

INLEIDING BROSE BREUK IN STAALCONSTRUCTIE

Prof. Ir. J.J.W. Nibbering

Samenvatting

Verschil tussen splijten en afschuiven. Invloed van de temperatuur, de spanningstoestand, de belastingssnelheid en de voorgeschiedenis (verstevenen, verouderen) op de taaiheid. Ontstaan en voortplanten van brose breuken in gekerfde platen en constructies. Laag- en hoogspanningsbreuken. Relatief belang van door lassen veroorzaakte verschijnselen (lasspanningen, lasfouten, waterstofopname, materiaal-omzettingen, korrelvergroving). Onderzoekingen van Soete, Mylonas en Wells. Invloed van vermoeiing. Proefmethoden (Robertson, Pellini, Charpy, wide-plate, C.O.D. en valproeven).

*"Men kan het ijzer breken,
als het koud is"*

1. Inleiding

Wanneer constructies plotseling en onverwacht bezwijken, heeft men meestal met een brose breuk te doen. Een beroemd voorbeeld is de zgn. Vierendeelbrug over het Albertkanaal in Hasselt, die bezweek één jaar nadat hij in gebruik genomen was. Dit gebeurde in 1938. De brug was bijzonder goed ontworpen en zorgvuldig gebouwd. Het was een van de eerste stalen bruggen in Europa, die niet geklonken maar gelast waren. Het ongeluk gebeurde bij koud weer toen de brug slechts licht belast was. Andere bruggen van hetzelfde type hadden zich tot dan toe uitstekend gehouden.

Naarmate de tijd voortschreed, verdween de aanvankelijk grote bezorgdheid. Blijkbaar was de gebeurtenis toch een uitzondering en, zoals dit zo vaak gebeurt bij rampen, een gevolg van het toevallige samengaan van een aantal ongunstige omstandigheden en factoren. Maar deze keer was men toch te optimistisch want gedurende de koude januarimaand van 1940 ontwikkelden zich grote scheuren in twee andere Vierendeelbruggen. Het mysterieuze karakter van de zgn. brose breuken kwam bij een van deze bruggen extra tot uiting toen enige uren ná het ontstaan van de scheuren een locomotief over de brug reed zonder dat deze bezweek.

Door deze gebeurtenissen was het vertrouwen in het lassen als verbindingstechniek voor stalen constructies ernstig geschokt. Het heeft ertoe geleid dat in België een sterke voorkeur ontstond voor betonconstructies boven staal.

Niet lang na deze plaatselijke en toentertijd door de oorlog niet erg bekend geworden bruggenkwaal ontstond er een epidemie van breuken in schepen. De slachtoffers waren vooral de zgn. Liberties en T2-tankers die tijdens de oorlog in de VS in serie werden gebouwd. De massafabricage van deze schepen was mogelijk gemaakt door te lassen in plaats van te klinken. Toen de eerste scheuren en breuken in de Liberties ontstonden, schreef men die toe aan de oorlogssituatie. Veel schepen werden dieper geladen dan normaal en moesten vaak op volle kracht in slecht weer in konvooi varen. Op het eind van 1942 waren van de 500 in de vaart zijnde Liberty-schepen er tien ernstig gescheurd of gebroken. Het eerder gebruikte woord epidemie moet dus niet te letterlijk worden genomen.

Op 10 januari 1943 werd de scheepsbouwwereld op-

geschrikt door een raadselachtige gebeurtenis. Een T2-tanker die nog nooit op zee geweest was en rustig aan de kade lag, brak in tweeën (zie fig. 1).

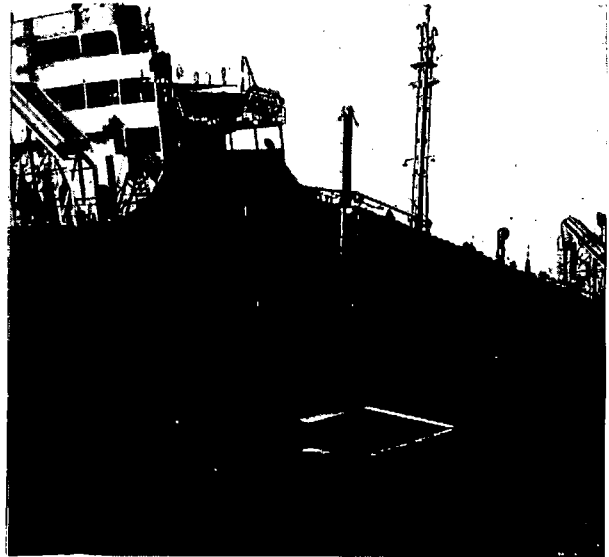


Fig. 1. De plotselinge en luidruchtige breuk in het s.s. Schenectady, liggend aan de kade op 10 januari 1943, vormde in feite het startschot voor een omvangrijke bestudering van het brose-breuk-probleem in de scheepsbouw.

De knal was tot op enkele kilometers ver te horen en was het startschot voor onderzoekingen van een omvang zoals voordien nog niet vertoond was. Tientallen miljoenen dollars werden besteed aan de bestudering van het brose-breuk-probleem. Men heeft het verschijnsel daardoor binnen één à twee jaar redelijk onder controle kunnen krijgen. Eén ding stond als een paal boven water: het lassen moest de bron van alle ellende zijn omdat in geklonken schepen maar zelden breuken voorkwamen.

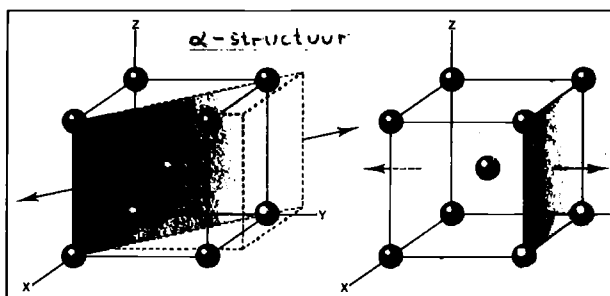
Het slechte Amerikaanse laswerk was mede een gevolg van de slechte lasbaarheid van het gebruikte scheepsstaal. Het bevatte te veel koolstof: 0,24% in plaats van de 0,18% die in Europa min of meer gebruikelijk was. Veel scheurtjes ontstonden tijdens en vooral ná het lassen in de aan de las grenzende overgangszone. Later is ingezien dat het materiaal juist in de directe omgeving van defecten

van lagere kwaliteit kan zijn dan elders. Wanneer een defect dan ook nog scherp is, vormt het een ideale beginplaats voor een brosse breuk.

De lasspanningen blijken eveneens een rol te spelen. Zij zijn direct verantwoordelijk voor vele kleine krimp-scheurtjes in las- en overgangszone, maar spelen ook een rol bij het ontstaan en voortplanten van brosse breuken. Het belangrijkste verschil tussen gelaste en geklonken schepen in verband met brosse breken, is overigens nog niet genoemd. Een gelast schip vormt een ononderbroken geheel, terwijl een geklonken schip uit "losjes" aan elkaar verbonden platen en profielen bestaat. In een gelast schip kan een eenmaal ontstane breuk zich onbelemmerd voortplanten. In een geklonken schip komt de breuk in negen van de tien gevallen tot stilstand aan de rand van de plaat waarin hij is ontstaan. "Overspringen" naar een volgende plaat vereist veel energie, die zolang de breuk geen grote lengte heeft bereikt, niet voorhanden is. Toen men dit besepte, is men in gelaste schepen "crack arresters" gaan inbouwen die het voortplanten van een breuk tegenhouden en die eenvoudig bestonden uit geklonken platen. Zij werden vooral bij de aansnijdingen van dek- en zijbeplating en zij- en bodembeplating aangebracht.

2. Kenmerken van brosse breuken

Bij staal wordt het woord brosse dikwijls gebezigd wanneer het uiterlijk van de breuk glinsterend, kristallijn is. Men behoort dan van een splijtvlak te spreken; dit in tegenstelling tot een schuifbreuk, (fig. 2).

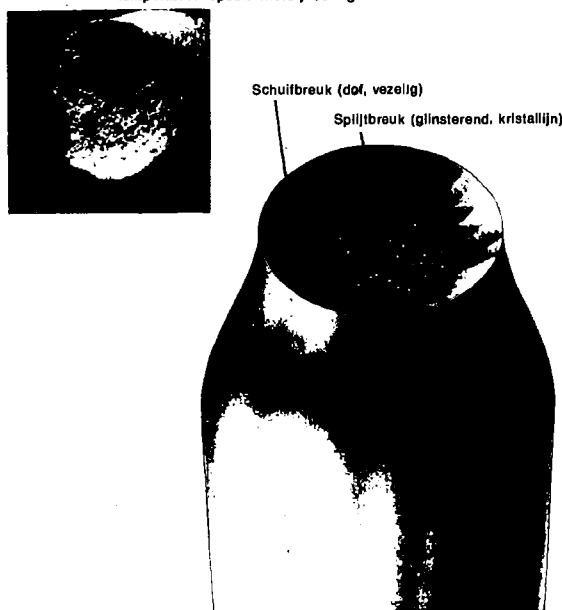


Boven: Fig. 2. Bij een splijtbreuk worden de ijzerkristallen als het ware van elkaar gespleten. Een schuifbreuk ontstaat doordat kristalvlakken langs elkaar schuiven tot de samenhang wordt verbroken. De grijze vlakken geven in bovenstaande figuren resp. het splijtvlak van afschuiving (links) en het splijtvlak (rechts) aan.

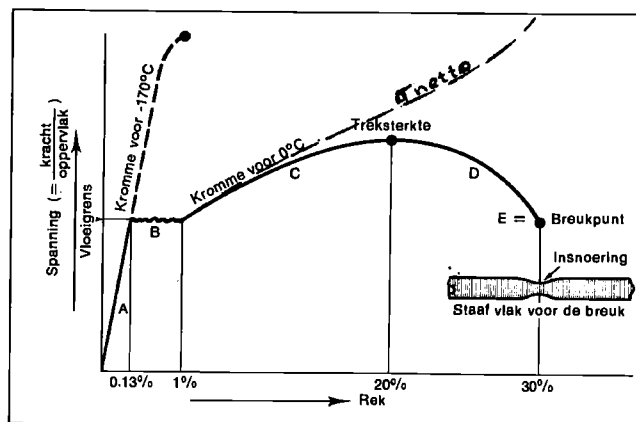
Bij schuifbreuken wordt de samenhang van het materiaal door (te grote) afschuiving verbroken. Het uiterlijk is dan dof en vezelachtig en het breukvlak maakt veelal een hoek van ongeveer 45° met de langsrichting (fig. 4). In het element koolstof vindt men extreme voorbeelden van splijt- en schuifbreuken, resp. bij diamant en grafiet.

