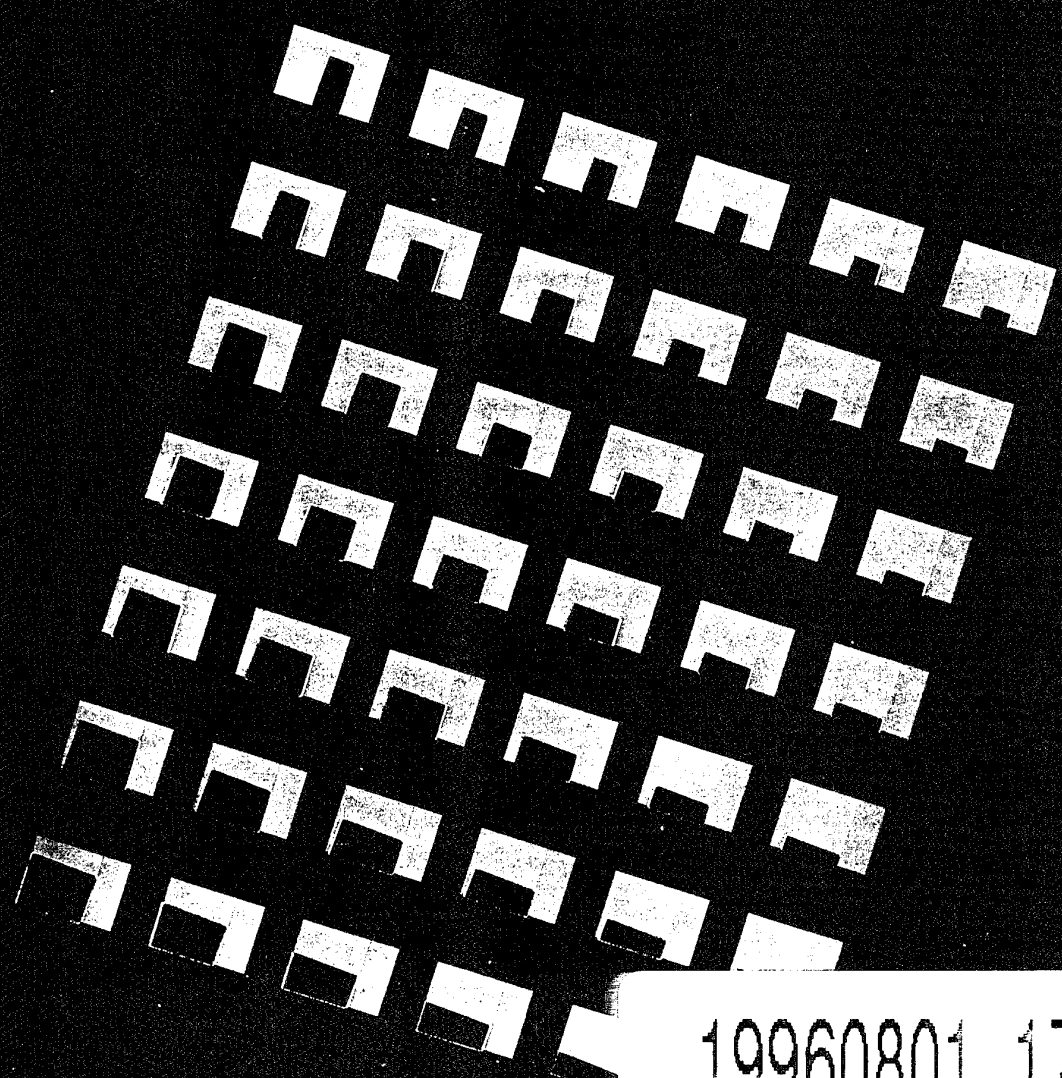
TNO-rapport  
MI-96-0353/KON/SCI

BREUKWEERSTAND VAN GELAST  
ALUMINIUM AlMg4.5Mn  
VOOR TOEPASSING IN  
OPPERVLAKTESCHEPEN

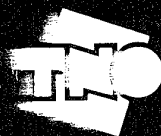
TNO Metaalinstituut

DISTRIBUTION SYSTEM

Approved for public release  
Distribution unlimited



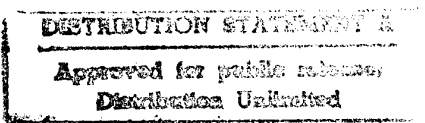
19960801 171



**TNO-rapport**  
MI-96-0353/KON/SCI

**BREUKWEERSTAND VAN GELAST  
ALUMINIUM AlMg4,5Mn  
VOOR TOEPASSING IN  
OPPERVLAKTESCHEPEN**

TNO Metaalinstituut



Laan van Westenenk 501  
Postbus 541  
7300 AM Apeldoorn

Datum  
4 december 1995

Revisie  
22 mei 1996

Telefoon 055 - 549 3 493  
Fax 055 - 541 9 837

Auteur(s)  
C. Koning

Opdrachtgever

TNO Defensieonderzoek  
Marketing en Programma  
Postbus 6006  
2600 JA DELFT

Alle rechten voorbehouden.  
Niets uit deze uitgave mag worden  
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt  
door middel van druk, fotokopie, microfilm  
of op welke andere wijze dan ook, zonder  
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd  
uitgebracht, wordt voor de rechten en  
verplichtingen van opdrachtgever en  
opdrachtnemer verwezen naar de  
'Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-  
opdrachten aan TNO', dan wel de  
betreffende terzake tussen partijen  
gesloten overeenkomst.  
Het ter inzage geven van het TNO-rapport  
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© TNO

Rubricering	ongerubriceerd
Vastgesteld door	C. van Sevenhoven - DMKM
Vastgesteld d.d.	21 mei 1996
Opdrachtnummer	011571046
Uw referentienummer	A93/KM/138; DO-13358
Oplaat	11
Aantal bladzijden	52 (inclusief bijlagen, exclusief RPD en distributielijst)
Aantal bijlagen	4



**MANAGEMENT UITTREKSEL**

Titel : BREUKWEERSTAND VAN GELAST ALUMINIUM AlMg4,5Mn  
VOOR TOEPASSING IN OPPERVLAKTESCHEPEN

Auteur(s) : C. Koning - TNO Metaalinstituut

Datum : 04-12-1995

Revisie : 22-05-1996

Opdrachtnr. : A93/KM/138; DO-13358

IWP-nr. : 793

Rapportnr. : MI-95-0353/KON/SCI

---

De Koninklijke Marine (KM) bouwt haar oppervlakteschepen al sinds WO-2 in Fe E 355 (staal met een gespecificeerde vloeigrens van  $\geq 355$  MPa). Voor de toekomst zal het KM-onderzoek uitgaan naar nieuwe technologieën voor toepassing bij de bouw van geavanceerde vaartuigen. Voor deze vaartuigen is het constructiegewicht een kritische ontwerpfactor. Dit houdt in dat moet worden overgegaan naar lichtere constructies. Deze kunnen worden gerealiseerd door:

- toelaten van hogere spanningen in (gemodificeerde) constructiedetails bij toepassing van de huidige materialen;
- toepassen van andere materialen: hoge-reksgrensstaal, aluminium, composieten;
- nieuw ontwerp van constructiedetails in relatie tot de materiaalkeuze.

De belangrijkste te stellen eis aan een constructiemateriaal uit het oogpunt van veiligheid is het vermijden van brosse breuk. Het risico van brosse breuk wordt beïnvloed door de omgevingstemperatuur, reknelheid, taatheid van het materiaal, dikte van het constructiedeel, niveau van de spanning, verwerkingsproces en de aanwezigheid van defecten. Vooral door de combinatie van lagere temperatuur en hoge reknelheid bij explosieve belastingscondities kunnen initiatie en uitbreiding van brosse breuk optreden in constructiemateriaal met plaatdikten van  $6 \div 15$  mm. Deze plaatdikten worden gebruikt bij de bouw van oppervlakteschepen. Lasverbindingen in scheepsconstructies bevatten lasfouten. Als gevolg van vermoeiing zullen deze defecten in grootte toenemen tot meetbare scheuren. Om het risico van instabiele breuk van de vermoeiingsscheuren te voorkomen, zal het materiaal voldoende breukweerstand tegen scheurinitiatie onder dynamische condities moeten bezitten.

De algemene doelstelling van onderwerp A93/KM/138 is het vergroten van het inzicht omtrent de factoren die bepalend zijn voor de breukveiligheid van gelaste verbindingen in oppervlakteschepen onder extreem voorkomende bedrijfsomstandigheden en het opstellen van criteria waaraan het materiaal, het materiaalgedrag en de verwerkings-

techniek moeten voldoen om te komen tot een bedrijfszekere constructie onder voor de KM relevante omstandigheden.

In 1995 is een additioneel, oriënterend onderzoek "Breukweerstand van gelast aluminium AlMg4,5Mn voor toepassing in oppervlakteschepen" uitgevoerd. De breukweerstand is bepaald door middel van quasistatische en dynamische CTOD- (*crack tip opening displacement*) proeven op proefstaven van een gelaste 5083-aluminium plaat met een plaatdikte van 10 mm.

De resultaten van kerfslagproeven bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  van de lasverbinding tonen aan dat de laagste kerftaaiheid wordt gemeten voor de kerfslagstaven met de kerf op de smeltlijn.

De resultaten van quasistatische CTOD-proeven bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  op B x 2B driepuntsbuigstaven met door de dikte kerven op de smeltlijn, verhouding kerflengte/ hoogte  $a/W \approx 0,5$ , geven een laagste CTOD van 0,06 mm. Uit de resultaten volgt dat de lasverbinding een lage breuktaaiheid bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  kan bezitten.

De resultaten van de dynamische CTOD-proeven bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  op B x 5B driepuntsbuigstaven met door de dikte kerven op de smeltlijn, verhouding kerflengte/ hoogte  $a/W \approx 0,3$ , zijn als volgt:

De laagste gemeten CTOD-waarde bedraagt 0,13 mm, de gemiddelde  $K (J_2)$  is  $52\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , met als laagste waarde  $50\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ . Het resultaat van de dynamische CTOD toont aan dat de breuktaaiheid van de onderzochte lasverbinding in AlMg4,5Mn niet gevoelig is voor snelle belastingscondities.

Aanbevolen wordt de structuur aan de kerftip van de vermoeiingsscheuren in de proefstaven door middel van microscopische doorsneden te bepalen.

## SAMENVATTING

De belangrijkste te stellen eis aan een constructiemateriaal uit het oogpunt van veiligheid is het vermijden van brosse breuk. Vooral door de combinatie van lagere temperatuur en hoge reksnelheid bij explosieve belastingscondities kunnen initiatie en uitbreiding van brosse breuk optreden in constructiemateriaal met plaatdikten van 10 ÷ 15 mm. Deze plaatdikten worden gebruikt bij de bouw van oppervlakteschepen voor de Kon. Marine. Lasverbindingen in scheepsconstructies bevatten lasfouten. Als gevolg van vermoeiing zullen deze defecten in grootte toenemen tot meetbare scheuren. Om het risico van instabiele breuk van de vermoeiingsscheuren te voorkomen, zal het materiaal voldoende breukweerstand tegen scheurinitiatie en -uitbreiding onder dynamische condities moeten bezitten.

In dit rapport van het onderzoek "Breukweerstand van gelast aluminium AlMg4,5Mn voor toepassing in oppervlakteschepen" is de breukweerstand bepaald door middel van quasistatische en dynamische CTOD- (*crack tip opening displacement*) proeven op proefstaven van een gelaste 5083-aluminium plaat met een plaatdikte van 10 mm.

<u>INHOUDSOPGAVE</u>	<u>Pagina</u>
MANAGEMENT UITTREKSEL	2
SAMENVATTING	4
1 INLEIDING	7
2 DOEL VAN HET ONDERZOEK	9
3 MATERIAAL EN PROEFSTUKKEN	10
3.1 Basismateriaal	10
3.2 Lasverbinding	10
3.3 Proefstukken	10
4 BEPROEVING EN RESULTATEN	11
4.1 Macro-doorsneden van lasverbinding	11
4.2 Quasistatische trekproeven	11
4.2.1 <i>Basismateriaal</i>	11
4.2.2 <i>Vol-lasmetaal van ER 5556 lassen, 1/2V-naad</i>	11
4.2.3 <i>Dwars-trekstaven over de las</i>	11
4.3 Kerfslagproeven	12
4.4 CTOD-proeven	12
4.4.1 <i>Quasistatische CTOD-proeven</i>	12
4.4.2 <i>Dynamische CTOD-proeven</i>	13
5 SAMENVATTING VAN RESULTATEN EN CONCLUSIES	18
6 AANBEVELING	19
REFERENTIES	20

Tabel 1 Resultaten quasistatische trekproeven van basismateriaal AlMg4,5Mn (5083-serie), vol-lasmetaal van ER 5556 (AlMg4,5Mn) lassen en van trekstaven, uitgenomen dwars op de las.

Tabel 2 Resultaten kerfslagproeven van de lasverbinding in AlMg4,5Mn.

Tabel 3 Resultaten dynamische CTOD-proeven.

Figuur 1 Macro-doorsneden van de lasverbinding in lasplaten A1 en B1.

**INHOUDSOPGAVE** -vervolg-

- Figuur 2** Resultaten van hardheidsmetingen van de lasverbinding in lasplaten A1 en B1.
- Figuur 3a** Schematische voorstelling van de uitvoering van valgewicht CTOD-proeven.
- Figuur 3b** Verdeling van de registratie van belasting versus kerfwanopeningsverplaatsing in elastische en plastische (gearceerd) energie.
- Figuur 4a** Registratie van de belasting (-R1, R2 en R3) en de kerfwanopeningsverplaatsing (*Clip*) als functie van de tijd ( $0 \div 1250 \mu\text{s}$ ), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  van proefstuk B1-25.
- Figuur 4b** Registratie van de belasting (-R1, R2 en R3) en de kerfwanopeningsverplaatsing (*Clip*) als functie van de tijd ( $0 \div 500 \mu\text{s}$ ), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  van proefstuk B1-25.
- Figuur 4c** Registratie van de gemiddelde belasting  $(-R1 + R2)/2$  als functie van de kerfwanopeningsverplaatsing (*Clip gauge*), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij  $-5^\circ\text{C}$  van proefstuk B1-25.

- BIJLAGE 1** Lasmethodebeschrijving en uitvoering lasstroken
- BIJLAGE 2** Plan van uitneming van de proefstukken en tekeningen van de proefstukken
- BIJLAGE 3** *Data sheets* en registraties van quasistatische CTOD-proeven
- BIJLAGE 4** *Data sheets* van dynamische CTOD-proeven

**REPORT DOCUMENTATION PAGE****DISTRIBUTIELIJST**

## 1 INLEIDING

De Koninklijke Marine (KM) bouwt haar oppervlakteschepen al sinds WO-2 in Fe E 355 (staal met een gespecificeerde vloeigrens van  $\geq 355$  MPa).

De belangrijkste te stellen eis aan een constructiemateriaal uit het oogpunt van veiligheid is het vermijden van brosse breuk. Het risico van brosse breuk wordt beïnvloed door de omgevingstemperatuur, reksnelheid, taaiheid van het materiaal, dikte van het constructiedeel, niveau van de spanning, verwerkingsproces en de aanwezigheid van defecten. Vooral door de combinatie van lagere temperatuur en hoge reksnelheid bij explosieve belastingscondities kunnen initiatie en uitbreiding van brosse breuk optreden in constructiemateriaal met plaatdikten van  $6 \div 15$  mm. Deze plaatdikten worden gebruikt bij de bouw van oppervlakteschepen.

Lasverbindingen in scheepsconstructies bevatten lasfouten. Als gevolg van vermoeiing zullen deze defecten in grootte toenemen tot meetbare scheuren. Om het risico van instabiele breuk van de vermoeiingsscheuren te voorkomen, zal het materiaal voldoende breukweerstand tegen scheurinitiatie onder dynamische condities moeten bezitten.

In het eerste [1] en tweede interim rapport [2] van het onderzoek "Breukweerstand van gelast constructiemateriaal Fe E 355 voor toepassing in oppervlakteschepen", zijn de basiseigenschappen en de breukweerstand bepaald van:

- de scheepsplaat van het thans gebruikte staaltype Fe E 355 E KN EU156 (Mod.) met een plaatdikte van 10 mm;
- het lasmetaal en de warmtebeïnvloede zone (WBZ) van een aantal lasverbindingen in de scheepsplaat met de toegepaste lastoevoegmaterialen en lasprocessen.