Wanneer men de niet mooie uitdrukking "vervormingsloze breuk" hoort, dan mag men die terecht vervangen door "brosse breuk". We hebben al gezien dat het omgekeerde in de spreektaal niet opgaat. Bros behoort te staan tegenover taai. We moeten hierbij niet in de eerste plaats denken aan veerkrachtig; rubber is eigenlijk niet taai, maar taai-taai wel en staal evenzeer. Dit wordt toegelicht in fig. 3. Hierin komt de grote invloed van de temperatuur tot uiting.

Fig. 4. Het breukvlak van een trekstaaf zoals dat dikwijls te zien is. Het breukvlak kan ook geheel kristallijn of geheel vezelig zijn. De temperatuur speelt hierbij een grote rol.



Onder: Fig. 3. In dit diagram zijn de trekkrampen weergegeven, die worden verkregen door gladde staaf in een trekbank stuk te trekken. In gebied A is de vervorming evenredig met de belasting en draagt de staaf zich elastisch. Daarna treedt gebied B) zgn. vloeien op en schuiven de kristallen langs elkaar, zonder dat de samenhang wordt verbroken. Bij normaal constructiestaal behoort daarvoor de belasting niet eens te worden verhoogd. Hierna verstevigt het materiaal en is wel een hogere belasting nodig om de staaf verder te kunnen uitrekken (gebied C). In gebied D neemt de belasting af, doordat zich een insnoering vormt waar uiteindelijk de breuk optreedt.



Het uiterlijk van de breuk is dikwijls als in fig. 4 weergegeven, maar kan ook vrijwel geheel kristallijn of vezelig zijn. Maar zelfs bij een overwegend kristallijn uiterlijk kan de rek tot breuk nog best 20 tot 30% bedragen. De breuk is duidelijk taai, in tegenstelling tot die bij een geheel ander materiaal, glas, dat terecht brosse wordt genoemd, hoewel het nooit kan splijten. Dit komt doordat het geen kristalstructuur bezit.

Het meest verraderlijke aspect van de klassieke brosse breuken was dat zij konden ontstaan en voortlopen bij lage belasting. Men sprak daarom van "laagspanningsbreuken". Al even vreemd was dat het jarenlang niet gelukt is dergelijke breuken in laboratoria te laten ontstaan. Na voorbereidend werk van onder meer Soete in België en Mylonas in de VS is het tenslotte in 1956 Wells en Greene in Engeland gelukt laagspanningsbreuken

bij normale temperaturen in gelaste platen te veroorzaken.

Een laagspanningsbreuk is uiteraard altijd een brosse breuk in de zin van vervormingsloze breuk. Maar men noemde de klassieke breuken toch vooral bros omdat zij zich bijna explosief met enorme snelheid voortplantten (tot 2 km/sec!). Het uiterlijk van die breuken was nauwelijks kristallijn. Het meest karakteristiek waren de oneffenheden, die in de richting van de oorsprong van de breuk wezen (fig. 5).

Voor de onderzoekers betekende dit een groot gemak omdat de breukvlakken dikwijls verroest waren en de breuken gecompliceerd. Het verschil tussen deze breukvlakken en de mooie gelijkmatige kristallijne breukvlakken wordt voor een deel bepaald door de temperatuur. Hoe hoger de temperatuur, hoe meer een breuk neiging heeft om te stoppen. De "bijna"-stopplaatsen zijn de zgn. chevrons. Vandaar de naam chevronbreuken.



Fig. 5a. Overwegend kristallijn breukvlak met lichte chevrons.

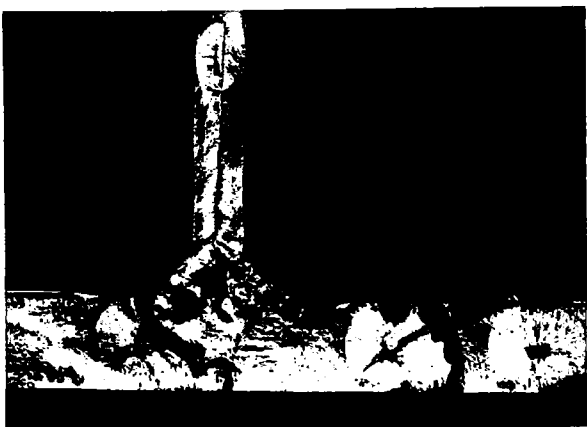


Fig. 5b. Ter vergelijking een breuk over een dwarslas met defecten, na vermoeien. De "visogen" zijn scheurgedeelten die zich vanuit defecten hebben ontwikkeld onder afsluiting van de buitenlucht.

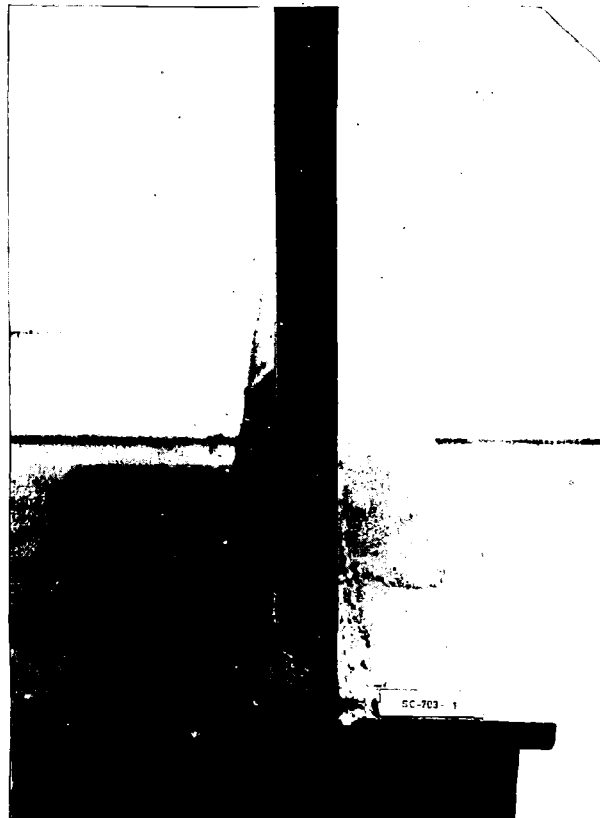


Fig. 5c. Breukvlak met duidelijke chevrons wijzend naar beneden.

3. Fysische en mechanische aspecten

De in fig. 3 gegeven trekkromme toont dat staal een uitgesproken taai materiaal is. Hoe komt het dan dat het zich in constructies bijna even bros kan gedragen als gietijzer?

Er zijn verschillende factoren in het spel. In de eerste plaats noemen we de temperatuur. Verlaging van de beproevingstemperatuur heeft tot gevolg dat de trekkromme verandert in de richting van een hogere vloeigrens en treksterkte en een lagere breukrek. Voor gewoon constructiestaal moet men wel naar -150°C gaan om de breukrek tot op de helft van die bij 0°C terug te kunnen brengen. Bij nog lagere waarden wordt een overganggebied bereikt, waarin de breukrek bijna sprongsgewijs daalt met de temperatuur. Bij -180°C kan de rek gedaald zijn tot op 1%. We spreken voor het gemak meestal van overgangstemperatuur in plaats van -gebied en bedoelen daar bijv. mee de temperatuur die halverwege dat overganggebied ligt.

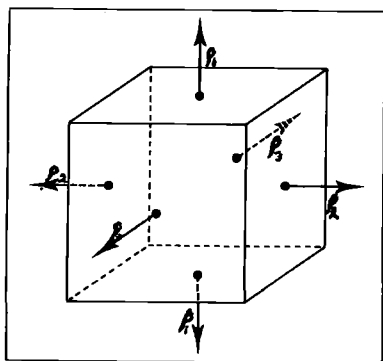
Een tweede factor is de belastingssnelheid waarvan de invloed pas goed merkbaar wordt bij zeer hoge waarden. Bij een trekproef maakt het voor de vloeigrens en de rek weinig uit of deze in een minuut of in een seconde wordt uitgevoerd. In situaties, waarbij gevaar bestaat voor brosse breuk (lage temperatuur, scherpe kerven) is zelfs 0,01 sec. nog niet alarmerend. Pas bij snelheden die alleen door schokken of explosies kunnen worden bereikt, daalt de breukrek van staal drastisch. Een voorwaarde is wel dat het materiaal beneden een bepaalde overgangstemperatuur wordt beproefd. Dit is weer een andere temperatuur dan die voor statische belastingen, die 50 à 100°C lager ligt.

Dit verschil verklaart waarom een brosse breuk - ontstaan tengevolge van een min of meer statische belasting op een plaats waar de materiaalkwaliteit

slecht is - moeilijk kan stoppen, ook al is het omringende materiaal beter. De breuk bereikt onmiddellijk na zijn begin een hoge voortloopsnelheid die voor het nog niet gebroken materiaal een hoge belastingssnelheid betekent. Wanneer de bij die belastingssnelheid behorende overgangstemperatuur hoger is dan de temperatuur van de constructie zal de breuk ongehinderd doorlopen. Voor het Amerikaanse oorlogsstaal bedroeg die temperatuur (ook wel stoptemperatuur genoemd) 20 à 40°C.

De derde factor is het drie-dimensionale karakter van de spanningstoestand. Wat hiermede bedoeld wordt, is te zien in fig. 6a.

Fig. 6a Schematische weergave van het begrip 'alzijdige trekspanning'. De kubus wordt belast door trekspanningen die loodrecht op elkaar staan. De waarden σ stellen de kracht per oppervlakte-eenheid voor.



Wanneer de spanningen in de drie richtingen aan elkaar gelijk zijn, zijn er geen schuifspanningen aanwezig. Het materiaal kan dan niet plastisch vervormen. Van de trekcurve in fig. 3 blijft in principe slechts de lijn A over. Het eindpunt van die lijn ligt alleen vele malen hoger dan in fig. 3. Wanneer de drie spanningen niet aan elkaar gelijk zijn, geldt dat naarmate de spanningstoestand meer op alzijdige trek lijkt, de vloeigrens en de treksterkte hoger zijn en de rek lager. Dit alles wordt nog eens toegelicht met behulp van de cirkels van Mohr (fig. 6b).

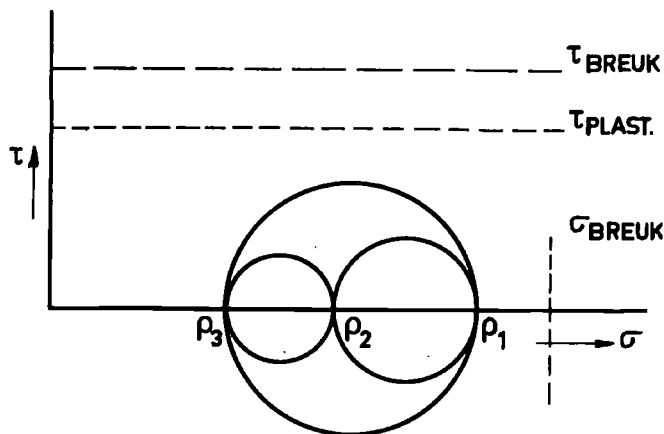


Fig. 6b

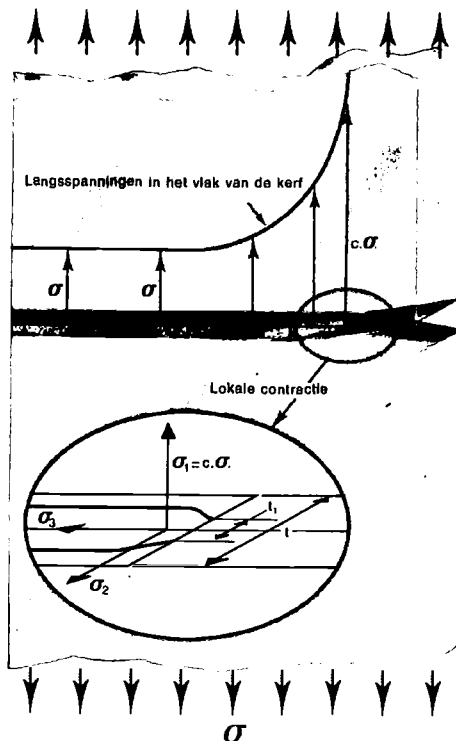
In de figuur is een triaxiale spanningstoestand ρ_1, ρ_2, ρ_3 aangegeven. Wanneer ergens in het materiaal de schuifspanning de vloeiwaaarde bereikt, zal het materiaal vloeien ($\frac{\rho_1 - \rho_3}{2} \geq \tau_{plast.}$). Wanneer ρ_3 en ρ_2 hoog zijn, kan bij verhogen van de belasting ρ_1 eerder σ_{breuk} bereiken, dan dat $(\rho_1 - \rho_3)/2$

de lijn $\tau_{plast.}$ raakt. Er ontstaat dan een brosse breuk. Een taai breuk ontstaat als het materiaal vloeit en verder vervormt. Door het verstevigen stijgt dan $\tau_{plast.}$ waardoor tenslotte een splijtbreuk of een schuifbreuk ontstaat, afhankelijk van de grootten van $\sigma_{br.}$ en $\tau_{br.}$

Een constructiedeel zal maar zelden vanuit drie onderling loodrechte richtingen worden belast. De wand van een bolvormig gasreservoir wordt bijv. slechts twee-assig getrokken. Toch komen drie-assige trekspanningstoestanden veel voor en wel aan de tip van kerven en scheuren. Een kerf in een éénassig belaste plaat verstoort het gelijkmatige spanningsbeeld (zie fig. 7). In de nabijheid van de kerf treedt een concentratie van spanning op. De verhouding van de spanning aan de kerftip tot de zgn. nominale spanning heet spanningsconcentratiefactor:

$$c = \frac{\sigma_{kerf} (= \sigma_1)}{\sigma}$$

Deze kan bij scherpe kerven bijv. waarden in de orde van 10 bereiken: hoe scherper en dieper de kerf is, des te groter is c. Toch is dit niet de eigenlijke oorzaak van het gevaar van kerven in staal. Staal kan in principe zó goed plastisch vervormen, dat het zelfs bij kerven niet gemakkelijk zal scheuren, wanneer tenminste de spanningsstoestand aan de kerftip éénassig is. Helaas is het laatste alleen het geval bij zeer dunne platen, die in de scheepsbouw niet worden toegepast. Hoe de spanningstoestand eruit ziet aan de tip van een kerf of scheur in een dikke plaat, toont fig. 7.



Spanningen ten gevolge van de uitwendige belasting Fig. 7 Aan de tip van kerven en scheuren komen meestal drie-assige trekspanningstoestanden voor. Alleen bij zeer dunne platen is dit niet het geval. In deze figuur wordt de spanningstoestand aan de tip van een kerf of scheur in een dikke plaat weergegeven. Behalve de langspanning σ_1 werken er de spanningen σ_2 en σ_3 in de dikte- en breedterichting van de plaat. Wanneer de plaat buiten de kerfzone Δt dunner wordt, zou dit bij de kerftip $c \cdot \Delta t$ moeten zijn, zodat een putje zou ontstaan. Er kan echter wel nog meer dan Δt gekrompen worden. De daarbij behorende trekspanning is in de dikterichting (σ_2) ongeveer gelijk aan $\frac{1}{2} \sigma$.

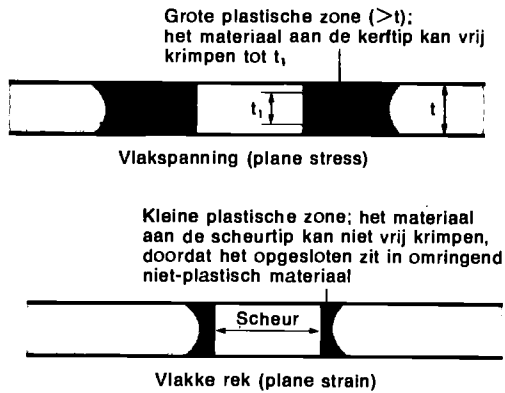
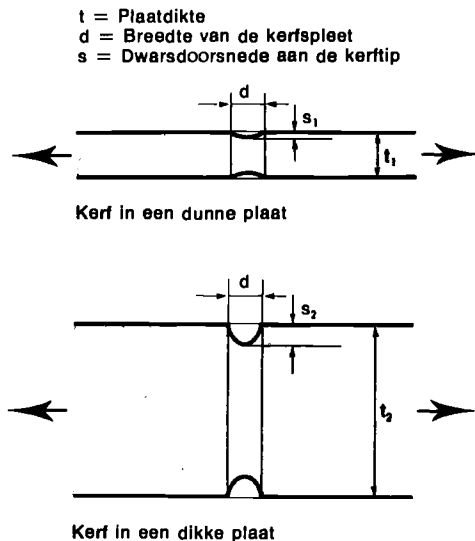


Fig. 8 Het materiaal in een plaat met een scheur of kerf kan bij oplopende belasting aanvankelijk moeilijk vloeien (kleine plastische zone). Bij lage temperatuur en/of hoge belastingssnelheid dreigt dan gevaar voor brosse breuk. Blijft de plaat heel, dan kan de situatie gunstiger worden als de spanningstoestand van een drie-assige in een twee-assige verandert (grote plastische zone).

Naast de langsspanning $\sigma_{kerf} = \sigma_1$ werken er spanningen σ_2 en σ_3 resp. in de dikte- en in de breedterichting van de plaat. Deze ontstaan als gevolg van het feit dat materiaal dat wordt uitgerekt dunner wil worden. Dit geldt ook voor de kerftip. Wanneer de plaat buiten de kerfzone een bedrag Δt dunner wordt, zou dit ter plaatse van de kerftip $c \cdot \Delta t$ moeten zijn. Er zou dan plaatselijk een putje ontstaan. Dit kan niet want het materiaal aan de tip zit opgesloten in het omringende materiaal en zal maar weinig meer dan Δt kunnen krimpen. Het kerftipmateriaal wordt dus vastgehouden, dat wil zeggen uitgerekt van $(t - c \cdot \Delta t)$ naar iets minder dan $(t - \Delta t)$. De bijbehorende trekspanning σ_2 blijkt bij dikke platen ongeveer gelijk te zijn aan $1/3 \sigma_1$. In de breedterichting van de plaat ontstaat analoog de trekspanning σ_3 . De vloeigrens van het kerftipmateriaal is in deze toestand gelijk aan 1,7 maal de waarde voor de éénassige spanningstoestand. Ondanks deze verhoging zal dat materiaal al bij lage belasting gaan vloeien omdat c veel hoger is dan 1,7. Zodra het vloeien is begonnen, neemt het gevaar voor brosse breuk toe. Immers zolang het vloeigebied klein is, blijft het materiaal ingesloten in het omringende, alleen elastisch vervormende materiaal. Het kan dan niet veel vervormen zonder te breken. Wanneer de andere condities gunstig zijn, bijv. een lage belastingssnelheid en niet te lage temperatuur, dan kan het materiaal aan de kerftip meestal wel zoveel vervormen dat een plastische zone ontstaat die even groot is als of groter is dan de plaatdikte (fig. 8). Het materiaal aan de kerftip kan dan weer vrij krimpen. Doordat de spanningstoestand niet meer drie-assig is, zal het materiaal sterk kunnen vervormen voordat breuk ontstaat. Hiermede is verklaard dat bij brosse breuk onderzoek of breuken ontstaan na weinig vorming of na grote vervorming. Tussenwaarden zijn schaars. Tevens zal nu duidelijk zijn waarom kerfven in dikke platen gevaarlijker zijn dan in dunne. Dit wordt nog eens toegelicht in fig. 9. Wanneer

Onder: Fig. 9. In deze figuur wordt nog eens toegelicht waarom kerfven in dikke platen gevaarlijker zijn dan die in dunne. Wanneer de dwarskrimp zich vrij zou kunnen ontwikkelen, zou deze (S_2) in een dikke plaat veel groter moeten zijn dan in een dunne plaat (S_1). De breedte van de kerfspleet is hiervoor echter te klein. Er ontstaan trekspanningen in de dikterichting (zie ook Fig. 9).



de dwarskrimp (dwarscontractie) zich vrij zou kunnen ontwikkelen, zou S_2/t_2 gelijk zijn aan S_1/t_1 . In werkelijkheid is de afstand d hiervoor te klein.

De behandelingen verstevenigen, harden, gloeien en ook het verouderen van het materiaal behoren als vierde factor strikt genomen niet bij de voorgaande drie. De behandelingen veranderen het uitgangsmateriaal grondig. Chemisch gebeurt er weinig, maar fysisch des te meer. Staal dat gehard wordt door gloeien boven 910°C en snel afkoelen is gewoon een ander staal geworden. Het is min of meer een oververzadigde oplossing van koolstof in ijzer geworden. De in het kristalrooster in de knel geraakte koolstofatomen (zie fig. 10) versturen de regelmatige bouw van dat rooster en bemoeilijken de glijding (afschuiving). Het staal is sterker en harder geworden, maar in principe ook brosser (martensitisch).

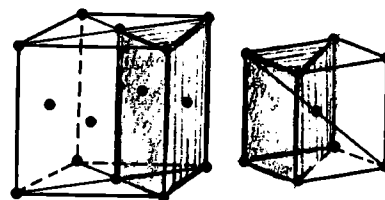


Fig. 10.