Voor de toekomst zal het KM-onderzoek uitgaan naar nieuwe technologieën voor toepassing bij de bouw van geavanceerde vaartuigen. Voor deze vaartuigen is het constructiegewicht een kritische ontwerpfactor. Dit houdt in dat moet worden overgegaan naar lichtere constructies. Deze kunnen worden gerealiseerd door:

- toelaten van hogere spanningen in (gemodificeerde) constructiedetails bij toepassing van de huidige materialen;
- toepassen van andere materialen: hoge-rek grensstaal, aluminium, composieten;
- nieuw ontwerp van constructiedetails in relatie tot de materiaalkeuze.

In 1995 is een additioneel, oriënterend onderzoek "Breukweerstand van gelast aluminium AlMg4,5Mn voor toepassing in oppervlakteschepen" uitgevoerd. De breukweerstand is bepaald door middel van dynamische CTOD- (*crack tip opening displacement*)

proeven op proefstaven van een gelaste 5083-aluminium plaat met een plaatdikte van 10 mm.

In het eerste interim rapport [1] zijn de probleemstelling, de bepalende factoren en het plan van aanpak beschreven.

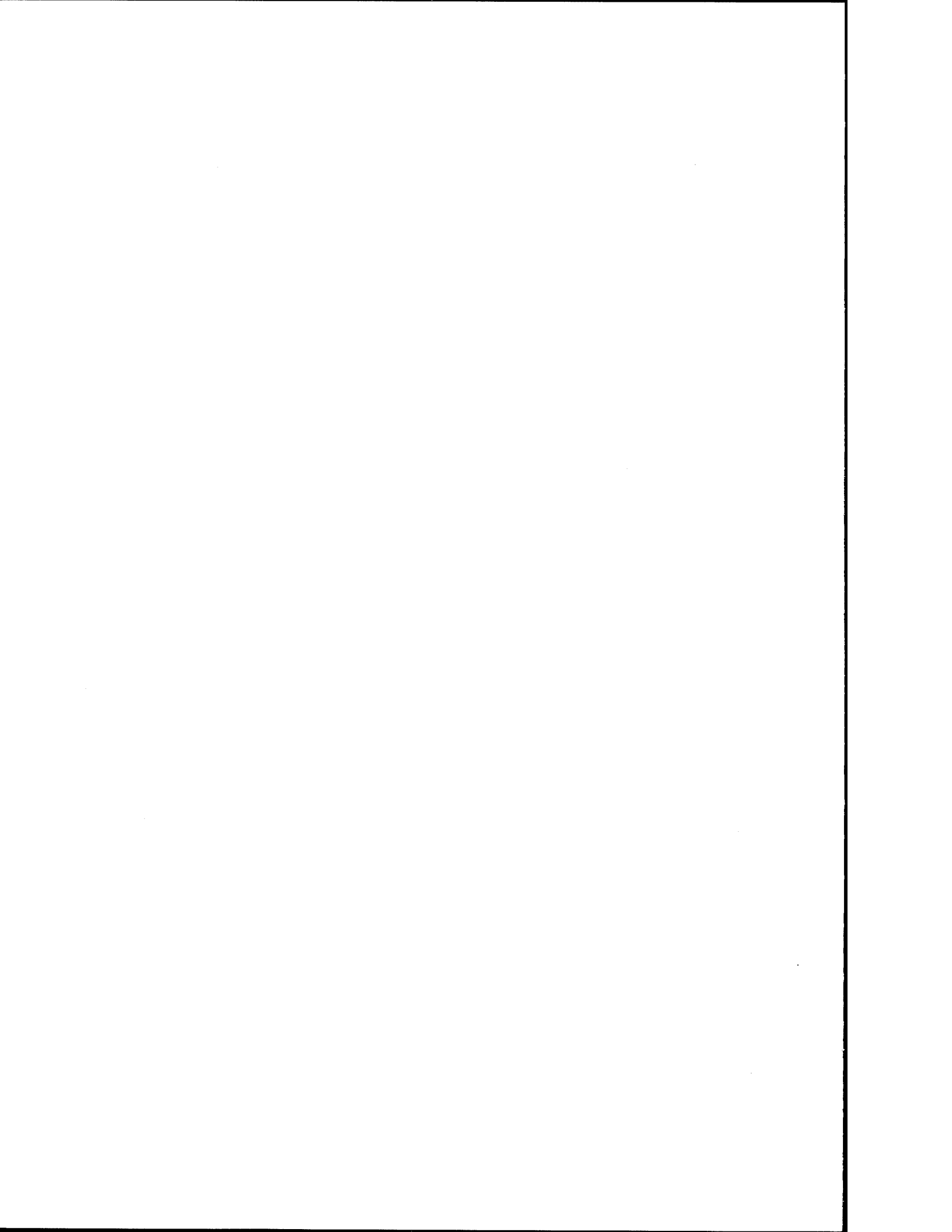
## 2 DOEL VAN HET ONDERZOEK

De algemene doelstelling van onderwerp A93/KM/138 luidt:

- 1) Het vergroten van het inzicht omtrent de factoren die bepalend zijn voor de breukveiligheid van gelaste verbindingen in oppervlakteschepen onder extreem voorkomende bedrijfsomstandigheden.
- 2) Het opstellen van criteria waaraan het materiaal, het materiaalgedrag en de verwerkingstechniek moeten voldoen om te komen tot een bedrijfszekere constructie onder voor de KM relevante omstandigheden.

De specifieke doelstelling van het huidige onderzoek is:

- vervaardigen van macro-doorsneden van de lasverbinding;
- bepaling van de mechanische eigenschappen bij kamertemperatuur door middel van quasistatische trekproeven op proefstaven van basismateriaal, vol-lasmetaal en proefstaven dwars op de lasverbinding;
- bepaling van de kerftaaiheid door middel van kerfslagproeven bij -5 °C op staven met de kerf in de las, de kerf op de smeltlijn, de kerf 2 mm van de smeltlijn en de kerf op 5 mm van de smeltlijn;
- bepaling van de breukweerstand door middel van quasistatische en dynamische CTOD-proeven bij -5 °C op proefstaven met de kerf op de lokatie waar de laagste kerfslagwaarde is gemeten.



### 3 MATERIAAL EN PROEFSTUKKEN

#### 3.1 Basismateriaal

Bij TNO Metaalinstituut was een plaatstuk voorradig van aluminium AlMg4,5Mn (5083-serie) met een plaatdikte van 10 mm.

NEN 6710 [3] vermeldt de volgende gegevens voor deze aluminiumlegering:

Si = 0,4; Fe = 0,4; Cu = 0,1; Mn = 0,4 - 1,0; Mg = 4,0 - 4,9;

Cr = 0,05 - 0,25; Zn = 0,25; Ti = 0,15; Al = rest

Vloei grens = 125 ÷ 140 MPa; treksterkte = 270 MPa; rek = 12 %

#### 3.2 Lasverbinding

Door TNO-MI zijn uit het aluminium plaatstuk vier lasplaten aangemaakt met afmetingen van ca. 475x395x10 mm. De richting van de lassen is loodrecht op de walsrichting. De lasstroken zijn opgespannen om de lasplaten zo recht mogelijk te houden.

De uitvoering van de lasnaad is een ½V-naad met een openingshoek van 50°. De platen zijn gelast door middel van MIG-lassen met het lastoevoegmateriaal ER 5556 (AlMg4,5Mn).

Bijlage 1 toont de uitvoering van de lasstroken en de lasmethodebeschrijving.

#### 3.3 Proefstukken

Voor het plan van uitneming van de proefstukken uit de gelaste plaatstroken en tekeningen van de proefstukken wordt verwezen naar Bijlage 2.

## 4 BEPROEVING EN RESULTATEN

### 4.1 Macro-doorsneden van lasverbinding

Macro-doorsneden van de lasverbinding in lasplaten A1 en B1 zijn opgenomen in Figuur 1.

In de lasmethodebeschrijving in Bijlage 1 wordt opgemerkt dat de grondlaag moeilijk was te lassen in verband met boogafwijkingen naar de rechte laskant. Uit Figuur 1 blijkt dat de rechte kant van de  $\frac{1}{2}V$ -naad niet recht is.

De resultaten van de hardheidsmetingen (HB1/5) worden getoond in Figuur 2.

De hardheid van de las in macro-doorsnede A1-2 is gemiddeld HB1/5 = 102. De hardheid van het materiaal naast de las in macro-doorsnede A1-2 is weinig verschillend, gemiddeld HB1/5 = 104.

De hardheid van de las in macro-doorsnede B1-19 is gemiddeld HB1/5 = 102, met een piekwaarde van HB1/5 = 120. De hardheid van het materiaal naast de las in macro-doorsnede B1-19 is gemiddeld HB1/5 = 102.

### 4.2 Quasistatische trekproeven

#### 4.2.1 Basismateriaal

De resultaten van quasistatische trekproeven bij kamertemperatuur van basismateriaal AlMg4,5Mn staan in Tabel 1. Deze proeven zijn uitgevoerd met dwars-trekstaven, dat is met de lengterichting loodrecht op de walsrichting. Zie Figuur 2-2 in Bijlage 2 voor de toegepaste trekstaven, type A. De gemiddelde resultaten bij kamertemperatuur zijn:

rekgrens  $R_e(0,2) = 240$  MPa, treksterkte  $R_m = 366$  MPa,  
breukrek A5 = 18%, insnoering Z = 36%.

#### 4.2.2 Vol-lasmetaal van ER 5556 lassen, $\frac{1}{2}V$ -naad

De resultaten van quasistatische trekproeven bij kamertemperatuur van vol-lasmetaal staan eveneens in Tabel 1. Zie Figuur 2-2 in Bijlage 2 voor de toegepaste trekstaven, type A. De gemiddelde resultaten bij kamertemperatuur zijn:

rekgrens  $R_e(0,2) = 146$  MPa, treksterkte  $R_m = 295$  MPa,  
breukrek A5 = 26%, insnoering Z = 41%.

#### 4.2.3 Dwars-trekstaven over de las

De resultaten van quasistatische trekproeven bij kamertemperatuur op dwars-trekstaven

zijn eveneens opgenomen in Tabel 1. Zie Figuur 2-2 in Bijlage 2 voor de toegepaste trekstaven, type B. De gemiddelde resultaten bij kamertemperatuur zijn:

treksterkte  $R_m = 295$  MPa.

De trekstaven braken in de las.

### 4.3 Kerfslagproeven

De resultaten van kerfslagproeven bij  $-5$  °C van de lasverbinding zijn verzameld in Tabel 2. Kerfslagproeven zijn uitgevoerd op staven met de kerf in de las, de kerf op de smeltlijn, de kerf 2 mm van de smeltlijn en de kerf op 5 mm van de smeltlijn. Zie Figuur 2-3 in Bijlage 2 voor de positie van de kerven.

Het doel voor het uitvoeren van de kerfslagproeven was het vaststellen van de laagste kerftaaiheid in de lasverbinding. Uit de resultaten in Tabel 2 volgt dat de laagste kerftaaiheid van gemiddeld 21 J wordt gemeten voor de kerfslagstaven met de kerf op de smeltlijn. Om deze reden zijn de CTOD-proefstaven voorzien van kerven op de smeltlijn.

### 4.4 CTOD-proeven

#### 4.4.1 Quasistatische CTOD-proeven

*Data sheets* en registraties van de drie uitgevoerde quasistatische CTOD-proeven bij  $-5$  °C zijn opgenomen in Bijlage 3. Zie Figuur 2-4 in Bijlage 2 voor de CTOD-proefstaaf. De B x 2B proefstaven zijn voorzien van door de dikte kerven op de smeltlijn, de verhouding kerflengte/hogte is  $a/W \approx 0,5$ .

Aangezien gekozen is voor de kerfpositie op de smeltlijn in de 3-punts buigstaven, zijn de in de *data sheets* vermelde waarden van rekgrens en treksterkte de gemiddelden van die van het basismateriaal en het vol-lasmetaal. Vervolgens is een waarde van de rekgrens bij  $-5$  °C van 200 MPa geschat.

Uit de resultaten in Bijlage 3 volgt dat de laagste CTOD = 0,06 mm voor proefstaaf B1-23 wordt gemeten. De duplo proefstaaf B1-22 uit lasplaat B1 heeft een CTOD = 0,07 mm. De derde proefstaaf A1-20 uit lasplaat A1 heeft echter een veel hogere CTOD = 0,21 mm. De reden hiervoor is op dit moment niet duidelijk.

Aanbevolen wordt de structuur aan de kerftip van de vermoedingsscheuren in de drie proefstaven door middel van microscopische doorsneden te bepalen.

Uit de resultaten is echter duidelijk dat de lasverbinding een lage breuktaaiheid bij  $-5$  °C kan bezitten.

#### 4.4.2 Dynamische CTOD-proeven

Dynamische CTOD-proeven zijn uitgevoerd op B x 5B driepunts-buigstaven, voorzien van door de dikte kerven op de smeltlijn, de verhouding kerflengte/hoogte  $a/W \approx 0,3$ . Zie Figuur 2-5 in Bijlage 2 voor de CTOD-proefstaaf. De keuze van het proefstuk is gemotiveerd in [1].

In de schematische voorstelling van de uitvoering van valgewicht CTOD-proeven in Figuur 3a wordt de instrumentatie van de proefstaven aangegeven.

De in de CTOD-proefstaaf optredende dynamische belasting wordt gemeten met twee op de staaf geplakte rekstroken, die de -R1-tijd en R2-tijd registraties opleveren. De rekstroken zijn geplakt op de boven- en onderzijde van de proefstaaf, halverwege een van de onderste oplegrollen en het midden (kerfpositie) van de proefstaaf.

De CTOD-proefstaven zijn bovendien voorzien van een extra rekstrook R3, geplakt op het voorvlak van de proefstaaf op een afstand van 20 mm van de tip van de vermoeiingsscheur. Uit een plotselinge verandering van de R3-tijd registratie zou het moment van scheurinitiatie kunnen worden bepaald. Om lokale rekveranderingen goed te kunnen meten zijn rekstroken met een korte meetlengte en smalle breedte toegepast. Gebruikt zijn HBM-rekstroken van het type 1,5/120LY11 met een meetlengte van 1,5 mm.

Na het voorvermoeien van de proefstaven om de mechanische kerf aan te scherpen met een vermoeiingsscheur, zijn eerst kalibraties van de belasting uitgevoerd op twee proefstaven, B1-26 en B1-28. De belasting is bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  quasistatisch geijkt tot aan de maximale belasting bij het voorvermoeien. De kalibraties van de belasting op basis van de R1-, R2- en R3-rekstroken toonden een goede lineaire en reproduceerbare responsie. De maximale belasting van de dynamische CTOD-proeven is door extrapolatie bepaald uit de gemiddelde responsie van de R1- en R2-rekstroken. De kalibratielijn van de R3-meetwaarde is niet gebruikt voor het bepalen van de maximale belasting, omdat een afwijking in de afstand van 20 mm van de positie van de R3-rekstrook ten opzichte van de kerftip een fout introduceert bij extrapolatie.

Extrapolatie van de R1- en R2-kalibratielijnen ter bepaling van de maximale belasting kan eveneens een onbekende fout introduceren. Om deze reden is de maximale belasting ook berekend uit het gemiddelde  $\mu$ rek-sigitaal van de R1- en R2-rekstroken volgens:

De oplegafstand van de driepunts-buigstaven bedraagt  $S = 254\text{ mm}$  (10"). De R1- en R2-rekstroken zijn aan boven- en onderzijde van de proefstaaf geplakt, halverwege een van de onderste oplegrollen en het midden (kerfpositie) van de proefstaaf, dat is op een afstand van  $\frac{1}{4}S$  vanaf een van de buitenste oplegrollen. Nu is:

buigmoment = spanning \* weerstandsmoment  $\rightarrow \frac{1}{2}F * \frac{1}{4}S = E \epsilon * \frac{1}{6} BW^2 \rightarrow$

$$F = \frac{4}{3} \frac{B W^2 E \bar{\epsilon}}{S} \quad (1)$$

F = maximale belasting

B = dikte proefstuk

W = hoogte proefstuk

S = oplegafstand proefstuk

E = elasticiteitsmodulus, voor AlMg4,5Mn  $\approx 70.300$  MPa

$\bar{\epsilon}$  = gemiddeld  $\mu$ rek-sigitaal van de R1- en R2-rekstroken

Voor de maximale belasting van de dynamische CTOD-proeven wordt nu genomen het gemiddelde van de door extrapolatie bepaalde belasting uit de gemiddelde responsie van de R1- en R2-rekstroken en de berekende belasting uit het gemiddelde  $\mu$ rek-sigitaal van de R1- en R2-rekstroken.