Links kubisch vlakken-gecentreerd rooster (γ -ijzer). Rechts kubisch ruimte-gecentreerd rooster (α -ijzer). Door de kleinere afmetingen van het α -ijzer is er nauwelijks ruimte voor C-atomen. (Deze zijn niet getekend).

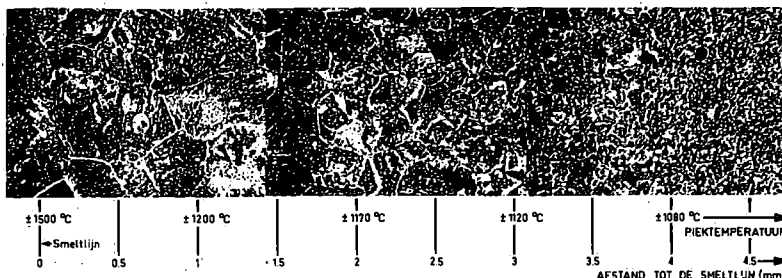


Fig. 11. Een opname van een oververhitte zone van staal dat gelast werd met een hoge warmtetoever. De korrels links waren in het preparaat nog met het blote oog te zien. Hoe groter de korrel is, hoe minder is de kwaliteit van het staal (vergroting ca. 5x).

Verstevigen van staal is een verschijnsel dat goed bekend is aan de "paperclipbuigers". Sterke vervorming doet de vloeigrens stijgen en de rek afnemen. Dit bleek al duidelijk uit fig. 3. Wanneer het plastisch vervormen gebeurt bij verhoogde temperatuur (100 à 400°C), dan veroudert het materiaal. De verbrossing is dan vele malen erger dan bij kamertemperatuur. Verouderen kan optreden bij lassen. De krimpspanningen kunnen, vooral op plaatsen van spanningsconcentraties, plastische vervormingen veroorzaken. Wells heeft aangetoond dat dit de belangrijkste oorzaak van de klassieke brosse breuken was. (Een bijzondere vorm van verstevigen is vermoeien, § 6c).

Gloeien van staal boven 1050°C heeft een sterke korrelgroei tot gevolg. Dit is bijzonder ongunstig, omdat de brosheid van staal mede bepaald wordt door de korrelgrootte. Het meest te lijden van dit gloeien hebben de moderne fijnkorrelstalen die zeer lage percentages niobium of vanadium bevatten. Zij zijn in de leveringstoestand van buitengewone kwaliteit en goed lasbaar. Maar wanneer gelast wordt met grote warmtetoever, kunnen zij in de zone naast de las (overgangszone, warmte-beïnvloede zone) sterk in kwaliteit achteruitgaan. De overgangstemperatuur kan wel met 100°C stijgen. Dit gebeurt in een gebiedje dat maar enkele millimeters breed is (fig. 11). Onderzoek in Delft heeft uitgezeten dat brosse breuken zelfs in zo'n smalle zone kunnen doorlopen. De lassingspanningen zijn niet bij machte om het breukpad dusdanig te beïnvloeden, dat de breuk terecht komt in gezond materiaal en kan stoppen.

4. De rol van de lassingspanningen (zie ook § 6b).

Met het voorgaande in gedachten is het ontstaan van breuken in de tijdens de oorlog gebouwde schepen als volgt te verklaren:

- Het staal was slecht lasbaar. Het bevatte te veel koolstof en werd in de kwaliteit "onrustig" of "halftrurig" geleverd, dat wil zeggen in niet of slecht gedesoxydeerde toestand.
- De lassers waren vaak amateurs die ook in slecht weer moesten doorwerken. Dit gevoegd bij a, maakte dat in de lassen veel defecten en scheurtjes aanwezig waren (lokale kerven).
- De constructies waren slecht. De luikhoofdhoeken waren bijv. rechthoekig in plaats van afgerond, waardoor zij als grote kerven in het schip werkten. De meeste breuken zijn vanuit deze luikhoofdhoeken ontstaan.

Oorspronkelijk waren het vooral de residuele lassingspanningen die als zondebok fungeerden. Maar men zou die spanningen beter kunnen zien als druppels die de emmer deden overlopen. Bovendien hebben zij

weliswaar aan het ontstaan van veel scheuren bijgedragen, maar zeker even vaak het breukpad dusdanig beïnvloed dat de scheuren konden stoppen. Toch was het wel degelijk zo, dat de schepen direct na de bouw door hun lage kwaliteit en de aanwezigheid van lassingspanningen op springen stonden. Het feit dat niet veel meer schepen gebroken zijn, heeft twee achtergronden.

In de eerste plaats kwamen de meeste schepen niet onmiddellijk na de bouw in koud weer terecht. Wanneer zij eerst bij normale temperatuur een storm hadden doorstaan, werden de lassingspanningen voor een deel tenietgedaan. Dit gebeurde wanneer de som van lassingspanningen en spanningen tengevolge van de uitwendige belasting plaatselijk boven de vloeigrens kwam en het materiaal plastisch ging vervormen.

De tweede achtergrond heeft eveneens met de lassingspanningen te maken. Hoe lager de kwaliteit van scheepsconstructie en -materiaal was en hoe hoger de lassingspanningen waren, des te lager waren de spanningen waarbij de breuken ontstonden. Uit onderzoeken van Robertson in Groot Brittannië is gebleken dat het voortplanten van brosse breuken niet alleen afhankelijk is van de temperatuur, maar ook van de spanning in de constructie. Dit blijkt uit fig. 12.

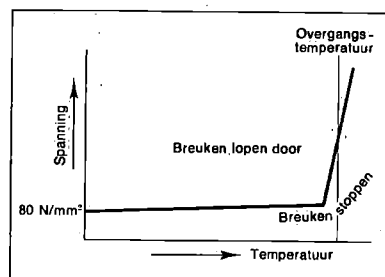


Fig. 12. Resultaat van Robertson-proeven.

Wanneer die spanning lager is dan ongeveer 80 N/mm^2 , komt een brosse breuk tot stilstand. Op de plaats waar de breuk eindigt, bevindt zich beter materiaal dan op de plaats van de oorsprong van de breuk. Een opnieuw op gang komen van de breuk is dan zeer onwaarschijnlijk. Het schip met scheur is veiliger dan in de toestand zonder scheur, mede doordat de scheurtip zich buiten het gebied van de lassingspanningen zal bevinden.

5. De invloed van de vormgeving van discontinuïteiten op de sterkte en taaheid van constructies

Constructies gedragen zich vaak als dikke platen, met name daar waar verstijvingen elkaar kruisen. Dit wordt verder toegelicht aan de hand van een extreem slecht constructiedetail dat in het verleden in Libertyschepen aanwezig was ter plaatse van de luikhoofdhoeken.

Maar eerst wordt nader ingegaan op het gedrag van platen met gaten bij belastingen die plastische vervormingen en uiteindelijk breuk veroorzaken (fig. 13).

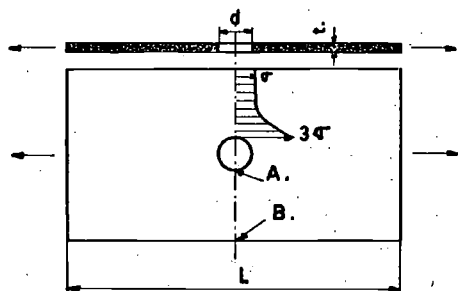


Fig. 13. Elastische spanningen loodrecht op de trekrichting in een plaat met een rond gat.

Wanneer aan de rand van het gat de spanning boven de vloeigrens komt, zal het materiaal slechts weinig vloeien. Dit komt doordat het omringende materiaal, dat veel lager belast wordt, een grote vervorming niet toelaat. Bij verdere toename van de belasting zal de spanning aan de rand aanvankelijk niet groter worden dan σ_v . Pas wanneer overal

in de gatdoorsnede de vloeigrens wordt overschreden, zal het materiaal zo sterk rekken dat het verstevigt (fig. 14b). De spanning zal daardoor groter worden dan de vloeigrens. De rekken over de gatdoorsnede verhouden zich nu anders dan in het elastisch gebied. Aanvankelijk zal de rekconcentratie groter dan 3 zijn, door het plastisch meegedragen van het materiaal. Op den duur vervormt het gat zich echter tot een ellips en verstevigt het materiaal. De rekconcentratie zal hierdoor afnemen. Voor het gemak laten we deze overwegingen buiten beschouwing en nemen aan dat de rekconcentratie gedurende het gehele belastingsproces de waarde 3 heeft. Wanneer de belasting nu zo hoog wordt opgevoerd dat het materiaal aan de rand begint in te snoeren, dan heeft de rek op die plaats ongeveer de grootte die bij σ_{max} in de trekcurve van staal hoort (zie fig. 15: $\epsilon_{(A)}$).

De rek in punt B ($= \epsilon_{(B)}$) is dan gelijk aan $1/3 \epsilon_{(A)}$. De bijbehorende spanning is uit de trekcurve af te lezen ($\sigma_{(B)}$).

Wordt de belasting nu verder opgevoerd tot zich in A een flinke insnoering heeft ontwikkeld, dan zal $\epsilon_{(B)}$ eveneens nog toenemen. De spanning $\sigma_{(B)}$ zal daardoor uiteindelijk tot de waarde σ_{max} kunnen naderen.

We zien dus dat de statische sterkte van een brede plaat door de aanwezigheid van een gat vrijwel niet wordt verminderd (fig. 14b). De breukbelasting is immers niet gelijk aan ongeveer $1/3$ van die van een volle plaat, zoals uit de aanwezigheid van de elastische spanningsconcentratie ten onrechte wel eens

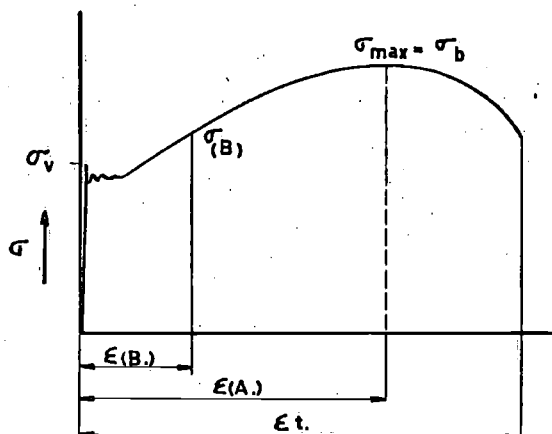


Fig. 15

geconcludeerd wordt. De breuklast bedraagt namelijk:

$$P_{br} = \sigma_{max} \times (F_{plaat} - F_{gat}) \approx \sigma_{max} \cdot F_{plaat}$$

De totale verlenging van de plaat met gat is wel belangrijk kleiner dan van de volle plaat. Wanneer de lengte L van de plaat groot is ten opzichte van het gat, is de verlenging vrijwel gelijk aan $\epsilon_{(B)} \cdot L$. Voor de volle plaat is de verlenging $\epsilon_t \cdot L$ (zie fig. 15). De arbeid tot breuk is voor beide gevallen resp.:

$$A_1 = \sigma_{(B)} (F_{plaat} - F_{gat}) \cdot \epsilon_{(B)} \cdot L \text{ (plaat met gat),}$$

$$A_2 = \sigma_{max} \cdot F_{plaat} \cdot \epsilon_t \cdot L \text{ (plaat zonder gat).}$$

Voor korte platen kan A_2 een veelvoud van A_1 zijn. Naarmate de lengte groter wordt, zal A_1 meer tot A_2 naderen. Bij grote lengten is de insnoeringsrek namelijk relatief klein.

In fig. 14c wordt het resultaat getoond van een trekproef met een plaat voorzien van een scherpe kerf. Het eerste grote verschil met een plaat met een rond gat is dat de breukspanning over de kerfdoorsnede niet boven de vloeigrens kan stijgen. Het vloeien in die doorsnede veroorzaakt grote vervormingen aan de kerftip (hoge rekconcentratie), terwijl het materiaal aldaar maar weinig kan hebben (triaxiale spanningstoestand). Het tweede verschil met de plaat met een rond gat volgt uit het voorgaande: doordat het materiaal voor en achter de kerfdoorsnede niet aan vloeien toekomt, is de "overall" rek van de plaat zeer klein. Bij een lange plaat is de rek gelijk aan de elastische rek, die bij de nominale breukspanning hoort. Dit is slechts 0,1 à 0,15%.

Het voorgaande levert de sleutel tot de constructieve oplossing van dit soort problemen. Het gat of de kerf in de plaat betekent een verzwakking, die vergelijkbaar is met een zwakke schakel in een ketting. De enige manier om de ketting in zijn geheel te versterken is de zwakke schakel, en alléén de ene zwakke schakel, sterker te maken.

Wanneer een plaat met een gat erin in zijn langsricting wordt belast, dan is de doorsnede over het gat zwakker dan de rest van de plaat, ook al zou het gat geen spanningsconcentratie aan zijn rand vertonen (fig. 16).

Stel dat de gatdoorsnede 90% van het materiaal in

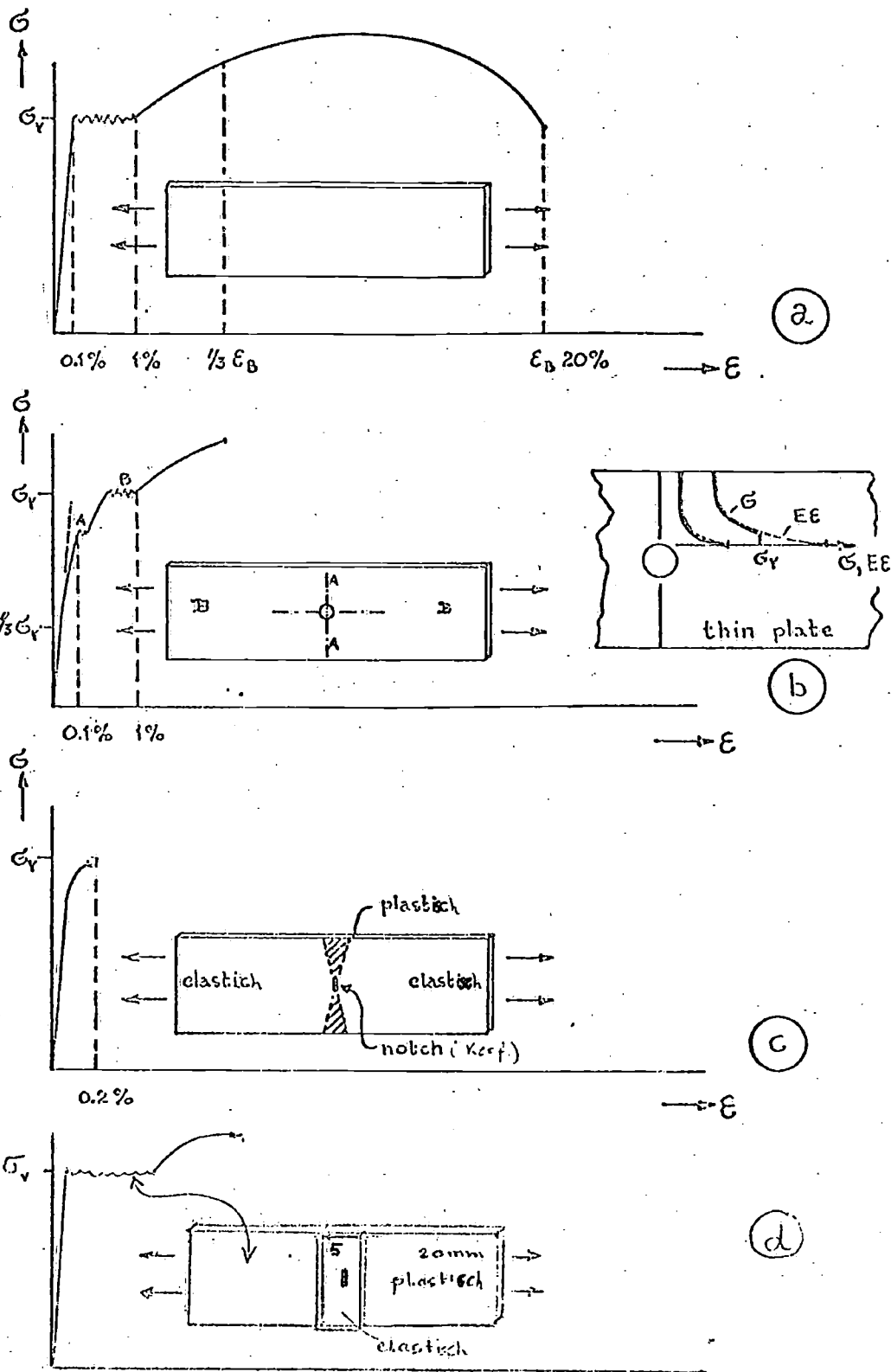


Fig. 14. Trekkrommen van een prismatische staaf, een plaat met een rond gat, een plaat voorzien van een kerf en een plaat met verdikte kerfzone.

de volle plaatdoorsnede bevat. Dit materiaal zal gaan vloeien zodra de nominale spanning gelijk wordt aan $0,9\sigma_v$. Ervoor en erachter vloeit het niet. Wanneer er in plaats van het ellipsvormige gat een scherpe kerf loodrecht op de langsrichting aanwezig is, is de redenering tot hier toe analoog. Het ongerijmde van de situatie is, dat daár waar het materiaal niet gekerfd is, de belasting per

oppervlak van de doorsnede lager is dan op de gevaarlijke gekerfde plaats. De constructie zou veiliger zijn wanneer zij in het niet-gekerfde gebied minder materiaal bevatte (zie fig. 17).

De vloeigrens zou dan eerst worden bereikt in dat deel en de constructie zou veel arbeid op kunnen nemen, voordat ook de gekerfde doorsnede zou gaan vloeien (arbeid is A in figuur 18).

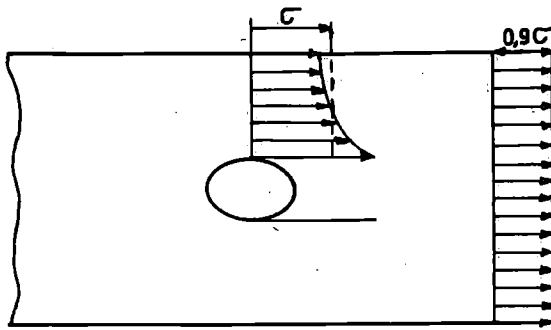


fig 16

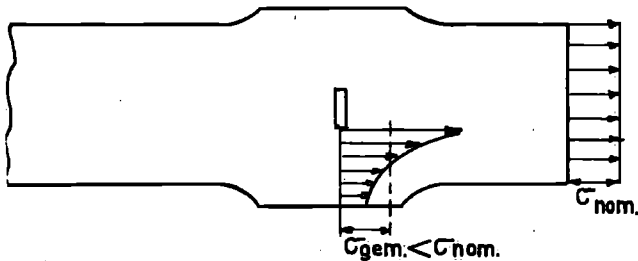


fig 17

Van groot belang is het dat het niet-gekerfde deel veelal lang is t.o.v. het gekerfde gebied. (Bijv. een plaat- of profiellengte). Δl is derhalve groot.

In veel gevallen staat de breedte van de constructie vast (dek van een schip, rijvloer van een brug). De manier is dan de constructie zo uit te voeren, dat in de kerfdoorsnede een dikkere plaat wordt gebruikt dan elders (fig. 19).

Algemeen geldt derhalve dat de eerste eis die we aan een constructie moeten stellen is, dat het materiaal daar waar discontinuïteiten aanwezig zijn niet kan vloeien vóórdat elders vloeien optreedt (fig. 14d).

Voor de constructie van fig. 20 is de oplossing als in fig. 21 de juiste. Men dient wel te beden-

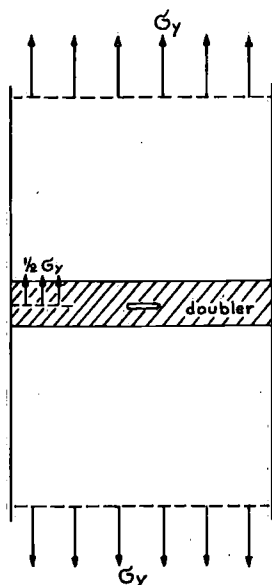


Fig. 19. Beveiligen van een gekerfde plaat tegen brosse breuk.

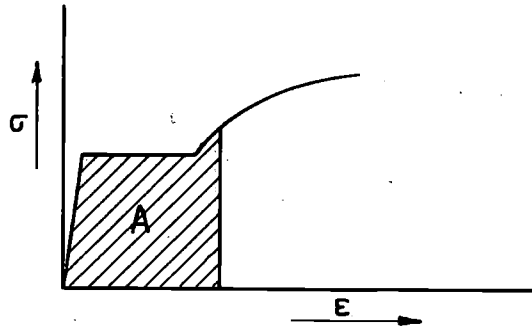


Fig. 18. Arbeid uitgeoefend op een trekstaaf.

ken dat de spanningsconcentraties aan de rand van de gaten of de kerwen maar weinig verlaagd worden. Voor een rond gat daalt zij van 3 naar $3/1,2 = 2,5$, betrokken op de nominale spanning. De constructie is dus wel beveiligd tegen brosse breuk, maar veel minder tegen vermoeiing.