Bij de dynamische CTOD-valgewichtproeven is het moment van scheurinitiatie, als in [1] en [2], bepaald uit de hellingsverandering in de registratie van de kerfwanopeningsverplaatsing als functie van de tijd. Dit moment komt (nagenoeg) overeen met de maximale belasting volgens de rekstrookregistraties R1-tijd en R2-tijd.

Om oscillaties op de meetsignalen te beperken zijn op het trefpunt van de hamerous twee plaatjes zachtgegloeid aluminium van elk 2 mm dikte op de proefstaaf gelegd. Om dezelfde reden is - zoals eerder toegepast in [1, 2, 4] - de lengte van de CTOD-proefstaven zo lang mogelijk gekozen, dat is gelijk aan de breedte van  $\approx 395$  mm van de gelaste plaatstroken. Uit literatuurstudie [5] is namelijk gebleken dat de verhouding van de lengte L van het proefstuk tot de oplegafstand S invloed heeft op de oscillaties.

De kerfwanopeningsverplaatsing, die behoort bij de verandering in de registratie van de kerfwanopeningsverplaatsing als functie van de tijd, is de totale kerfwanopeningsverplaatsing  $V_g$ . Deze totale kerfwanopeningsverplaatsing bestaat uit een elastisch en een plastisch aandeel:

$$V_g = V_e + V_p$$

Voor de berekening van de CTOD dienen het elastisch en plastisch aandeel van de kerfwanopeningsverplaatsing afzonderlijk bekend te zijn. Aangezien het onmogelijk is het elastisch aandeel te bepalen uit dynamische registraties, is het elastisch aandeel op analytische wijze bepaald. Dezelfde formule als in [1, 2] is toegepast voor het 3-punts buigproefstuk:

$$V_c = \frac{6FS(1-\nu^2)}{WBE} \cdot \left(\frac{a_0}{W}\right) \cdot \left[ 0,76 - 2,28 \left(\frac{a_0}{W}\right) + 3,87 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 - 2,04 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 + \frac{0,66}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^2} \right] \quad (2)$$

$\nu$  = constante van Poisson, voor aluminium = 0,33

$a_0$  = kerflengte in proefstuk

De CTOD-waarde op het moment van scheurinitiatie,  $\delta_c$ , is berekend volgens BS7448: 1991, Part 1.

Voor de dynamische proeven is uit de  $\delta_c$ -waarde de spanningsintensiteitsfactor  $K(\delta_c)$  berekend volgens dezelfde betrekking als in [1, 2] toegepast:

$$K(\delta_c) = \left( \frac{2 \cdot Re_D \cdot \delta_c \cdot E}{1 - \nu^2} \right)^{0,5} \quad \text{in MPa}\sqrt{m} \quad (3)$$

$Re_D$  = dynamische rekgrens bij beproevingstemperatuur

Voor de lasverbinding in AlMg4,5Mn is de dynamische rekgrens in het kader van dit onderzoek niet experimenteel bepaald. Voor de dynamische rekgrens bij -5 °C is gekozen voor een 20% hogere waarde van de quasistatische rekgrens van 200 MPa, zie paragraaf 4.4.1.

Naast toepassing van formule (3) voor berekening van de dynamische spanningsintensiteitsfactor, zijn ook de volgende betrekkingen uit [2, 5] gebruikt voor berekening van de dynamische K:

$$K(J_c) = \left[ \frac{J_c E}{(1 - \nu^2)} \right]^{0,5} \quad \text{met:} \quad (4)$$

$$J_c = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} + \frac{2 F V_p}{B(W - a_0)} \cdot \left[ \frac{0,25 S}{a_0 + z + 0,45(W - a_0)} \right] \quad \text{en:} \quad (5)$$

$$J_c = \frac{K^2 (1 - \nu^2)}{E} + \frac{2 U_{vp}}{B (W - a_0)} \cdot \left[ \frac{0,25 S}{a_0 + z + 0,45 (W - a_0)} \right] \quad (6)$$

$V_p$  = plastisch aandeel van de kerfopeningverplaatsing

$z$  = afstand opnemer voor kerfopeningverplaatsing t.o.v. rand van proefstuk

$U_{vp}$  = plastisch aandeel van het oppervlak onder de registratie van belasting versus kerfopeningverplaatsing

Figuur 3b toont schematisch de verdeling van de registratie van belasting versus kerfopeningverplaatsing in een elastisch en plastisch aandeel.

*Data sheets* van de uitgevoerde dynamische CTOD-proeven zijn opgenomen in Bijlage 4.

Een samenvatting van de resultaten van de dynamische CTOD-proeven wordt gegeven in Tabel 3. De snelheid van de spanningsintensiteitsfactor,  $dK/dt$ , is gemiddeld  $1,4 \cdot 10^5$   $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}\cdot\text{s}^{-1}$ .

In Figuur 4a en 4b worden als voorbeelden de registraties van de belasting (-R1, R2 en R3) en de kerfopeningverplaatsing (*Clip*) als functie van de tijd, opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij  $-5$  °C van proefstuk B1-25, weergegeven. In Figuur 4c is van dit proefstuk de registratie van de gemiddelde belasting  $(-R1 + R2)/2$  als functie van de kerfopeningverplaatsing (*Clip gauge*) opgenomen. Hierbij is de groene stippellijn de volgens formule (2) analytisch bepaalde  $V_c$ -lijn.

De gemiddelde resultaten bij  $-5$  °C zijn, zie Tabel 3:

$\delta_c$	=	$0,14 \pm 0,01$ mm, met als laagste waarde 0,13 mm
$K(\delta_c)$ , formule (3)	=	$72 \pm 2$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , met als laagste waarde 70 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K(J_c)$ , formules (4,5)	=	$62 \pm 1$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , met als laagste waarde 61 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$
$K(J_c)$ , formules (4,6)	=	$52 \pm 1$ $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , met als laagste waarde 50 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$

De spreidingen van de resultaten voor de dynamische breuktaaiheid zijn laag.

Een gemiddelde  $K(J_c) = 52$   $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ , bepaald volgens formules (4,6), wordt als het betrouwbaarste resultaat beoordeeld.

Het resultaat van de gemiddelde dynamische  $\delta_c = 0,14$  mm toont aan dat de breuktaaiheid van de onderzochte lasverbinding in AlMg4,5Mn niet gevoelig is voor snelle belastingscondities. Immers, in paragraaf 4.4.1 is voor de laagste CTOD onder quasistatische belastingscondities gemeten 0,06 mm. Op basis van dit resultaat is gesteld, dat de lasverbinding een lage breuktaaiheid bij  $-5$  °C kan bezitten.

Ook voor de dynamisch belaste proefstukken verdient het aanbeveling om de structuur

aan de kerftip van de vermoeiingsscheuren in de proefstaven door middel van microscopische doorsneden te bepalen.

## 5 SAMENVATTING VAN RESULTATEN EN CONCLUSIES

In dit rapport van het onderzoek "Breukweerstand van gelast aluminium AlMg4,5Mn voor toepassing in oppervlakteschepen" is de breukweerstand bepaald door middel van quasistatische en dynamische CTOD- (*crack tip opening displacement*) proeven op proefstaven van een gelaste 5083-aluminium plaat met een plaatdikte van 10 mm.

De belangrijkste resultaten en conclusies luiden als volgt:

1. De resultaten van hardheidsmetingen op macro-doorsneden van de lasverbindingen geven een hardheid van de las van gemiddeld HB1/5 = 102. De hardheid van het materiaal naast de las is weinig verschillend.  
Zie paragraaf 4.1.
2. De resultaten van quasistatische trekproeven bij kamertemperatuur zijn voor:
  - basismateriaal AlMg4,5Mn:  
rekgrens = 240 MPa, treksterkte = 366 MPa;
  - vol-lasmetaal van ER 5556 lassen, ½V-naad:  
rekgrens = 146 MPa, treksterkte = 295 MPa.Zie paragraaf 4.2.
3. De resultaten van kerfslagproeven bij -5 °C van de lasverbinding tonen aan dat de laagste kerftaaiheid wordt gemeten voor de kerfslagstaven met de kerf op de smeltlijn.  
Zie paragraaf 4.3.
4. De resultaten van quasistatische CTOD-proeven bij -5 °C op B x 2B driepuntsbuigstaven met door de dikte kerven op de smeltlijn, verhouding kerflengte/hogte  $a/W \approx 0,5$ , geven een laagste CTOD van 0,06 mm. Uit de resultaten volgt dat de lasverbinding een lage breuktaaiheid bij -5 °C kan bezitten.  
Zie paragraaf 4.4.1.
5. De resultaten van de dynamische CTOD-proeven bij -5 °C op B x 5B driepuntsbuigstaven met door de dikte kerven op de smeltlijn, verhouding kerflengte/hogte  $a/W \approx 0,3$ , zijn als volgt:  
De laagste gemeten CTOD-waarde bedraagt 0,13 mm, de gemiddelde  $K (J_2)$  is  $52 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ , met als laagste waarde  $50 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ .  
Het resultaat van de dynamische CTOD toont aan dat de breuktaaiheid van de onderzochte lasverbinding in AlMg4,5Mn niet gevoelig is voor snelle belastingscondities.  
Zie paragraaf 4.4.2.

## 6 AANBEVELING

Quasistatische CTOD-proeven bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  geven een laagste CTOD = 0,06 mm voor proefstaaf B1-23. De duplo proefstaaf B1-22 uit lasplaat B1 heeft eveneens een lage CTOD = 0,07 mm. De derde proefstaaf A1-20 uit lasplaat A1 heeft echter een veel hogere CTOD = 0,21 mm. De reden hiervoor is op dit moment niet duidelijk.

Aanbevolen wordt de structuur aan de kerftip van de vermoeiingsscheuren in de drie proefstaven door middel van microscopische doorsneden te bepalen.

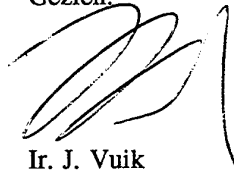
Dynamische CTOD-proeven bij  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  geven een laagste CTOD = 0,13 mm. Ook voor de dynamisch belaste proefstukken verdient het aanbeveling om de structuur aan de kerftip van de vermoeiingsscheuren in de proefstaven door middel van microscopische doorsneden te bepalen.

TNO METAALINSTITUUT



Ing. C. Koning

Gezien:



Ir. J. Vuik

**REFERENTIES**

- [1] C. Koning  
Interim rapport 1. Breukweerstand van gelast constructiemateriaal Fe E 355 voor toepassing in oppervlakteschepen.  
Rapport 94M/01738/KON/SCI van 07-02-1994, revisie 26-04-1994.  
TNO Metaalinstituut.
- [2] C. Koning  
Interim rapport 2. Breukweerstand van gelast constructiemateriaal Fe E 355 voor toepassing in oppervlakteschepen.  
Rapport 94 MI 011560/KON/SCI van 20-12-1994, revisie 01-02-1995.  
TNO Metaalinstituut.
- [3] NEN 6710  
Aluminiumconstructies TGB 1990  
Basiseisen en basisrekenregels voor overwegend statisch belaste constructies, december 1991.
- [4] C. Koning  
Interim rapport 6. Breuktaaiheid van gelast HRS 650M: Toetsing aan acceptatiecriteria.  
Rapport 93M/03447/KON/LEI van 31-03-1993, revisie 07-07-1993.  
Instituut voor Productie en Logistiek TNO.
- [5] C. Koning  
Interim rapport 3. Literatuurstudie: Dynamische beproeving voor toepassing in KM-onderzoekprogramma.  
Rapport 91M/04364/KON/VLT van 16-04-1991, revisie 24-09-1991.  
Instituut voor Productie en Logistiek TNO.

**Tabel 1** Resultaten quasistatische trekproeven van basismateriaal AlMg4,5Mn (5083-serie), vol-lasmetaal van ER 5556 (AlMg4,5Mn)-lassen en van trekstaven, uitgenomen dwars op de las.

### Basismateriaal AlMg4,5Mn

Dwarsstaven = lengterichting  $\perp$  walsrichting.

Staaftcode	Diameter trekstaaf [mm]	Temperatuur [°C]	Rekgrens Re(0,2) [MPa]	Treksterkte Rm [MPa]	Breukrek A5 [%]	Insnoering Z [%]
A1-3	4,98	RT	208	334	17	35
A1-4	4,99	RT	271	399	18	36
Gemiddeld		RT	240	366	18	36
Eis volgens NEN 6710		RT	125 ÷ 140	270	12	

### Vol-lasmetaal van ER 5556 lassen, ½V-naad

Staaftcode	Diameter trekstaaf [mm]	Temperatuur [°C]	Rekgrens Re(0,2) [MPa]	Treksterkte Rm [MPa]	Breukrek A5 [%]	Insnoering Z [%]
A1-1	4,97	RT	142	294	26	38
B1-21	4,96	RT	150	295	25	44
Gemiddeld		RT	146	295	26	41

### Basismateriaal AlMg4,5Mn met ½V-naad van ER 5556 lasmetaal

Beproevingstemperatuur RT.

Staaftcode	Nominale doorsnede breedte x dikte [mm] x [mm]	Treksterkte Rm [MPa]	Plaats van de breuk
A1-5	38,00 x 10,05	295	In de las
A1-6	38,04 x 10,17	295	In de las

Tabel 2

Tabel 2 Resultaten kerfslagproeven van de lasverbinding in AlMg4,5Mn.

Beproevingstemperatuur -5 °C.

Staaftcode	Kerfslagwaarde $C_v$ [J]	Gemiddeld $C_v$ [J]	Positie van de kerf
A1-7 A1-8 A1-9	24 22 24	23	Lasmetaal Type A in Figuur 2-3, Bijlage 2
A1-10 A1-11 A1-12	21 21 22	21	Smeltlijn Type B in Figuur 2-3, Bijlage 2
A1-13 A1-14 A1-15	32 30 32	31	Smeltlijn + 2 mm Type C in Figuur 2-3, Bijlage 2
A1-16 A1-17 A1-18	31 31 30	31	Smeltlijn + 5 mm Type D in Figuur 2-3, Bijlage 2

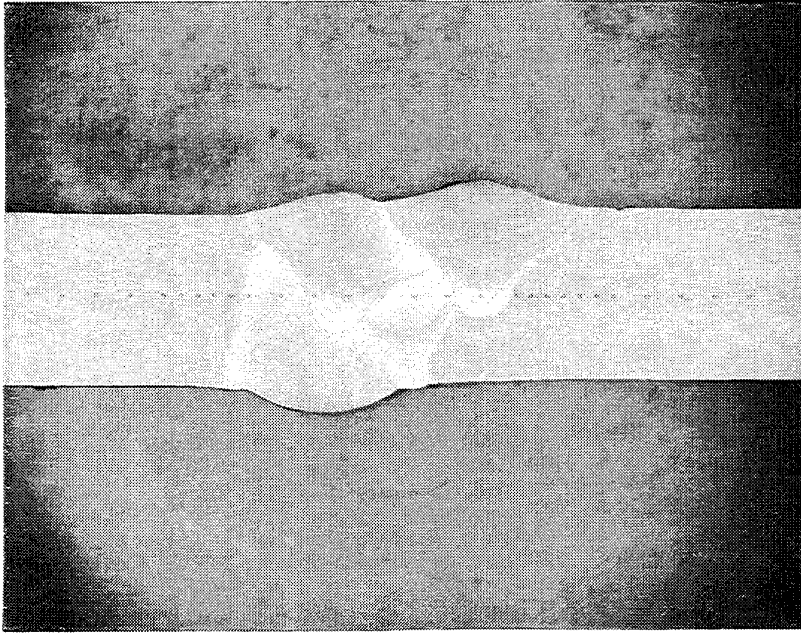
Blanco blad

## Legenda bij Tabel 3: Resultaten dynamische CTOD-proeven.

T	=	beproevingstemperatuur
W	=	hoogte 3-punts CTOD-buigproefstuk
B	=	dikte 3-punts CTOD-buigproefstuk
a	=	gemiddelde kerflengte in het 3-punts CTOD-buigproefstuk
a/W	=	verhouding kerflengte / hoogte
f(a/W)	=	geometriefactor bij berekening van K
Vg	=	Ve + Vp = totale kerfandopeningsverplaatsing (CMOD) tijdens CTOD-proef
Ve	=	elastisch aandeel van de kerfandopeningsverplaatsing
Vp	=	plastisch aandeel van de kerfandopeningsverplaatsing
Fmax	=	maximale belasting tijdens CTOD-proef
Fber	=	berekende maximale belasting
Fgem	=	(Fmax + Fber)/2 = gemiddelde maximale belasting
t	=	tijd voor het bereiken van Fmax
K	=	spanningsintensiteitsfactor bij Fgem
dK/dt	=	K/t in MPa. $\sqrt{m.s^{-1}}$ .10 <sup>5</sup>
$\delta c$	=	CTOD ( <i>crack tip opening displacement</i> )
K( $\delta c$ )	=	K berekend uit $\delta c$ volgens formule (3)
K(Jc)	=	K berekend volgens formules (4,5)
K(Jc)int.	=	K berekend volgens formules (4,6)
m	=	massa van het valgewicht
h	=	valhoogte van het valgewicht

Tabel 3 Resultaten dynamische CTOD-proeven.