Het voorgaande wordt nu nog eens vergeleken met de gebruikelijke manier om discontinuïteiten te "beveiligen" door het toepassen van dubbelplaten als in fig. 22c of extra dikke ingezette platen van dezelfde vorm.

Nu is een dikke plaat altijd kerfgevoeliger dan een dunne plaat, omdat in de eerste de spannings-toestand aan de tip van een kerf meer triaxiaal is dan in de tweede, (vlakvervormingstoestand of plane strain i.p.v. vlakspanningstoestand of plane stress). Het middel is daarom vaak erger dan de kwaal, tenzij het materiaal van de ingezette plaat extra kerftaai is bij lage temperatuur en die taaiheid niet te veel vermindert tijdens lassen of snijden. Een groot bezwaar blijft dan dat t.p.v. het zwakste punt in de constructie maar weinig meer materiaal zit dan elders in de constructie (langs het gat) en veel minder dan in de volle doorsnede. Wanneer bij het gat nog verticale verstijvingen samenkomen als in fig. 24 is dat materiaal daar zeker minder effectief dan 100%. De "longitudinal coaming" eindigt immers op de hoek. De betere oplossing geeft fig. 22a. Duidelijk fout is fig. 22b. De spanningsconcentratie aan de rand van het gat is vrijwel gelijk aan die zonder extra langsplaat. Figuur 22c zit er tussenin. De spanningsconcentratie wordt weliswaar verlaagd, maar zodra het materiaal in de betrokken doorsnede gaat vloeien, kan het dubbelplaatje niet voorkomen dat ook de luikhoofdhoek plastisch vervormt. Voor gaten is fig. 23 voldoende. Bij zo'n brede plaat wordt de spanningsconcentratie verlaagd als in fig. 22a, door de hulp van shear-lag. Dit alles geldt nadrukkelijk voor constructies die in hoofdzaak in één richting - de langsrichting - worden belast.

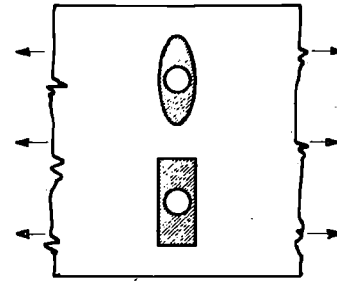
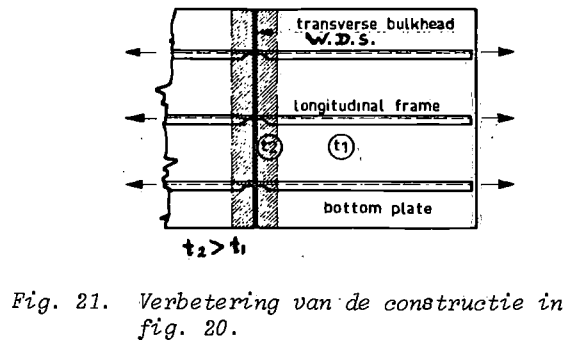
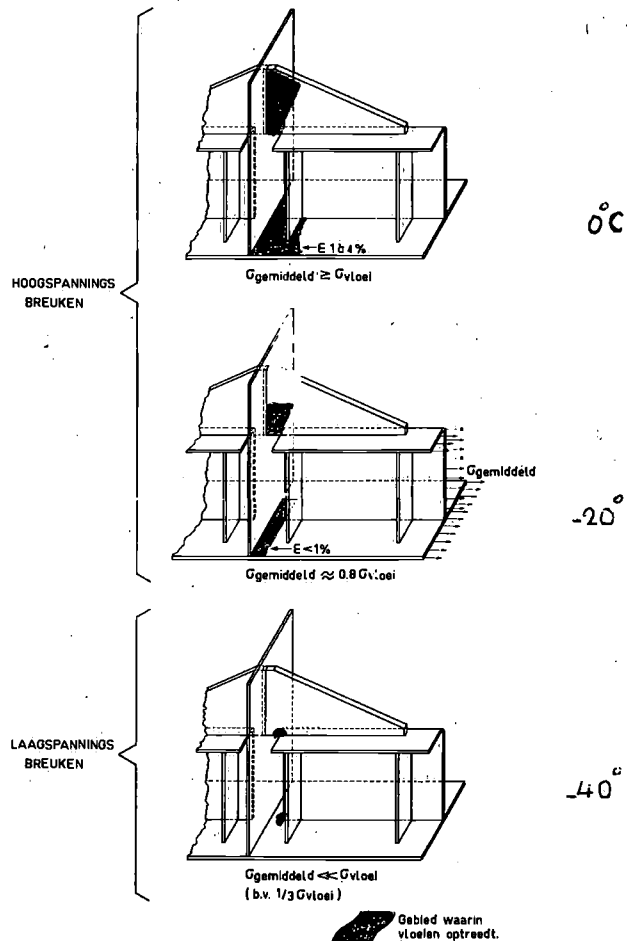


Fig. 20. Plastische vervormingen voorafgaand aan breuk t.p.v. discontinuïteiten. De aangegeven temperaturen gelden voor een Al-rustig C-Mn staal. (Zie ook fig. 37). De drie figuren kunnen ook gezien worden als stadia die worden doorlopen, wanneer de constructie bij 0°C belast wordt tot breuk.

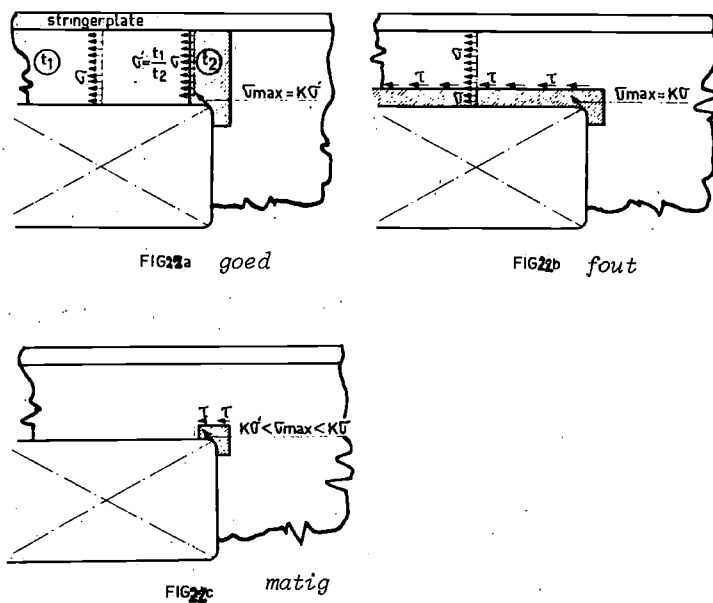


Fig. 22. Versterken van hoeken van openingen.

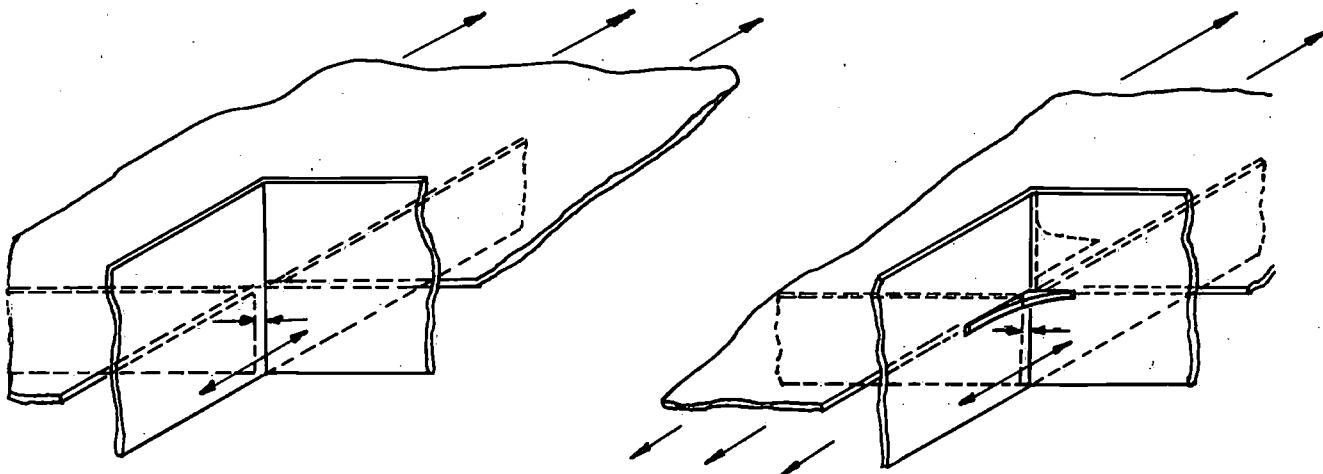


Fig. 24, 25. Oorspronkelijke en verbeterde uitvoering van de luikhoekconstructie van Liberty-schepen.

We beschouwen de luikhoofdhoek nu in zijn meest primitieve uitvoering teneinde de constructiefouten te kunnen verklaren en om te laten zien dat dan zeer eenvoudige verbeteringen te vinden zijn.

De oorspronkelijk in Liberty-schepen toegepaste luikhoekconstructie was uiterst primitief (fig. 24). Afgezien van de onmiddellijk duidelijke tekortkoming dat ter plaatse van de spanningsconcentraties nergens afrondingen waren toegepast, maakte er nog aan dat ter plaatse van de luikhoofdhoek niet één spanningsconcentratie - bijv. alleen t.g.v. de discontinuïteit in het dek - aanwezig was, maar wel drie, namelijk ook die in de langs- en dwarsbalk.

Door deze uitvoering is de triaxialiteit van de spanningstoestand t.p.v. de hoek extreem. Dit is als volgt in te zien.

Wanneer de langs balk op trek wordt belast, wordt de daarbij van nature optredende dwarscontractie t.p.v. de hoek verhinderd door de dwarsbalk; met andere woorden de dwarsbalk oefent op de langs balk in verticale richting een schuifbelasting uit, die de langs balk in die richting uitrekt, d.w.z. op trek belast.

Duidelijke verbeteringen zijn (fig. 25):

- Verklein de spanningsconcentratie in de langsverbandelen door de continuïteit te herstellen (langs balk) en de dekhoeke rond te maken.
- Zorg dat de punten waar de hoogste spanningen optreden niet samenvallen met het, stijfste gedeelte van de hoek, waar de grootste triaxialiteit heerst. Ook hiertoe is rond van de dekhoeke zeer doeltreffend.
- Zorg dat op de punten van hoge spanningen geen lassen en vooral geen lasconcentraties aanwezig zijn.