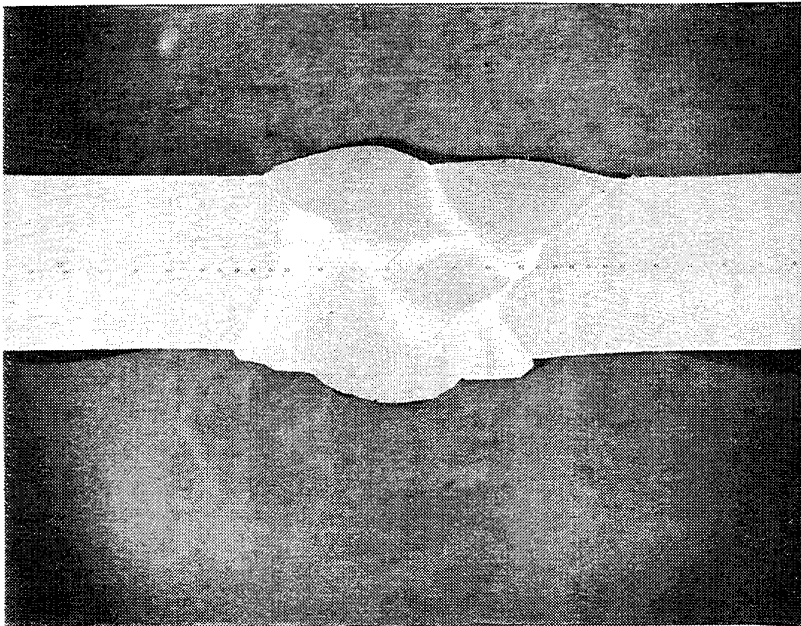
Proef- stuk	T [°C]	W [mm]	B [mm]	a [mm]	a/W	f(a/W)	Vg [mm]	Ve [mm]	Vp [mm]	Fmax [kN]	Fber [kN]	Fgem [kN]	t [µs]	K [MPa. √m]	dK/dt	δc [mm]	K(δc) [MPa. √m]	K(Jc) [MPa. √m]	K(Jc)int [MPa. √m]	m [kg]	h [m]
<b>Basismateriaal AlMg4,5Mn met 1/2V-naad van ER 5556 lasmetaal</b>																					
B1-24	-5	50,01	9,62	15,45	0,31	1,556	0,448	0,239	0,209	11,3	10,8	11,0	283	41	1,4	0,146	74	63	53	135,5	2
B1-25	-5	49,99	9,63	15,51	0,31	1,562	0,439	0,249	0,190	11,6	11,3	11,4	298	42	1,4	0,139	73	63	53	135,5	2
B1-26	-5	49,99	9,61	15,59	0,31	1,568	0,422	0,253	0,169	11,6	11,3	11,5	278	43	1,5	0,130	70	61	50	135,5	2
B1-27	-5	50,00	9,63	15,43	0,31	1,555	0,425	0,250	0,175	11,7	11,4	11,6	304	42	1,4	0,134	71	62	51	135,5	2
B1-28	-5	50,01	9,61	15,22	0,30	1,538	0,420	0,246	0,174	11,8	11,4	11,6	314	42	1,3	0,133	71	62	53	135,5	2



Macro A1-2

Pol.nr. A4573

V = 2,4

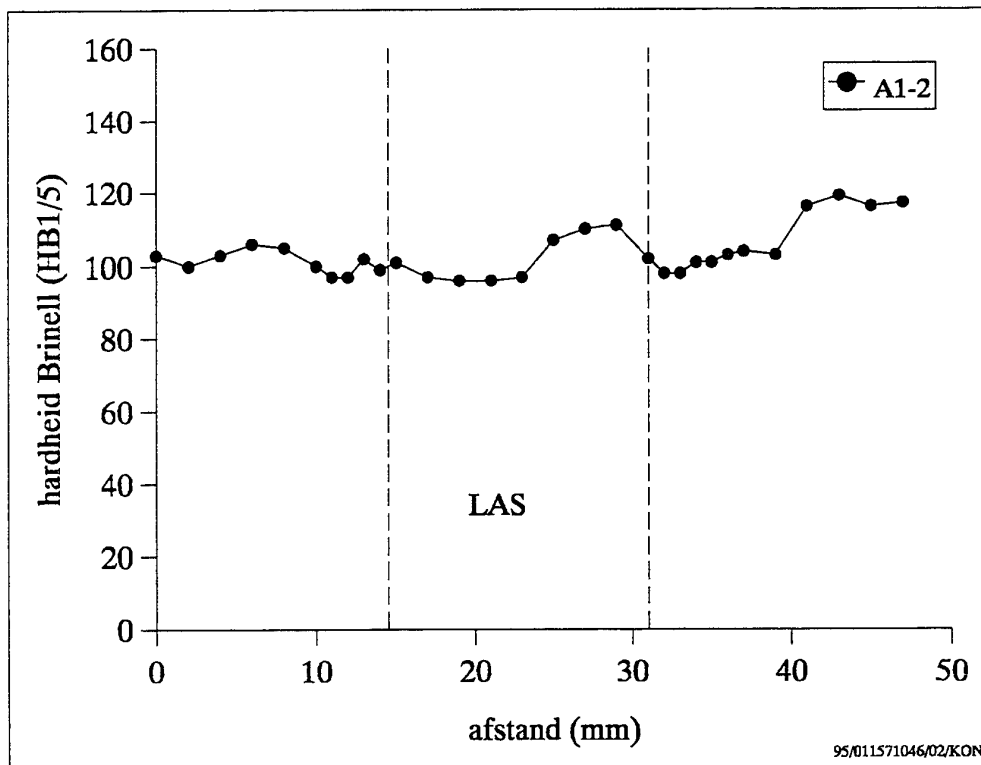
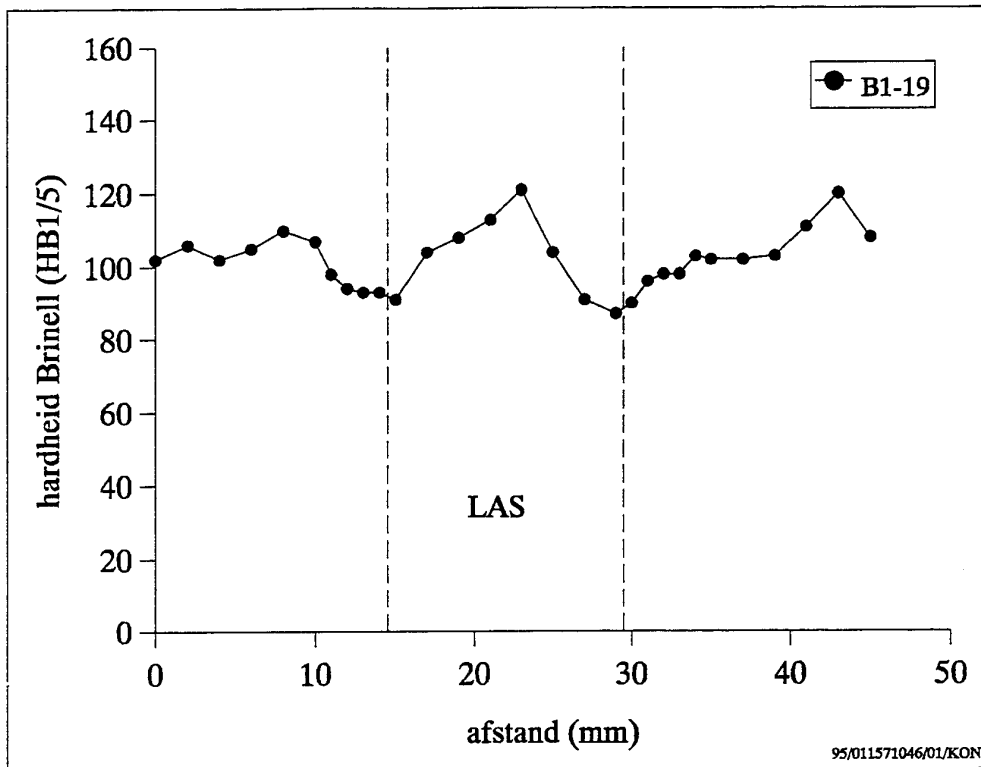


Macro B1-19

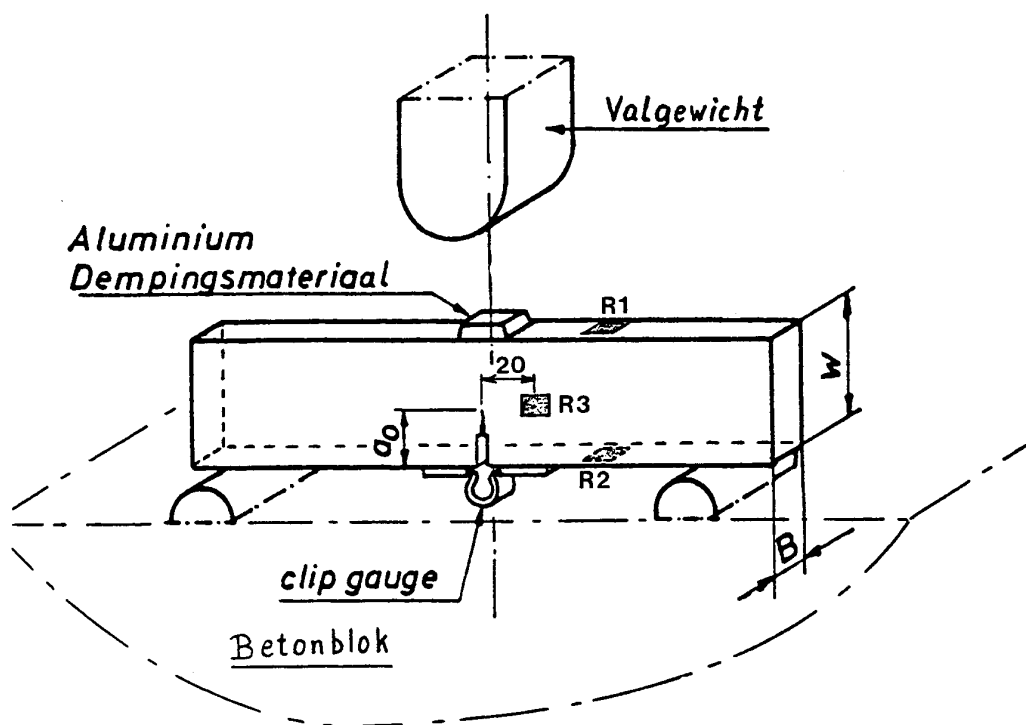
Pol.nr. A4572

V = 2,4

Figuur 1 Macro-doorsneden van de lasverbinding in lasplaten A1 en B1.

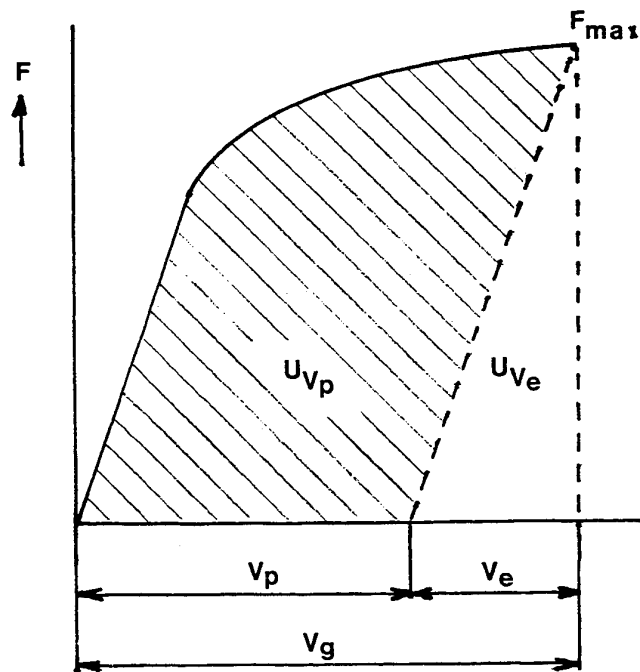


Figuur 2 Resultaten van hardheidsmetingen van de lasverbinding in lasplaten A1 en B1.



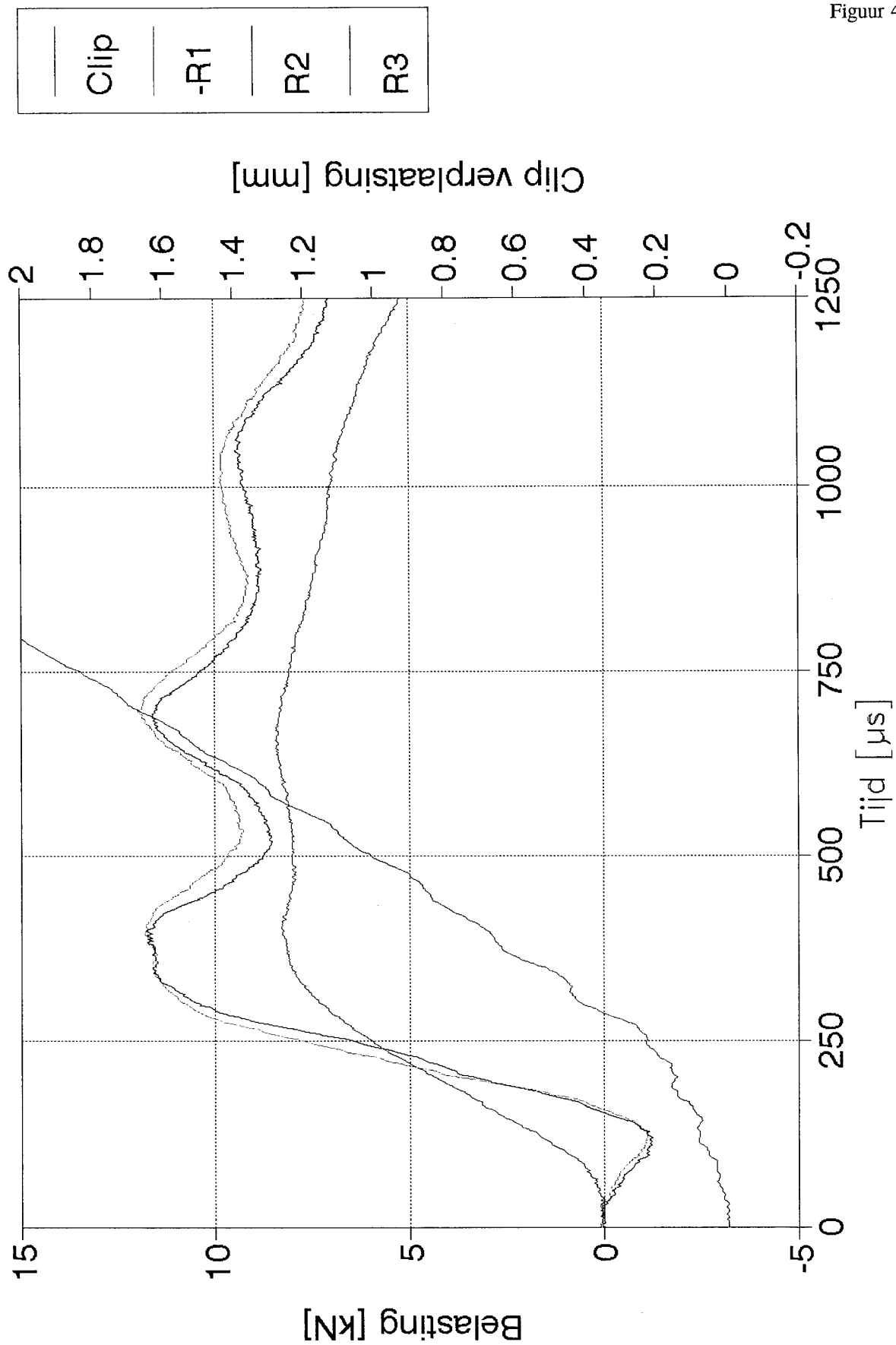
- R1 = rekstrook aan de drukzijde ter bepaling van de dynamische belasting in het proefstuk
- R2 = rekstrook aan de trekzijde ter bepaling van de dynamische belasting in het proefstuk
- R3 = rekstrook op 20 mm afstand van de kerftip ter bepaling van het moment van scheurinitiatie

Figuur 3a Schematische voorstelling van de uitvoering van valgewicht CTOD-proeven.



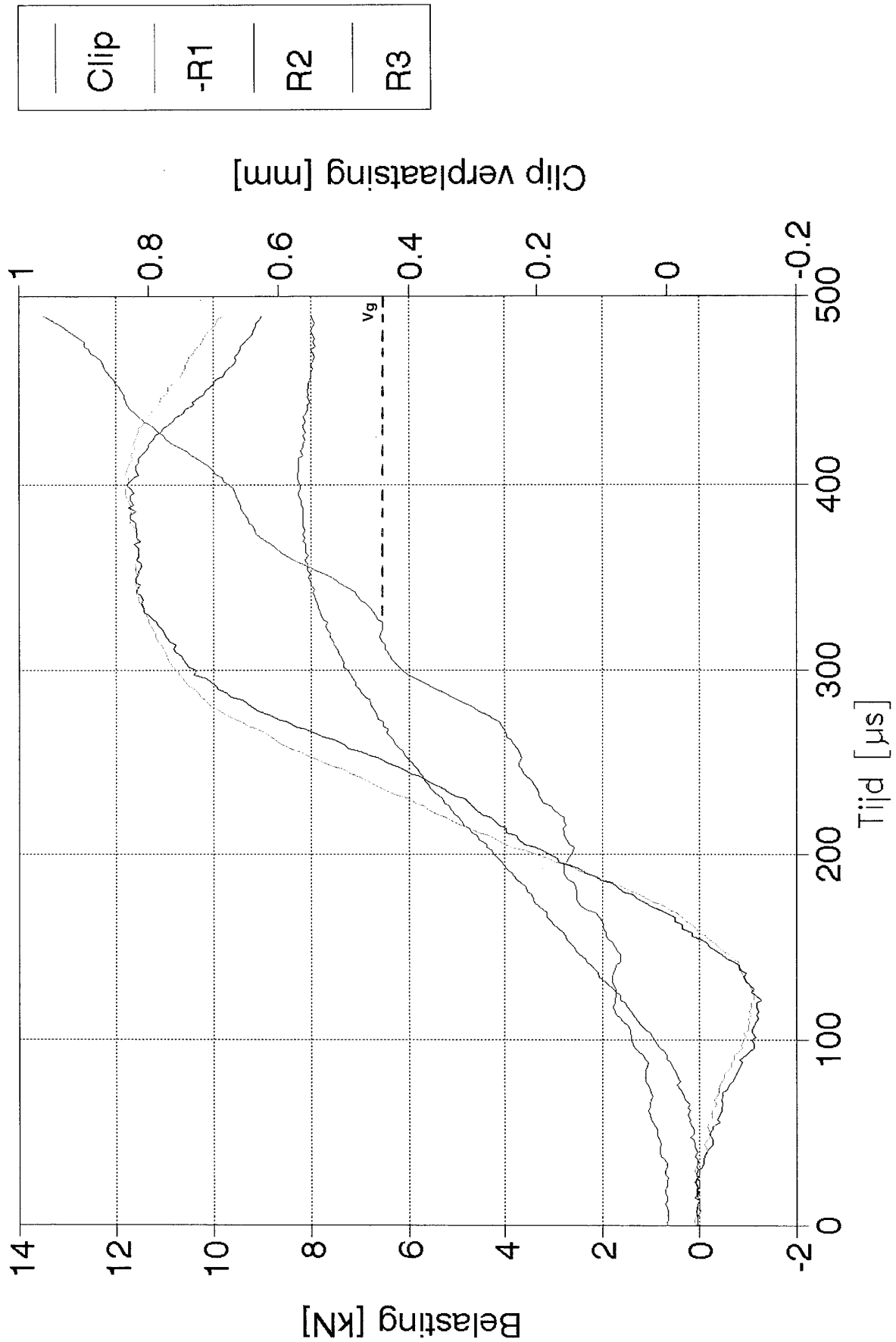
Figuur 3b Verdeling van de registratie van belasting versus kerfwanopeningsverplaatsing in elastische en plastische (gearceerd) energie.

# Proefstuk B1-25



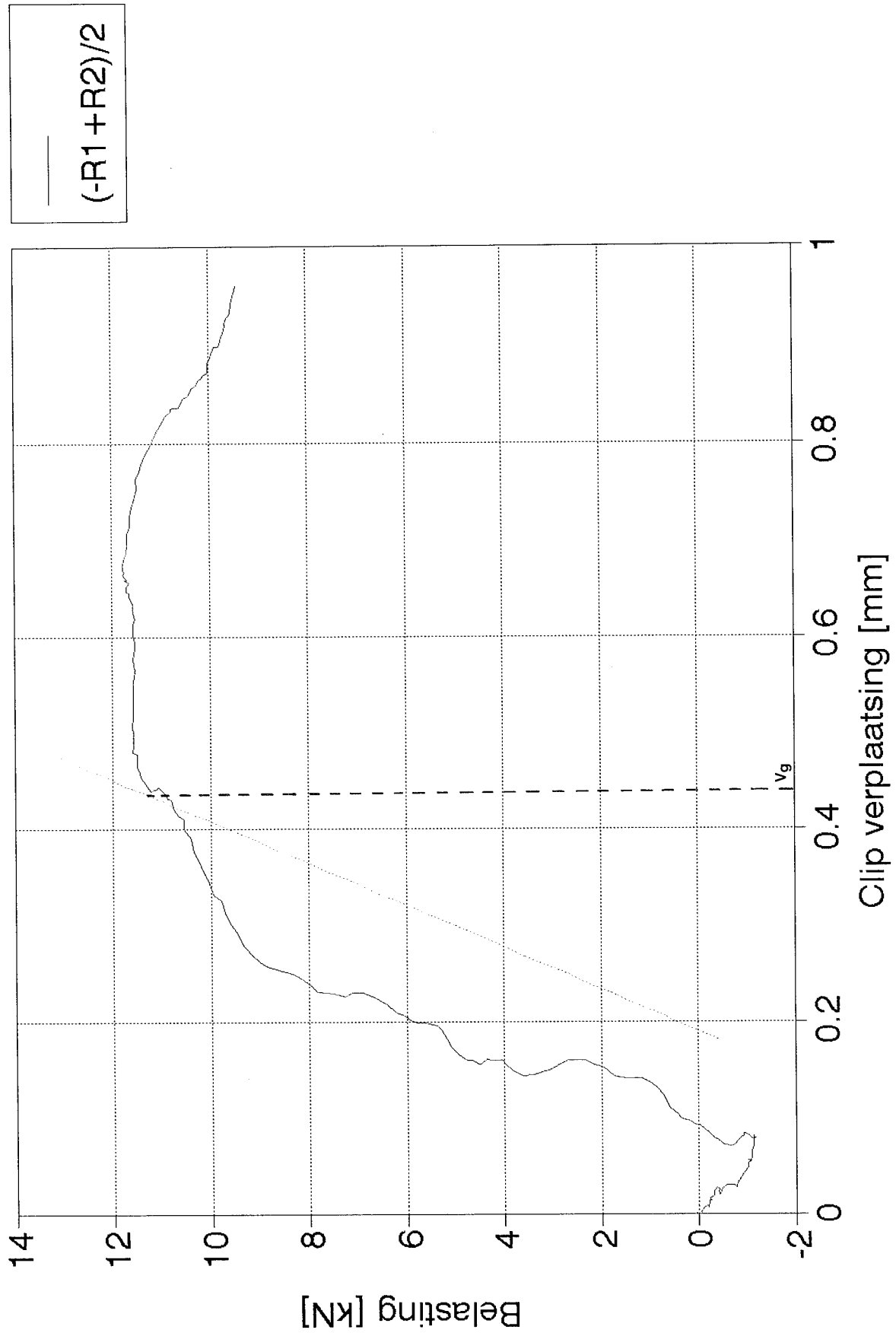
Figuur 4a Registratie van de belasting (-R1, R2 en R3) en de kerfwanopeningsverplaatsing (*Clip*) als functie van de tijd (0 ÷ 1250 µs), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij -5 °C van proefstuk B1-25.

Proefstuk B1-25



Figuur 4b Registratie van de belasting (-R1, R2 en R3) en de kerfwanopeningsverplaatsing (*Clip*) als functie van de tijd (0 ÷ 500 µs), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij -5 °C van proefstuk B1-25.

Proefstuk B1-25



Figuur 4c Registratie van de gemiddelde belasting  $(-R1 + R2)/2$  als functie van de kerfwandopeningsverplaatsing (*Clip gauge*), opgenomen tijdens de valgewicht CTOD-proef bij  $-5^{\circ}\text{C}$  van proefstuk B1-25.

**BIJLAGE 1**

**Lasmethodebeschrijving en uitvoering lasstroken**

Blanco blad

## Lasmethodebeschrijving van de fabrikant (WPS)

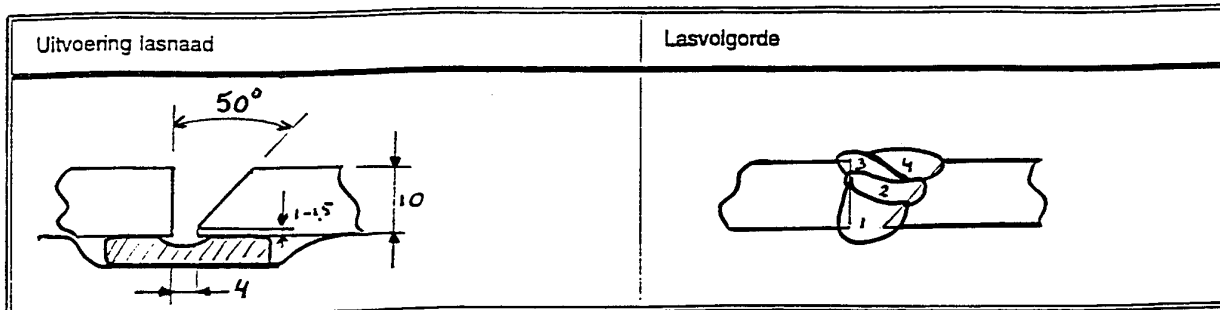
Beoordelaar of keuringsinstantie:

Plaats : *Apeldoorn*Lasmethodebeschrijving: **1**Referentienr : *Plaat N<sup>o</sup> B1, B2, A1*

WPAR nr.:

Fabrikant: *T.N.O*Naam van de lasser: *G.L Bellekom*Lasproces: *MIG*Type naad: *1/2 V-naad*

Lasnaadvoorbereiding ( zie tekening )

Lasnaadvoorbewerking: *gefreesd*Reinigingsmethode: *Aceton + Schuren*Materiaalsoort: *Aluminium 5083 Almg 4,5M<sub>4</sub>*Mat. Dikte : *10 mm*Mat. afmetingen: *500 x 200 x 10 (2 stuks)*Laspositie : *PA (1G)*

## Lasgegevens

Laag	Proces	Afmeting toevoegmateriaal	Stroom A	Spanning V	Stroomsoort/polariteit	Draad.V m/min	Voortloopsnelheid cm/min	Warmte-inbreng kJ/cm
1	<i>MIG</i>	<i>P2 6085 φ1,2</i>	<i>204-222</i>	<i>24,5-25</i>	<i>+ aa. draad</i>	<i>11,1-12,8</i>	<i>342-40</i>	<i>8-9</i>
2	"	"	<i>231-258</i>	<i>26,5-27,5</i>	"	<i>12,8-14,3</i>	<i>65</i>	<i>6-7</i>
3	"	"	<i>243-255</i>	<i>26,0-27,8</i>	"	<i>13,9-14,1</i>	<i>65</i>	<i>6</i>
4	"	"	<i>246-258</i>	<i>27,0-27,5</i>	"	<i>13,7-14,2</i>	<i>65</i>	<i>6</i>

Toevoegmateriaal codering en handelsnaam: *ER 5556 Almg 4,5M<sub>4</sub>*Toevoegmateriaal Fabrikant en type Nr: *Filarc P2 6085 φ1,2*Speciale bak- of droogbehandeling : *Geconditioneerde R.*Gas/poeder: — beschermgas: *Argon*teggas: *neen*Gasstroomsnelheid beschermgas: *10 L/min*Wolfraamelektrode type/maat: — *N.V.T*Gegevens tegenbewerking/ondersteuning: *Ceramic P21500/72*Voorwarmtemperatuur: *neen*Tussenlaagtemperatuur: *75°C*

Warmtebehandeling na het lassen: —

en/of verouderen: —

Tijd, temperatuur en methode: —

Opwarm- en afkoelingsnelheid \*): —

Krimp Verhinderend door: *2 bruggen*Fabrikant : *afm 400 x 100 x 10 mm*

Naam, datum en handtekening

*G.L. Bellekom*  
*30 Augustus 1995*  
 \*) indien vereist

*G.L. Bellekom*

Grondlaag : *Handmatig*Vullagen : *gemech*

Overige informatie:

bijv. zwaaien van de elektrode —

maximale zwaai-breedte: —

Oscillatie: amplitude, frequentie, —

verblijftijd: —

Gegevens pulslussen: —

Uitsteeklengte: *15-20 mm*Gegevens plasmalassen: *n.v.t*Hoek lastoorts: *15-20° stehend*