Deze verbeteringen zijn in de latere Victory-schepen verwezenlijkt. Het resultaat was dat het aantal breuken in die schepen slechts een fractie van dat van de Liberties was.

Principieel andere doeltreffende mogelijkheden van verbetering zijn:

- hoek "beschermen" door omringen met versterkingen (fig. 22);
- hoek flexibel maken, d.w.z. beter vervormbaar dan de rest (harmonika-principe = Kennedy-corner), (fig. 28).

De constructie van fig. 20 verdient extra aandacht,

omdat er een principiële fout in zit die zelden gerealiseerd wordt.

Het is een uitvoering, die alleen bij kleine zeeschepen en binnenschepen wordt toegepast. Maar de bedoelde fout zit ook in zeer moderne doorverbindingen. Op grond van het in het voorgaande behandelde (fig. 14) zou men verwachten dat, wanneer de constructie van fig. 20 op trek wordt belast, breuk zal optreden bij een spanning die gelijk is aan de vloeigrens. Immers het gat tussen spant en schot is een soort kerf. Verder is ervoor gezorgd dat in de doorsnede over die kerf evenveel materiaal zit als in de doorsneden buiten het kniegedeelte. Toch blijkt dat bij een proef (bij voldoende lage temperatuur) de breukspanning maar ca. 70% van de vloeigrens bedraagt. Wanneer dergelijke constructies niet op trek maar op druk worden belast, blijkt de bezwijklast ook maar 70% van de vloeilast te zijn. De vermindering van 30% zit blijkbaar niet in de aanwezigheid van hoge spanningsconcentraties, lasinvloeden e.d. Dit wordt

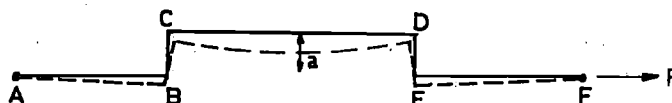


fig. 27

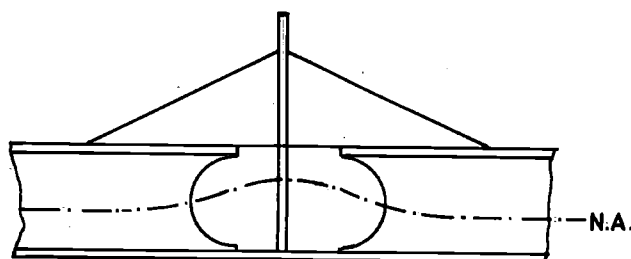


Fig. 26. De oplossing van fig. 21 komt ook hieraan tegemoet, doordat de neutrale lijn lager komt te liggen wanneer de bodemplaat wordt verzaard.

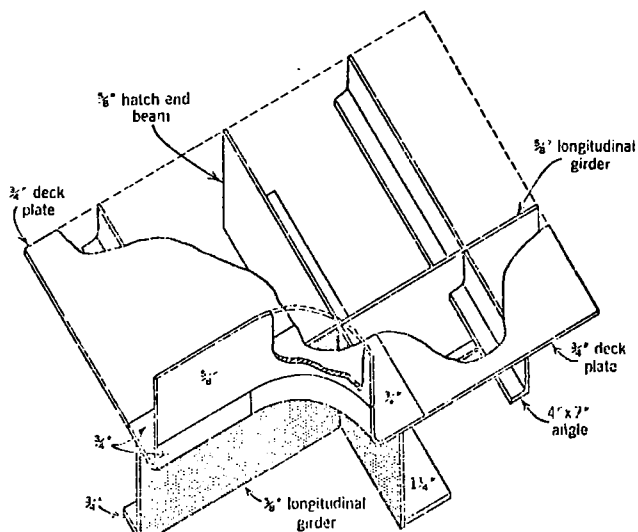


Fig 28 Kennedy hatch corner

bevestigd door trekproeven met half-cirkelvormige langsspant-einden (fig. 26), waarvoor de 70% ook blijkt te gelden.

De oorzaak van de lage bezwijklasten is, dat de neutrale lijn (zwaartepuntslijn) van de langspant-doorvoeringen t.p.v. het kniegedeelte hoger ligt dan elders (fig. 26). Wanneer aan zo'n constructie getrokken wordt, is dat te vergelijken met fig. 27. De oplossing van fig. 21 komt ook hieraan tegemoet, doordat de neutrale lijn lager komt te liggen wanneer de bodemplaat wordt verzwakt. In de stukken BC, DE, maar vooral CD zitten buigende momenten, die de staaf als gestippeld doen vervormen. De onderkant van het deel CD wordt zowel gerekt door de spanning $\sigma = P/F$ als door de spanning $\sigma = P \cdot a/W$. Zo wordt in fig. 26 ook de bodemplaat meer belast (gerekt) dan de knie. In de bodem wordt de vloeigrens bereikt op een moment dat de gemiddelde spanning over de doorsnede nog onder de vloeigrens ligt. De bodemplaat kan dan gaan scheuren, wat het bezwijken van de gehele constructie inleidt. De situatie is getekend in de middelste figuur van fig. 20. De bovenste figuur is alleen mogelijk bij normale temperaturen ($> 0^\circ\text{C}$) voor de lagere staalkwaliteiten. Voor de huidige kwaliteiten D en E is die toestand ook te bereiken bij lage temperatuur (bijv. -20°C).

Naast de verticale buiging treedt in de constructies ook horizontale buiging op, als gevolg van slingeringen van de neutrale lijn in het horizontale vlak, en het gebruik van asymmetrische profielen.

6. Onderzoek dat geleid heeft tot het juiste inzicht in de brosse-breuk-problematiek

a. Analyse van praktijkbreuken

De Amerikanen hebben bij het bestrijden van het brosse-breuk-probleem veel aandacht besteed aan de staalkwaliteit. Van alle schepen die scheuren vertoonden werd het materiaal onderzocht /1/.

Men onderscheidde drie groepen:

- source-plates (platen waarin een scheur was ontstaan);
- through-plates;
- end-plates (platen waarin scheuren tot stilstand waren gekomen).

Men bepaalde met behulp van Charpy-V-proeven de kerfslagenergie bij de breuktemperatuur en vond dat de "source"-plates nooit meer dan 15 ftlb energie hadden, en de "through"-plates nooit meer dan 20 ftlb.

50% Van de "end"-plates had méér dan 13 ftlb en maar weinige meer dan 20 ftlb. Men kon derhalve concluderen dat voor het in die tijd gebruikte staal 15 ftlb (21 Joule) voldoende was om ontstaan van een scheur te voorkomen en 20 ftlb (28 Joule) om een toch ontstane scheur tot stoppen te brengen.

De 15 ftlb-waarde kunnen we zo interpreteren, dat het staal van die tijd, wanneer het aan die waarde voldeed, door het lassen niet zoveel werd bedorven dat onder langzaam aangebrachte belasting (géén schok) geen gevaar voor breukinitiatie in de overgangszones bestond. Het lasmetaal werd minder bekeken, mede omdat gebleken was dat breuken onder invloed van de lasspanningen altijd de laszone verlieten. Een merkwaardige filosofie, omdat de meeste breuken vermoedelijk wel in het lasmetaal zijn ontstaan, en het dus bijzonder veel zin had om het kwaad bij een van de wortels aan te pakken door naar beter lasmetaal, dus naar zware keuringseisen te streven.

Een minstens even goede, zo niet betere interpretatie van het 15 ftlb criterium was dan ook dat het staal dat daaraan voldeed in staat was om de in lasmetaal of overgangszone ontstane scheurtjes onmiddellijk tot stoppen te brengen, d.w.z. voordat zij teveel energie t.b.v. de voortplanting hadden vrijgegeven. Een aldus niet-direct-gestopte scheur kon alleen nog maar stoppen wanneer hij terecht kwam in plaatmateriaal met minstens 20 ftlb kerfslagenergie.

De tweede 15 ftlb interpretatie is in feite bevestigd door Pellini. Zijn drop-weight test, die aangeeft of een zeer klein scheurtje al of niet in een plaat kan voortlopen onder lage belasting, gaf als veilige temperatuur, die waarbij de Charpy-kerfslagenergie groter dan 10 ftlb was.

Een logische consequentie van het gehele onderzoek was om 20 ftlb te eisen bij zeg -10°C , dan was alle risico verdwenen.

Maar dit was niet zo eenvoudig; de staalfabrieken waren niet ingesteld op verlagen van het hoge C-gehalte (0,22%) en kalmeren van het staal, welke als meest voor de hand liggende methoden ter verbetering in aanmerking kwamen.

Het voorgaande toont hoe langs zuiver empirische weg zeer nuttige aanwijzingen ter voorkoming van brosse breuk zijn verkregen. Maar men zat wel met het probleem dat de in de praktijk opgetreden laagspanningsbreuken in laboratoria niet konden worden geïmiteerd.

Men heeft eindeloze series proeven verricht, vooral met platen met gezaagde kerven, zonder dat het lukte om bij enigszins realistische temperaturen breuken beneden de vloeilast te krijgen. Aanvankelijk dacht men dat het aan de geringe afmetingen van de proefstukken lag. Men is tot proefstukken van 3,5 m breed gegaan zonder enig succes. Dit toont nog eens hoe sterk men de invloed van het lassen onderschatte! (Overigens is men er later bij proefstukken voorzien van dwarslassen evenmin in geslaagd laagspanningsbreuken te verkrijgen bij realistische temperaturen). Wel bleven de discussies over de rol van de residuele spanningen doorgaan. Dit was niet zo vreemd, omdat er tenminste twee schepen gebroken zijn in - ogenschijnlijk - onbelaste toestand. Deze schepen werden echter wel degelijk belast. Een groot tempera-

tuurverschil tussen het door de zon verwarmde dek en het door het koude water gekoelde onderwaterschip leidde tot temperatuurspanningen in de orde van 80 N/mm^2 . Niettemin een spanning ver beneden de vloeigrens.

b. Verstevinging en veroudering (hot strain embrittlement) van staal /2/

Omstreeks 1957 deden Mylonas en Drucker de laswereld schudden met hun laagspanningsbreuken, verkregen met ongelaste stalen platen. De proefstukken waren voorzien van diepe randkerven. Zij werden eerst op druk belast (nominale krimp ca. 5%!) en vervolgens op trek.

Door de plastische krimp was de "ductility" zo "exhausted", dat bij het latere trekken breuken bij ca. 40% van de vloeilast ontstonden. Dit alles bij realistische temperaturen!