Dauwpunt &gt; voor het lassen —

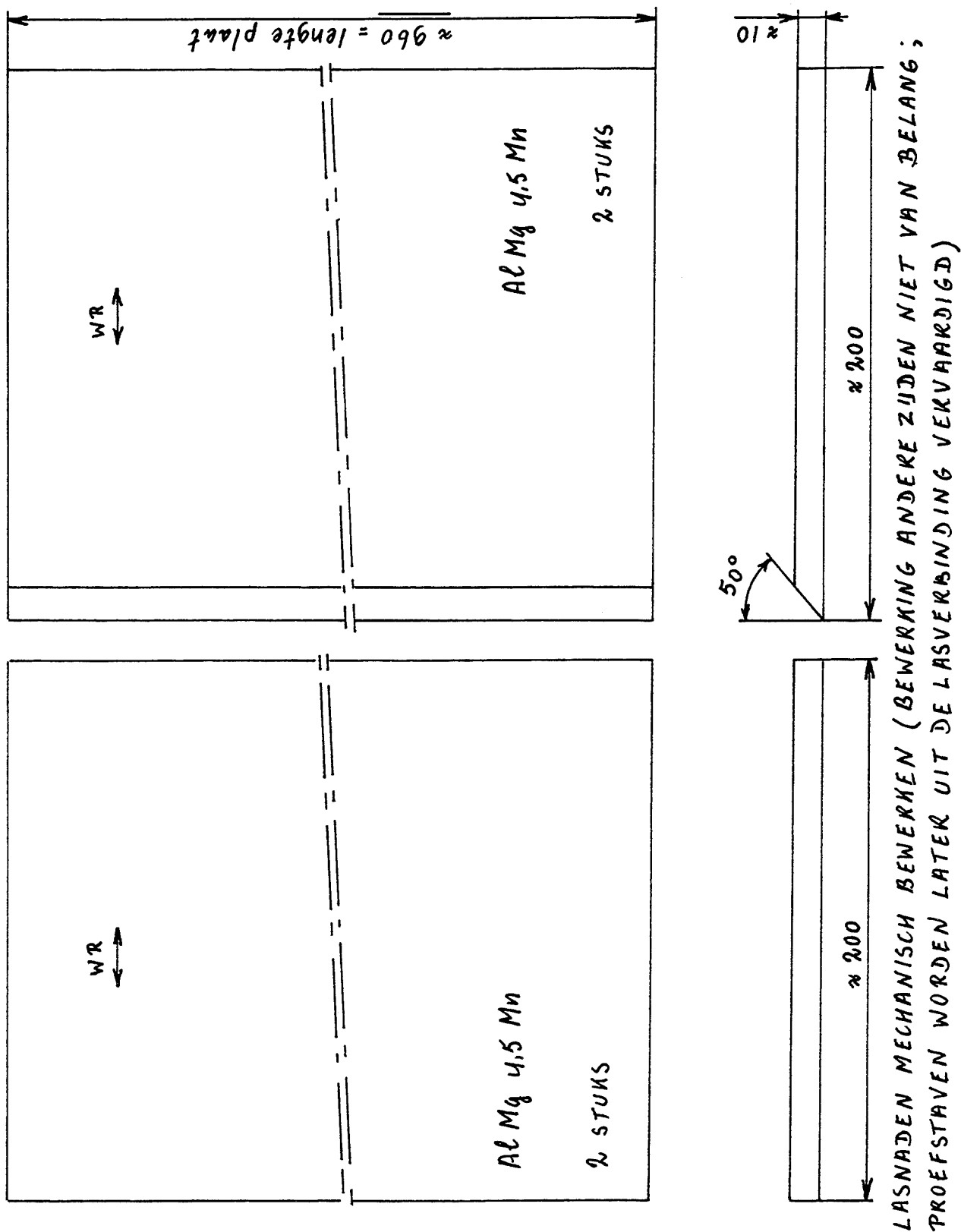
Rel. vochtigheid % en temp. °C —

Lasparameter registratie via kooffer type *Monarc 2000*

Beoordelaar of keuringsinstantie

Naam, datum en handtekening

*Opm; grondlaag moeilijk i.v.m. boogafwijkingen naar de rechte flank.*

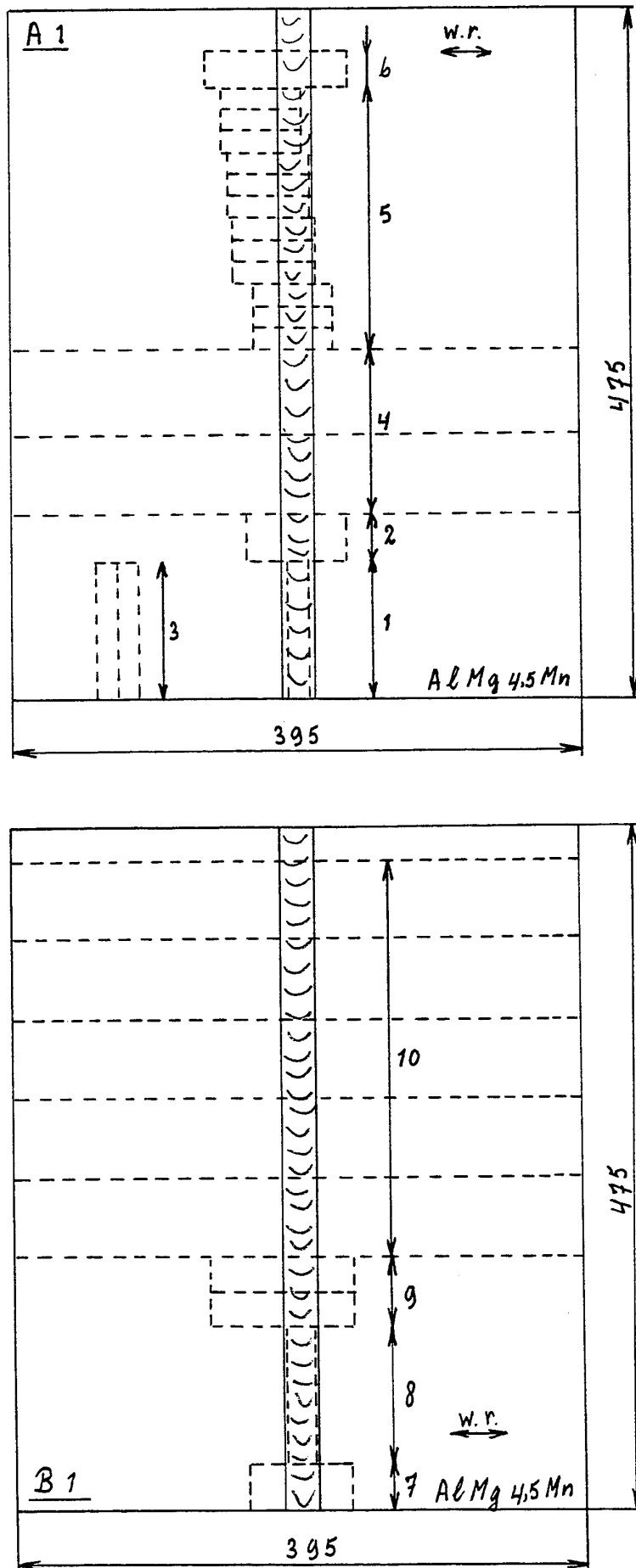


**Figuur 1-1** Uitvoering van de lasstroken.  
 (Voor het mechanisch bewerken was het noodzakelijk de lasstroken in tweeën te zagen).

**BIJLAGE 2**

**Plan van uitneming van de proefstukken en tekeningen van de proefstukken**

Blanco blad



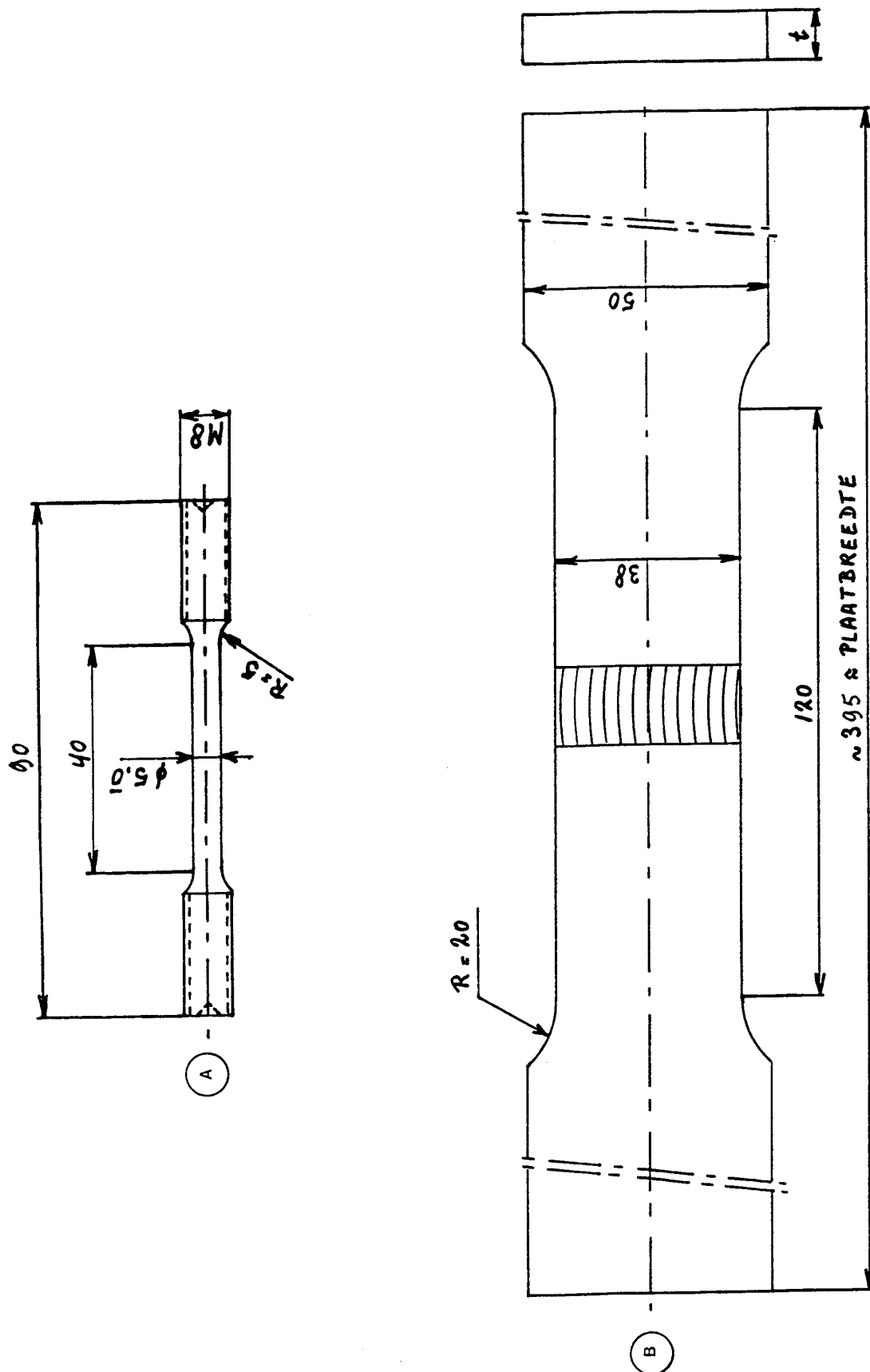
Figuur 2-1 Plan van uitneming van proefstukken uit lasplaten A1 en B1.

LEGENDA BIJ FIGUUR 2-1: PLAATSEN VAN UITNEMING VAN PROEFSTUKKENPLAATSTROOK A1

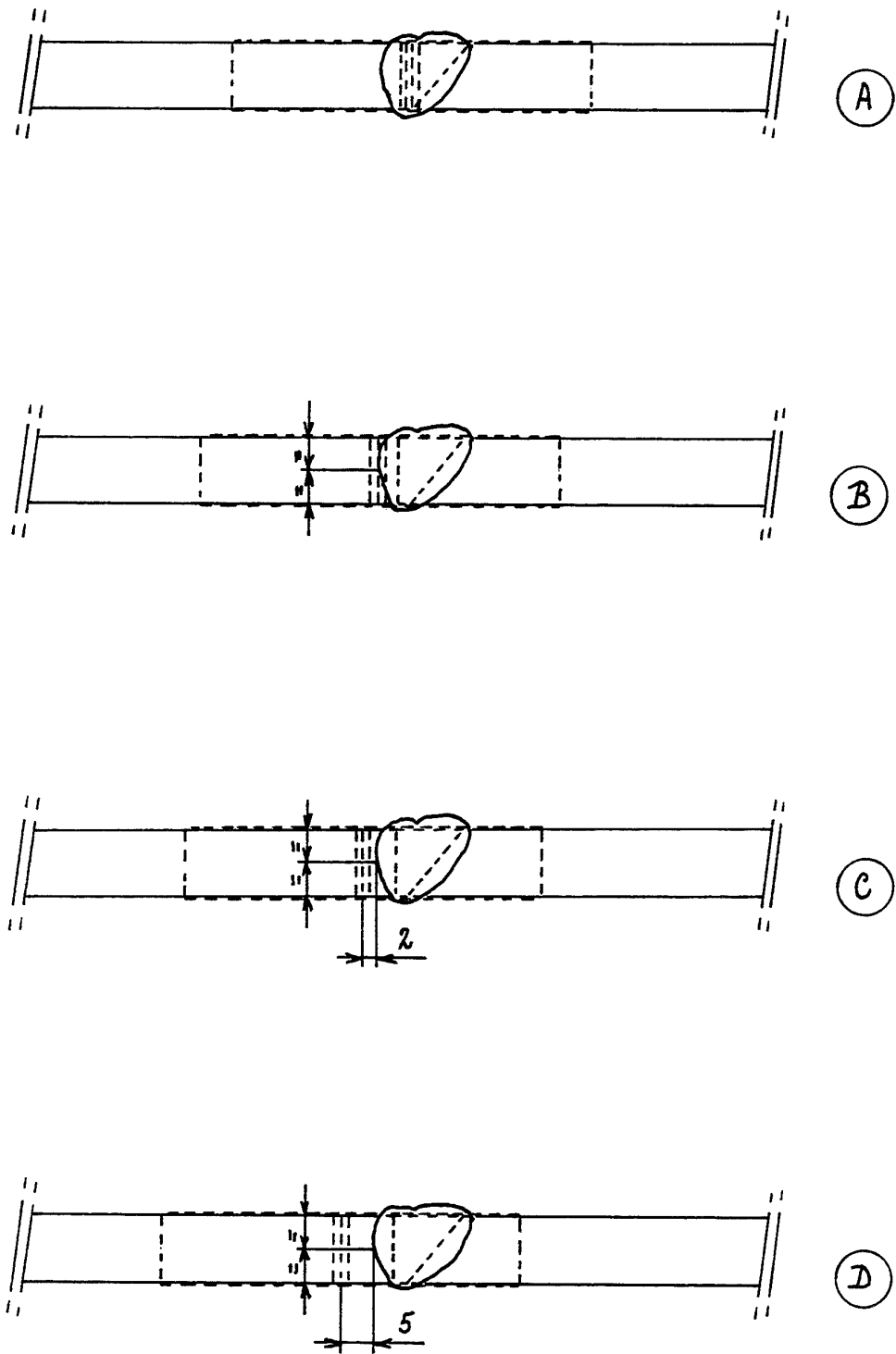
Nr.	Figuur	Proefstuk	Code	Opmerking
1	2-1/2-2	1 trekstaaf vol-lasmetaal	A1-1	Type A
2	2-1	1 macro-doorsnede las	A1-2	
3	2-1/2-2	2 trekstaven basismateriaal - dwars	A1-3 A1-4	Type A Lengterichting $\perp$ w.r.
4	2-1/2-2	2 dwars-trekstaven	A1-5 A1-6	Type B Trekstaven over de las
5	2-1/2-3	3 kerfslagstaven, kerf in las	A1-7 ÷ A1-9	Type A in figuur 2-3
		3 kerfslagstaven, kerf op FL	A1-10 ÷ A1-12	Type B in figuur 2-3
		3 kerfslagstaven, kerf op FL+2	A1-13 ÷ A1-15	Type C in figuur 2-3
		3 kerfslagstaven, kerf op FL+5	A1-16 ÷ A1-18	Type D in figuur 2-3
6	2-1/2-4	1 standaard CTOD-staaf, kerf op FL	A1-20	Type B in figuur 2-3 "prepressen"

PLAATSTROOK B1

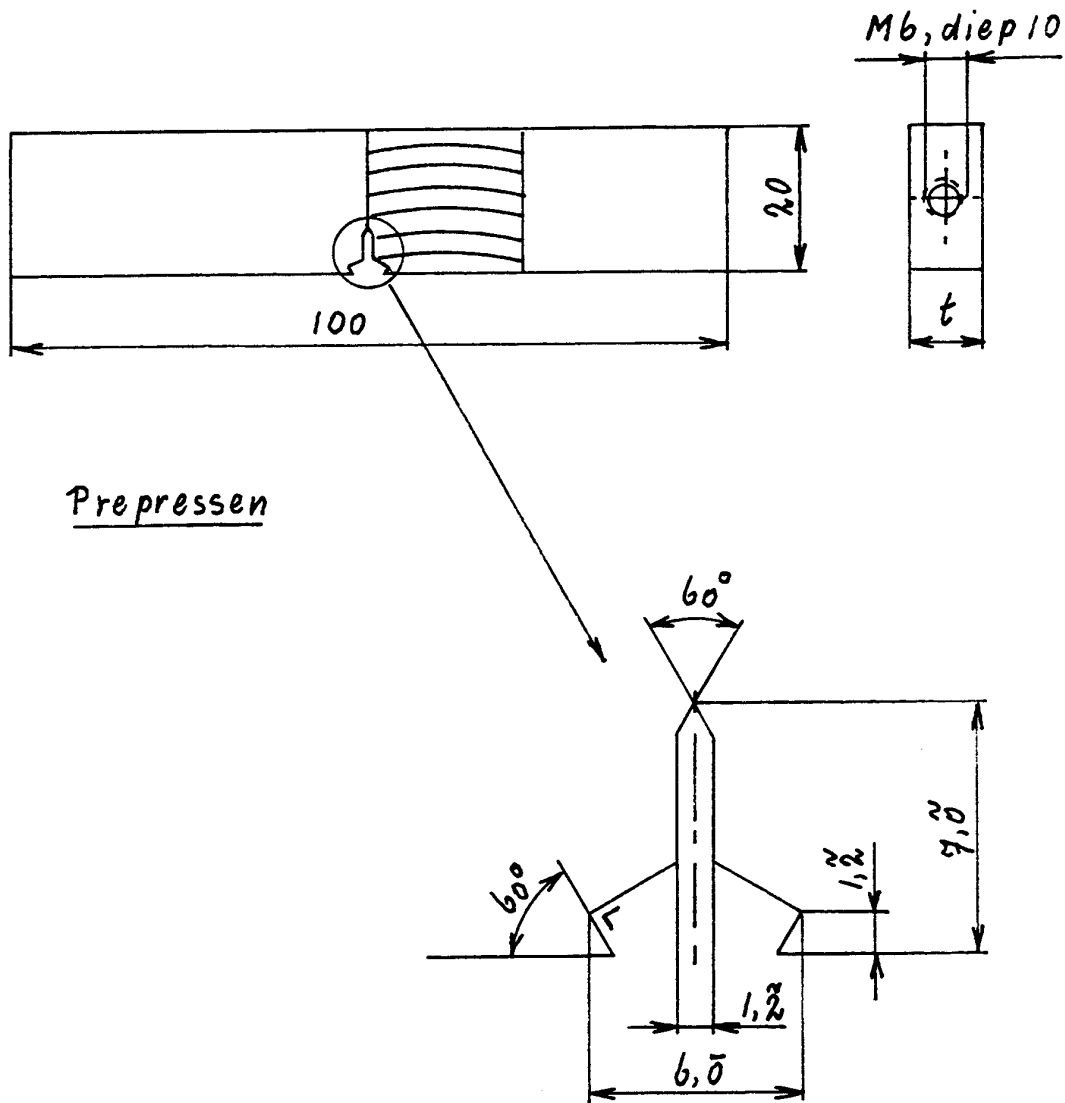
Nr.	Figuur	Proefstuk	Code	Opmerking
7	2-1	1 macro-doorsnede las	B1-19	
8	2-1/2-2	1 trekstaaf vol-lasmetaal	B1-21	Type A
9	2-1/2-4	2 standaard CTOD-staven, kerf op FL	B1-22 B1-23	Type B in figuur 2-3 "prepressen"
10	2-1/2-5	5 CTOD-staven, kerf op FL (dynamische breuktaaiheid)	B1-24 ÷ B1-28	Type B in figuur 2-3 "prepressen"



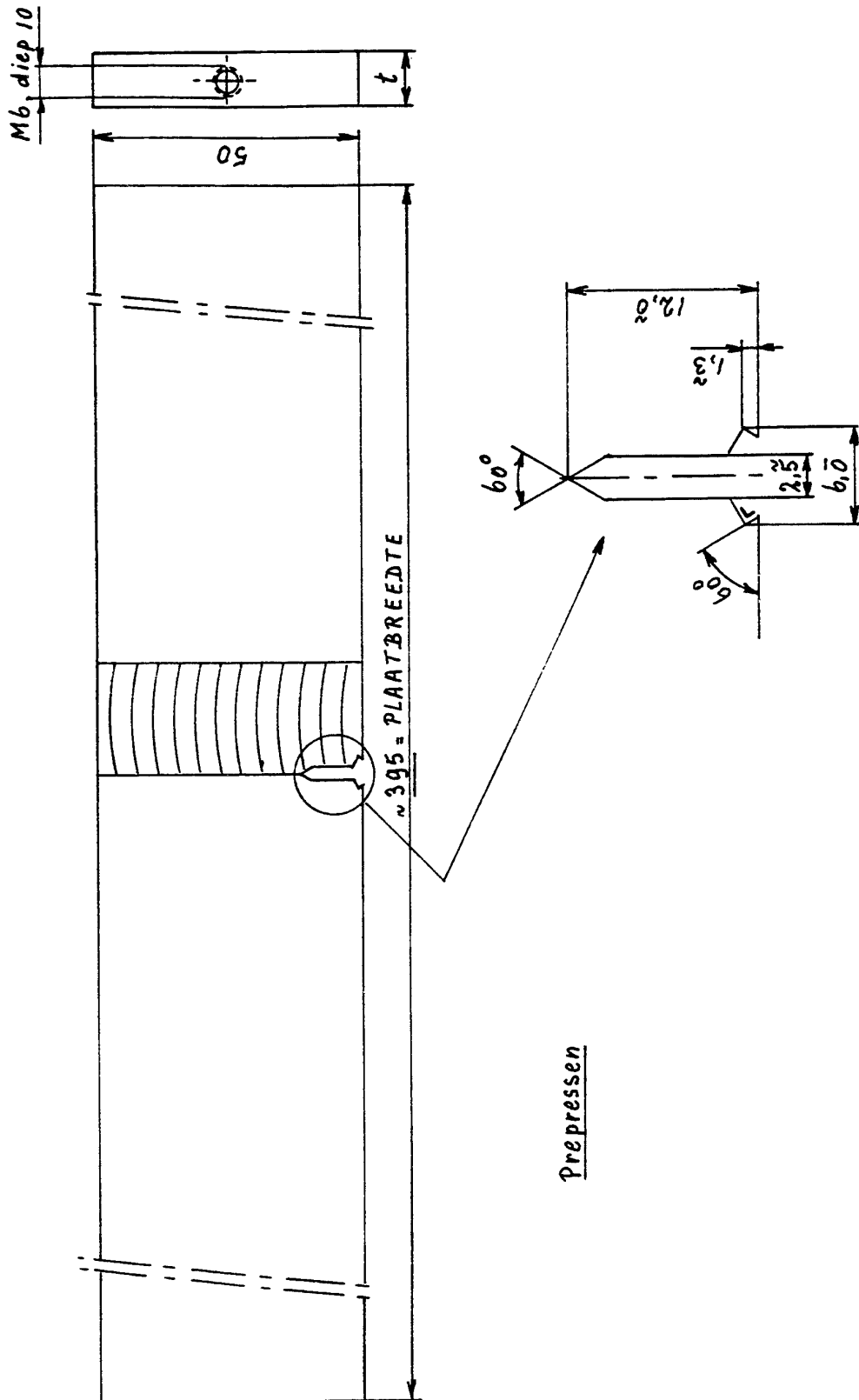
Figuur 2-2 Trekstaven voor quasistatische beproeving bij kamertemperatuur.



Figuur 2-3 Posities van uitneming van kerfslagstaven.



Figuur 2-4 Standaard CTOD 3-punts buigstaaf (2BxB) met door de dikte kerf op de smeltlijn voor quasistatische beproeving.



Figuur 2-5 CTOD 3-punts buigstaaf (5BxB) met door de dikte kerf op de smeltlijn voor dynamische beproeving.

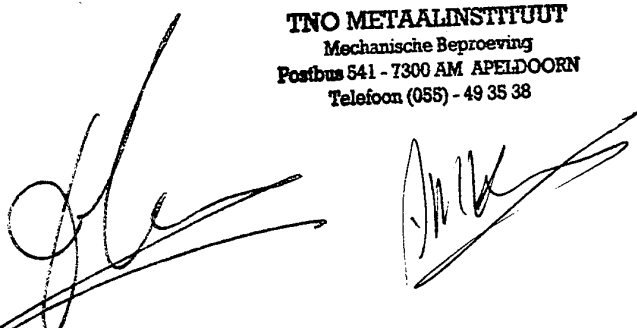
**BIJLAGE 3**

*Data sheets* en registraties van quasistatische CTOD-proeven

CTOD data sheet

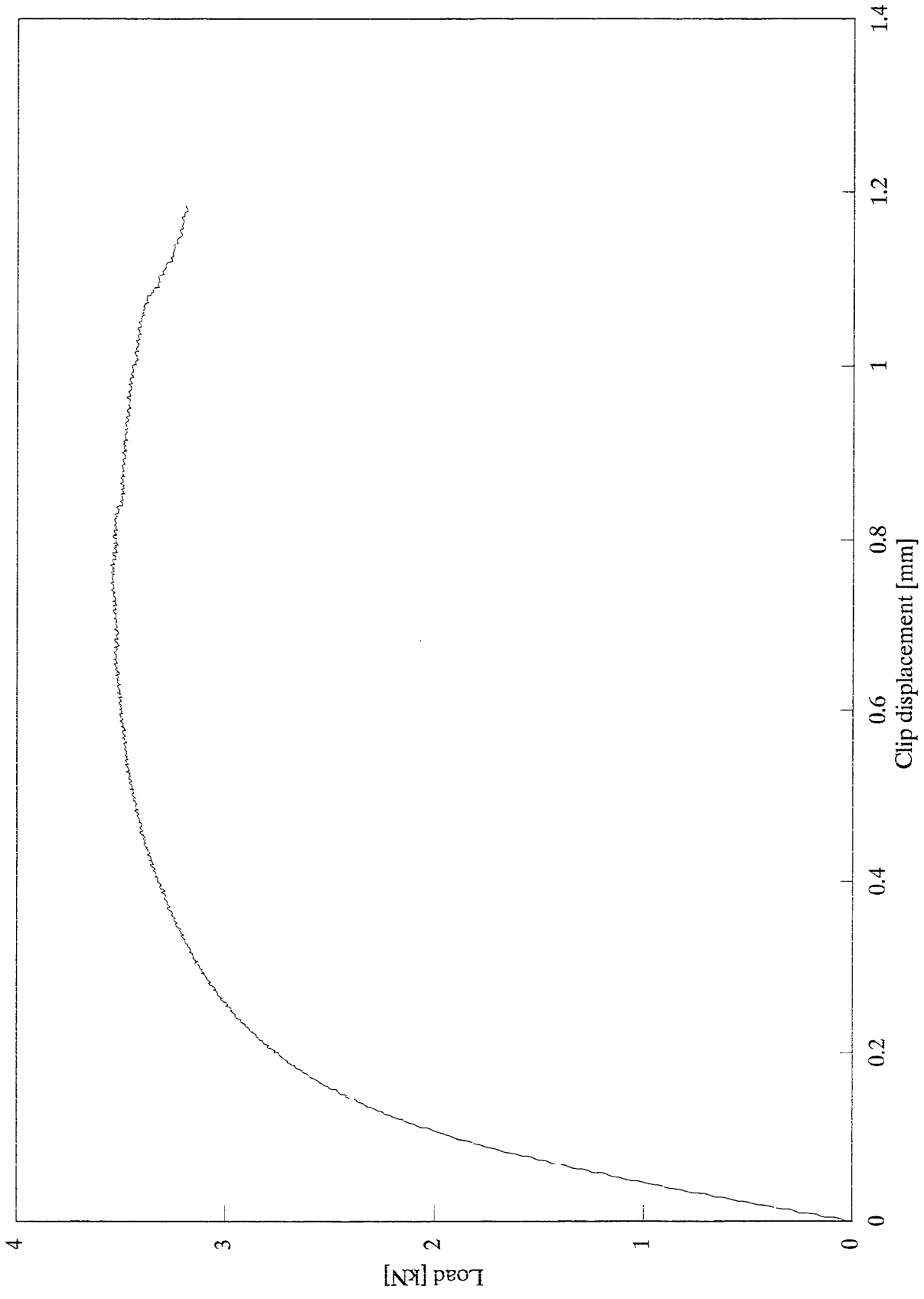
ON:011571046

Specimen No.		A1-20	B1-22	B1-23
<b>Fatigue pre-cracking</b>				
- $R_e$ (yield strength)	N/mm <sup>2</sup>	193	193	193
- $R_m$ (tensile strength)	N/mm <sup>2</sup>	331	331	331
- R (fatigue force ratio)		0.1	0.1	0.1
- $F_f$ (final fatigue force)	kN	1.0	1.0	1.0
- N (number of cycles.10 <sup>3</sup> )		190.0	104.9	90.0
- $a_n$ (crack length front surface)	mm	9.48	10.34	10.21
- $a_m$ (crack length back surface)	mm	9.61	10.41	10.16
- $ a_n - a_m  / (a_n + a_m) / 2 < 0.15$		0.01	0.01	0.00
<b>Bend test</b>				
- $R_{e(t)}$ (yield strength at test temp.)	N/mm <sup>2</sup>	200	200	200
- S (loading span)	mm	81	81	81
- z (distance clip to surface)	mm	-1.00	-1.00	-1.00
- T (test temperature)	°C	-5	-5	-5
- B (specimen thickness)	mm	9.180	9.620	9.590
- W (effective width of specimen)	mm	20.15	20.14	20.09
- $a_1$ (crack length)	mm	9.64	10.49	10.34
- $a_2$ (crack length)	mm	9.94	10.74	10.62
- $a_3$ (crack length)	mm	10.08	10.90	10.71
- $a_4$ (crack length)	mm	10.17	10.98	10.79
- $a_5$ (crack length)	mm	10.17	11.02	10.81
- $a_6$ (crack length)	mm	10.17	11.02	10.83
- $a_7$ (crack length)	mm	10.13	11.00	10.74
- $a_8$ (crack length)	mm	10.04	10.90	10.64
- $a_9$ (crack length)	mm	9.78	10.55	10.38
- $a_0 = \{(a_1 + a_9) / 2 + (a_2 + \dots + a_8)\} / 8$	mm	10.05	10.89	10.69
- $(a_i - a_{i+j}) / a_0 < 0.10$		0.05	0.05	0.05
- $a_0 / W$		0.50	0.54	0.53
- f ( $a_0 / W$ )		2.65	3.04	2.95

Specimen No.		A1-20	B1-22	B1-23
- $\Delta a_1$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_2$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_3$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_4$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_5$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_6$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_7$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_8$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a_9$ (stable crack extension)	mm			
- $\Delta a = \{(\Delta a_1 + \Delta a_9) / 2 + (\Delta a_2 + \dots + \Delta a_8)\} / 8$	mm			
<b>Clip gauge displacement</b>				
- $V_c$ ( $V_p$ when $\Delta a < 0.2$ mm)	mm			
- $V_u$ ( $V_p$ when $\Delta a > 0.2$ mm)	mm			
- $V_m$ ( $V_p$ for fully plastic behaviour)	mm	0.594	0.187	0.142
<b>Applied force</b>				
- $F_c$ (F when $\Delta a < 0.2$ mm)	kN			
- $F_u$ (F when $\Delta a > 0.2$ mm)	kN			
- $F_m$ (F for fully plastic behaviour)	kN	3.55	2.66	2.74
<b>Critical CTOD values</b>				
- $\delta_c$ (onset of brittle crack extension or pop-in when $\Delta a < 0.2$ mm)	mm			
- $\delta_u$ (onset of brittle crack extension or pop-in when $\Delta a > 0.2$ mm)	mm			
- $\delta_m$ (first attainment of a maximum force plateau for fully plastic behaviour)	mm	0.210	0.069	0.058
<b>Remarks:</b>				
<p style="text-align: center;"> <b>TNO METAALINSTITUUT</b>            Mechanische Beproeving            Postbus 541 - 7300 AM APELDOORN            Telefoon (055) - 49 35 38         </p> 				

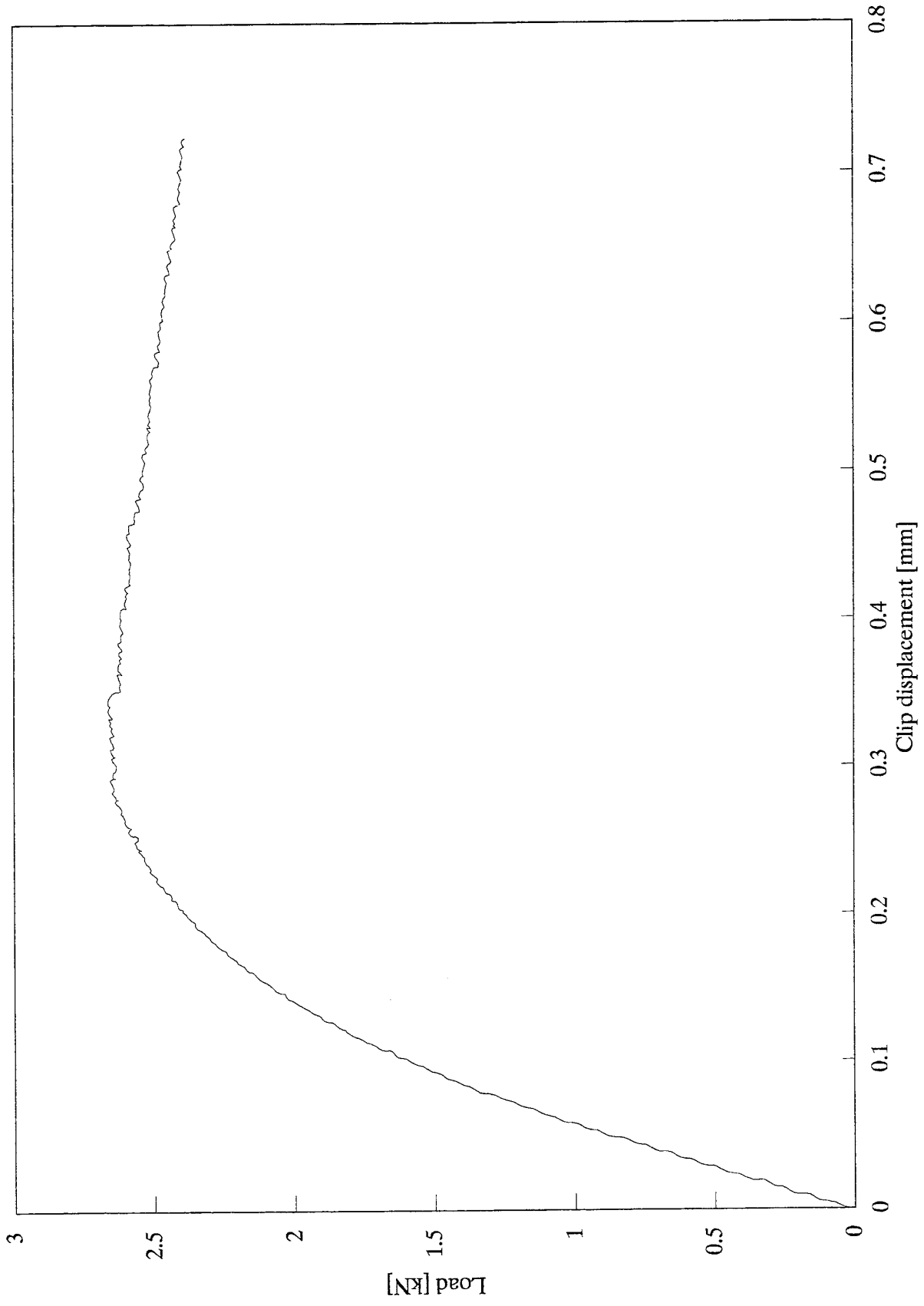
A1-20

IPL--TNO



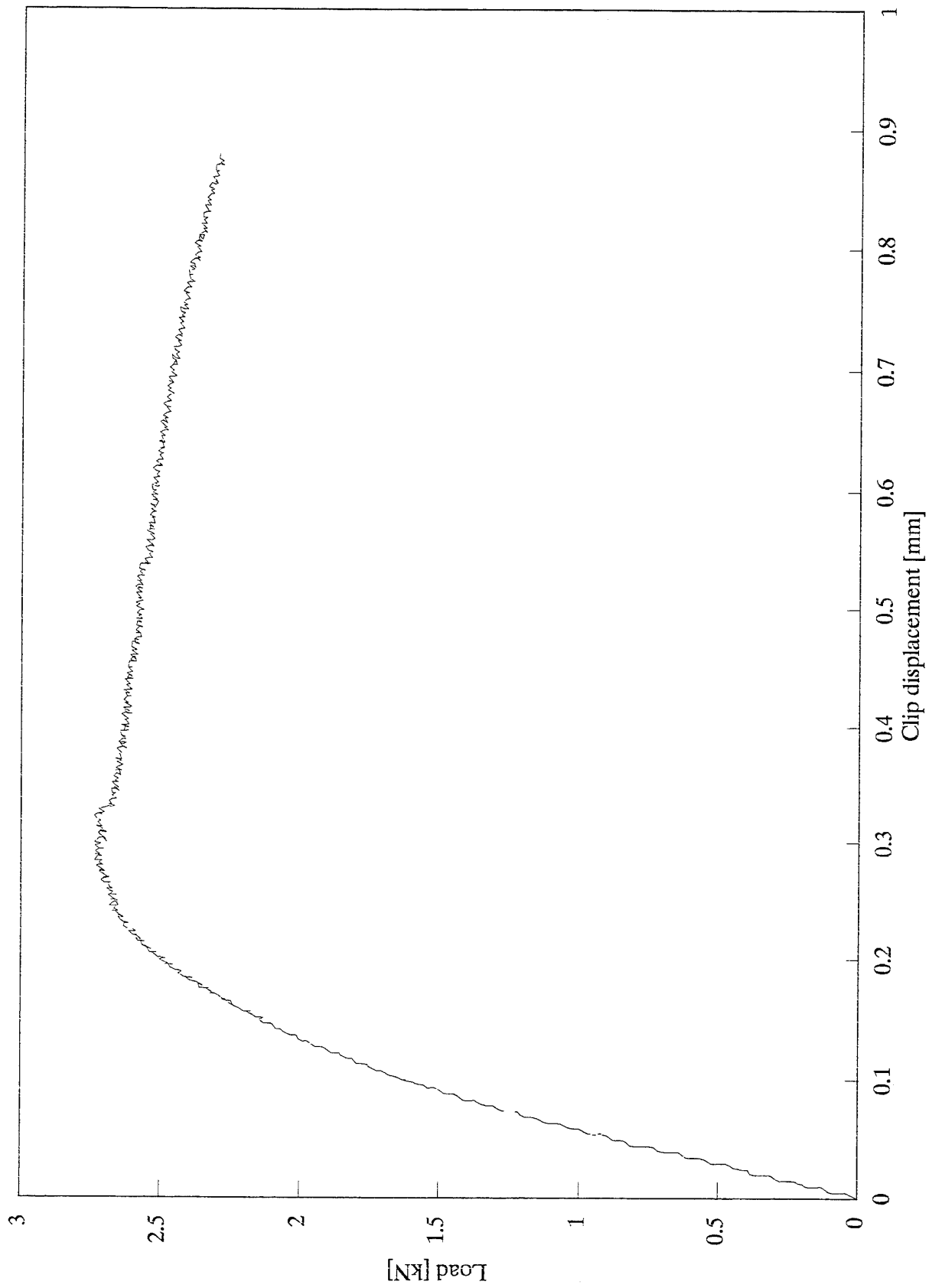
B1-22

IPL-TNO



B1-23

IPL-TNO



**BIJLAGE 4**

*Data sheets van dynamische CTOD-proeven*

## TNO Metaalinstituut

### Proefstuk B1-24

X-coef R1	-108 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R2	111 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R3	143 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef Rb	113 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef clip	-317.0 $\mu\text{rek}/0.1\text{mm}$
Temp	-5 $^{\circ}\text{C}$
Clip No.	1
massa	135.5 kg
Valhoogte	2 m
Oplegafst.	254 mm
Re stat.	200 MPa
Re dyn.	240 MPa
B	9.62 mm
W	50.01 mm
F fat. (S=4W)	2.8 kN
N	105.6 x1000 cycles
a	15.45 mm
a/W	0.309
f(a/W)	1.556
Vg	0.448 mm
Ve	0.239 mm
Vp	0.209 mm
Load max	11.28 kN
Load ber.	10.81 kN
Load gem.	11.04 kN
t	283 $\mu\text{s}$
Plast. opp.	1.12 Nm
K(F gem.)	41 MPa $\sqrt{\text{m}}$
dK/dt	1.4E+05 MPa $\sqrt{\text{m}}.\text{s}^{-1}$
ctod	0.146 mm
K delta c	74 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc)	63 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc) int.	53 MPa $\sqrt{\text{m}}$

### afmetingen vermoeiingsscheur

positie	scheurlengte
an	14.78 mm
am	15.05 mm
a1	14.86 mm
a2	15.23 mm
a3	15.41 mm
a4	15.53 mm
a5	15.65 mm
a6	15.66 mm
a7	15.61 mm
a8	15.49 mm
a9	15.12 mm

## TNO Metaalinstituut

### Proefstuk B1-25

X-coef R1	-108 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R2	111 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R3	143 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef Rb	113 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef clip	-317.2 $\mu\text{rek}/0.1\text{mm}$
Temp	-5 °C
Clip No.	2a
massa	135.5 kg
Valhoogte	2 m
Oplegafst.	254 mm
Re stat.	200 MPa
Re dyn.	240 MPa
B	9.63 mm
W	49.99 mm
F fat.(S=4W)	2.8 kN
N	169.2 x1000 cycles
a	15.51 mm
a/W	0.310
f(a/W)	1.562
Vg	0.439 mm
Ve	0.249 mm
Vp	0.190 mm
Load max	11.58 kN
Load ber.	11.25 kN
Load gem.	11.42 kN
t	298 $\mu\text{s}$
Plast. opp.	0.99 Nm
K(F gem.)	42 MPa $\sqrt{\text{m}}$
dK/dt	1.4E+05 MPa $\sqrt{\text{m}}.\text{s}^{-1}$
ctod	0.139 mm
K delta c	73 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc)	63 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc) int.	53 MPa $\sqrt{\text{m}}$

### afmetingen vermoeiingsscheur

positie	scheurlengte
an	15.06 mm
am	14.45 mm
a1	15.18 mm
a2	15.64 mm
a3	15.78 mm
a4	15.85 mm
a5	15.77 mm
a6	15.65 mm
a7	15.44 mm
a8	15.13 mm
a9	14.53 mm

## TNO Metaalinstituut

### Proefstuk B1-26

X-coef R1	-108 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R2	111 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R3	143 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef Rb	113 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef clip	-315.8 $\mu\text{rek}/0.1\text{mm}$
Temp	-5 °C
Clip No.	2b
massa	135.5 kg
Valhoogte	2 m
Oplegafst.	254 mm
Re stat.	200 MPa
Re dyn.	240 MPa
B	9.61 mm
W	49.99 mm
F fat.(S=4W)	2.8 kN
N	95 x1000 cycles
a	15.59 mm
a/W	0.312
f(a/W)	1.568
Vg	0.422 mm
Ve	0.253 mm
Vp	0.169 mm
Load max	11.63 kN
Load ber.	11.30 kN
Load gem.	11.47 kN
t	278 $\mu\text{s}$
Plast. opp.	0.72 Nm
K(F gem.)	43 MPa $\sqrt{\text{m}}$
dK/dt	1.5E+05 MPa $\sqrt{\text{m}}.\text{s}^{-1}$
ctod	0.130 mm
K delta c	70 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc)	61 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc) int.	50 MPa $\sqrt{\text{m}}$

### afmetingen vermoeiingsscheur

positie	scheurlengte
an	14.61 mm
am	15.45 mm
a1	14.67 mm
a2	15.09 mm
a3	15.35 mm
a4	15.59 mm
a5	15.79 mm
a6	15.94 mm
a7	15.99 mm
a8	15.87 mm
a9	15.48 mm

## TNO Metaalinstituut

### Proefstuk B1-27

X-coef R1	-108 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R2	111 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R3	143 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef Rb	113 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef clip	-315.8 $\mu\text{rek}/0.1\text{ mm}$
Temp	-5 °C
Clip No.	2b
massa	135.5 kg
Valhoogte	2 m
Oplegafst.	254 mm
Re stat.	200 MPa
Re dyn.	240 MPa
B	9.63 mm
W	50.00 mm
F fat.(S=4W)	2.8 kN
N	121.3 x1000 cycles
a	15.43 mm
a/W	0.309
f(a/W)	1.555
Vg	0.425 mm
Ve	0.250 mm
Vp	0.175 mm
Load max	11.72 kN
Load ber.	11.38 kN
Load gem.	11.55 kN
t	304 $\mu\text{s}$
Plast. opp.	0.82 Nm
K(F gem.)	42 MPa $\sqrt{\text{m}}$
dK/dt	1.4E+05 MPa $\sqrt{\text{m}}.\text{s}^{-1}$
ctod	0.134 mm
K delta c	71 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc)	62 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc) int.	51 MPa $\sqrt{\text{m}}$

### afmetingen vermoeiingsscheur

positie	scheurlengte
an	14.96 mm
am	14.85 mm
a1	15.00 mm
a2	15.27 mm
a3	15.39 mm
a4	15.49 mm
a5	15.56 mm
a6	15.62 mm
a7	15.63 mm
a8	15.47 mm
a9	14.97 mm

## TNO Metaalinstituut

### Proefstuk B1-28

X-coef R1	-108 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R2	111 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef R3	143 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef Rb	113 $\mu\text{rek}/\text{kN}$
X-coef clip	-315.8 $\mu\text{rek}/0.1\text{ mm}$
Temp	-5 °C
Clip No.	2b
massa	135.5 kg
Valhoogte	2 m
Oplegafst.	254 mm
Re stat.	200 MPa
Re dyn.	240 MPa
B	9.61 mm
W	50.01 mm
F fat.(S=4W)	2.8 kN
N	92.3 x1000 cycles
a	15.22 mm
a/W	0.304
f(a/W)	1.538
Vg	0.420 mm
Ve	0.246 mm
Vp	0.174 mm
Load max	11.77 kN
Load ber.	11.43 kN
Load gem.	11.60 kN
t	314 $\mu\text{s}$
Plast. opp.	0.99 Nm
K(F gem.)	42 MPa $\sqrt{\text{m}}$
dK/dt	1.3E+05 MPa $\sqrt{\text{m}}.\text{s}^{-1}$
ctod	0.133 mm
K delta c	71 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc)	62 MPa $\sqrt{\text{m}}$
K(Jc) int.	53 MPa $\sqrt{\text{m}}$

### afmetingen vermoeiingsscheur

positie	scheurlengte
an	14.71 mm
am	14.83 mm
a1	14.77 mm
a2	15.06 mm
a3	15.22 mm
a4	15.31 mm
a5	15.35 mm
a6	15.37 mm
a7	15.37 mm
a8	15.26 mm
a9	14.87 mm

## REPORT DOCUMENTATION PAGE

(mod-nl)

<b>1. Defense report number (Mod-NL)</b> RP 96-303	<b>2 Recipient's accession number</b>	<b>3. Performing organization report number</b> MI-95-0353/KON/SCI
<b>4. Project/task/work unit no.</b> 011571046	<b>5. Contract number</b> A93/KM/138	<b>6. Report date</b> 04-12-1995
<b>7. Number of pages</b> 52	<b>8. Number of references</b> 5	<b>9. Type of report and dates covered</b> Final report 1995
<b>10. Title and subtitle</b> Breukweerstand van gelast aluminium AIMg4,5Mn voor toepassing in oppervlakteschepen. (Fracture resistance of welded aluminum AIMg4.5Mn for application in surface ships)		
<b>11. Author(s)</b> C. Koning		
<b>12. Performing organization name(s) and address(es)</b> TNO Metals Research Institute Laan van Westenenk 501, 7334 DT APELDOORN, The Netherlands		
<b>13. Sponsoring/monitoring agency name(s) and address(es)</b> TNO - Division of National Defence Research Schoemakerstraat 97, P.O. Box 6006, 2600 JA DELFT, The Netherlands		
<b>14. Supplementary notes</b> TNO are the initials (in Dutch) of the Netherlands Organization for Applied Scientific Research Postal address: P.O. Box 6000, 2600 AJ Delft, The Netherlands The classification designation "Ongerubrceerd" is equivalent to "Unclassified".		
<b>15. Abstract (maximum 200 words, 1044 byte)</b> The most important requirement for a constructional material from the viewpoint of safety is avoidance of brittle fracture. Especially for the combination of lower temperature and high strain rate during explosive blast loading, initiation and propagation of brittle fracture can occur in ship's material with plate thicknesses of 6 + 15 mm. These plates are being used for the fabrication of surface ships of the Royal Dutch Navy. In this report the fracture resistance was determined of welded aluminum AIMg4.5Mn (5083 series) with a plate thickness of 10 mm. The results of Charpy tests at -5 °C of the weldment show that the lowest notch toughness was measured for Charpy specimens with the notch on the fusion line. The results of quasistatic CTOD tests at -5 °C on B x 2B 3-point bending specimens with through thickness cracks on the fusion line, ratio crack length/ width a/W ≈ 0.5, show a lowest CTOD of 0.06 mm. From these results it is obvious that the weldment may have a low fracture toughness at -5 °C. The results of dynamic CTOD tests at -5 °C on B x 5B 3-point bending specimens with through thickness cracks on the fusion line, ratio crack length/ width a/W ≈ 0.3, are: The lowest CTOD is 0.13 mm, the average K (J <sub>0</sub> ) is 52 MPa√m, with a lowest value of 50 MPa√m. The results of the dynamic CTOD tests show that the fracture toughness of the weldment in AIMg4.5Mn investigated, is not strain rate sensitive.		
<b>16. Descriptors</b> aluminum weldment properties ductility		<b>Identifiers</b> impact tests crack initiation
<b>17a. Security classification (of report)</b> Ongerubrceerd		<b>17b. Security classification (of page)</b> Ongerubrceerd
<b>18. Distribution/availability statement</b> Unlimited Distribution/Subject to approval MOD-NL		<b>17c. Security classification (of abstract)</b> Ongerubrceerd
		<b>17d. Security classification (of titles)</b> Ongerubrceerd

**DISTRIBUTIELIJST**

DMKM/SCHEBO		3 volledige rapporten
HWO-KM		1 volledig rapport
Bureau TNO-DO		1 volledig rapport
Bibliotheek KMA		1 volledig rapport
Koning	TNO-MI	1 volledig rapport
Liefting	TNO-MI	1 volledig rapport
Lont	TNO-MI	1 volledig rapport
Archief	TNO-MI	1 volledig rapport
DWOO		1 volledig rapport
HWO-CO		1 beperkt rapport
HWO-KL		1 beperkt rapport
HWO-KLu		1 beperkt rapport