Volgens hen was het nu meteen duidelijk dat residuele spanningen aan het brosse karakter van een breuk niets bijdragen (bros in de zin van géén plastische vervorming vóór breken). Hoogstens kunnen residuele spanningen de toch al lage breukspanning iets meer verlagen. Is de breukspanning bij afwezigheid van residuele spanningen hoog ($\geq \sigma_{\text{vloei}}$), dan zal die dat ook zijn bij aanwezigheid van residuele spanningen.

Hoe aardig de proeven van Mylonas en Drucker ook waren, zij waren toch niet erg realistisch door de noodzaak de proefstukken eerst extreem voor te drukken.

Omstreeks dezelfde tijd kwam Wells in Groot Britannië met zijn proeven. Zijn verdiensten waren meer gelegen in een systematische opzet en juiste interpretatie, dan in oorspronkelijkheid, want Greene was hem voorgegaan en Kennedy had al in 1945 in een laboratorium laagspanningsbreuken verkregen met gelaste proefstukken. Hij was zijn tijd zover vooruit, dat die proeven niet goed opgemerkt en begrepen zijn.

Andere wegbereiders voor Wells en eigenlijk ook voor Mylonas waren Soete en van Crombrugge met hun trekproeven bij verouderingstemperaturen (2 à 300°C). De verdienste hiervan zal duidelijk worden na de bespreking van de Wells-proeven.

Soete had bovendien het probleem van de residuele spanningen op een zeer handige manier bestudeerd door proefstukken van onderstaand type te beproeven.

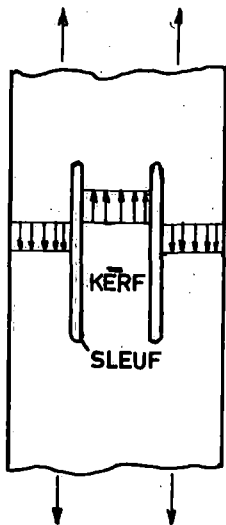


Fig. 29. Door verhitten en afkoelen van het deel tussen de sleuven ontstaan residuele spanningen in het proefstuk.

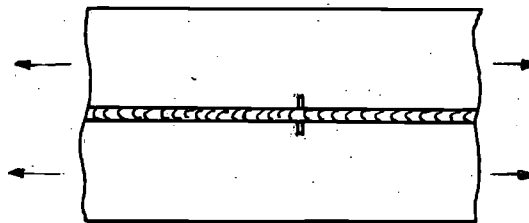


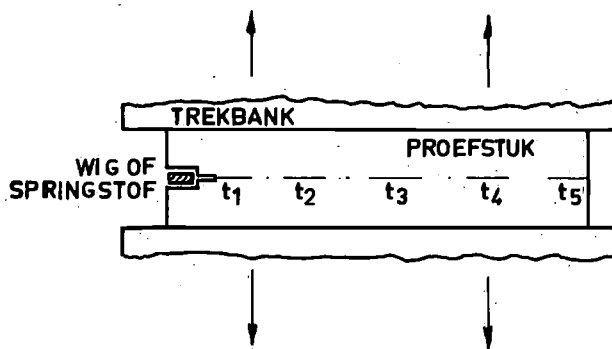
Fig. 30

We gaan nu over tot het bespreken van de proeven van Wells en in aansluiting daarop, die van Kihara en Masubuchi omdat, wanneer men deze onderzoekingen begrijpt, men een goed inzicht in het gehele brosse-breuk-probleem heeft gekregen.

De proefstukken van Wells waren opgebouwd uit twee plaatstukken waarbij in de voor het lassen bestemde kant een kleine zaagsnede was aangebracht (fig. 30).

Deze platen werden bij betrekkelijk lage temperaturen tot breuk belast. In zeer veel gevallen ontstonden eerst partiële breuken, bijv. over een lengte van 10 cm, bij zeer lage belasting (60 à 80 N/mm^2), waarna belasten tot de vloeigrens voor verder breken noodzakelijk was.

Voor een juist begrip hiervan is het nodig eerst iets over die "Robertson"-scheurstopproef te zeggen. Oorspronkelijk was dit een proef waarbij een temperatuurgradiënt in de richting van de te veroorzaken scheur aanwezig was.



Bijv. $t_1 = -100^\circ\text{C}$ (m.b.v. vloeibaar N_2)
 $t_2 = -30^\circ\text{C}$
 $t_3 = -20^\circ\text{C}$
 $t_4 = -10^\circ\text{C}$
 $t_5 = 0^\circ\text{C}$.

Fig. 31. Robertson gradiënt-proef.

Wanneer de breuk bij een bepaalde spanning σ ter plaatse van t_3 tot stilstand komt, is de stoptemperatuur -20°C .

Bij een hogere spanning hoort een hogere stoptemperatuur, maar voor de meeste staalsoorten is die stijging gering. Men kan dan ook vaak over de stoptemperatuur van een materiaal spreken. Deze geldt dan tot de vloeigrens.

Wanneer de spanning erg laag is, bijv. 60 N/mm^2 , stopt vrijwel elke breuk. Deze spanning is voor een bepaald staal min of meer constant.

Tegenwoordig worden Robertson-stopproeven meestal isotherm gedaan. Men heeft dan meer proefstukken nodig, maar het resultaat is nauwkeuriger, de proeven zijn eenvoudiger uit te voeren en de proefomstandigheden zijn beter vergelijkbaar met de praktijk.

De resultaten van stopproeven leveren het volgende beeld.

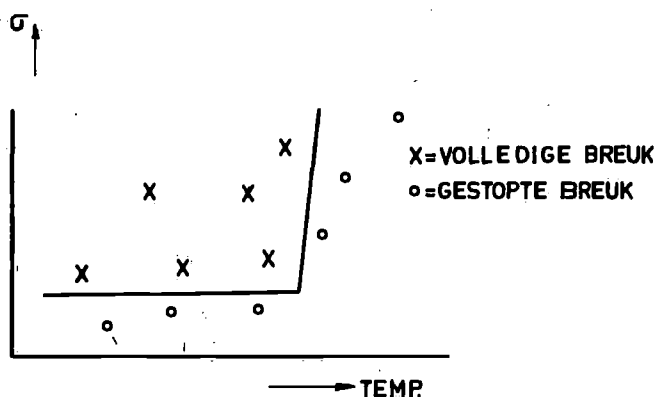


Fig. 32. Resultaten van isotherme Robertson-proeven.

Wells' meest karakteristieke proefresultaten waren als in fig. 33.

In de figuur is de Robertson stopkromme getekend, omdat Wells' proefresultaten goed met de Robertson-resultaten klopten.

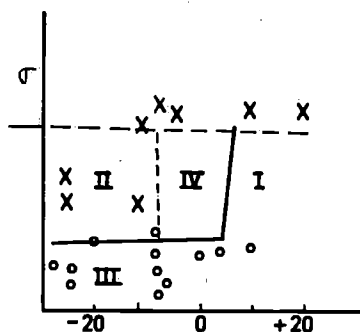


Fig. 33. Resultaten van de proeven van Wells.

Het gebied III in fig. 33 is dat van de partiële breuken, die hoofdzakelijk onder invloed van de residuele spanningen en met de hulp van een lage uitwendige belasting zijn ontstaan.

Buiten het gebied van die residuele trekspanningen was de door de belasting veroorzaakte nominale spanning zó laag, dat de breuken tot stilstand kwamen, net als bij een Robertsonproef bij lage nominale spanning.

Gebied II zal zonder meer begrijpelijk zijn; de breuken daar ontstaan net als in gebied III, omdat de vervormbaarheid van het materiaal aan de kerftippen praktisch nul is in het beschouwde temperatuurgebied, zij het in gebied II toch iets hoger dan in III. De uitwendige belasting is daardoor hoog genoeg om een volledige breuk te geven.

Dit heeft een belangrijke consequentie: het iets betere materiaal van gebied II leidt tot een voor

de praktijk slèchter resultaat dan het slechte materiaal in III:

- in II : complete breuken;
- in III: partiële breuken.

Men zou hieruit de logische gevolgtrekking kunnen maken, dat een veilige temperatuur die is, waarboven géén partiële breuken in gebied II zijn opgetreden.

Ligt deze temperatuur, zoals in fig. 33, boven de Robertson-stoptemperatuur, dan mag de laatste temperatuur als veilig worden beschouwd (mits er geen gevaar bestaat voor lekkage van vloeistoffen of gassen t.p.v. een partieel breukje).

We zitten nu nog met het merkwaardige gebied IV, dat in fig. 33 vrijwel het gehele stuk tussen Robertson-kromme en vloedgrenslijn beslaat: waarom ontstaan er óf partiële breuken bij zeer lage spanning, óf hoogspanningsbreuken na uitgebreid vloeien en geen breuken bij tussenliggende belastingen?

De enig mogelijke verklaring is, dat het materiaal aan de tip van de kerf onder de gezamenlijke invloed van uitwendige belasting en residuele spanningen aanvankelijk een grote kans op breuk heeft, omdat het in de plane strain toestand verkeert. Wanneer het min of meer toevallig die fase doorkomt, bevindt het kerftipmateriaal zich in de veel gunstiger plane stress toestand en kan ineens een aanzienlijk grotere vervorming ondergaan dan tevoren.

De onderzoekingen van Wells hebben zich ook uitgestrekt tot het bepalen van de invloed van voorbelastingen bij een "veilige" temperatuur en van spanningsvrij gloeien.

De eerste behandeling maakte dat de breukspanning bij lage temperatuur nooit beneden de voorbelastingsspanning lag. Laagspanningsbreuken werden er derhalve door voorkomen. De rek tot breuk was echter zo gering, dat van een "veilige" toestand moeilijk kon worden gesproken. Een dergelijke toestand werd wel verkregen door gloeien op 650°C (1 uur), en in mindere mate op 500°C. Het gloeien veroorzaakt in de eerste plaats een verbetering van de staalkwaliteit aan de kerftip (o.a. door H₂-eliminatie); het verwijderen van de residuele spanningen is bijkomstig. De Wells-proefstukken worden meestal notched and welded wide plates genoemd.

Kihara en Masubuchi hebben vooral welded and notched wide plate tests gedaan. Het verschil met Wells' proefstukken is, dat de proefplaten eerst gelast en pas daarna van kerfen voorzien zijn. In termen van overgangstemperatuur uitgedrukt kan dit tot verschillen van 50 à 100°C in vergelijking met notched and welded plates aanleiding geven. De oorzaak is, dat bij Wells' proeven tijdens het lassen het materiaal aan de tip van de kerf sterk vervormd wordt als gevolg van het afwisselend krimpen en uitzetten van het lasmetaal bij het leggen van de verschillende lagen. Bevindt de tip van de kerf zich bovendien op zodanige afstand van de las dat het materiaal daar aan temperaturen tussen 150 en 500°C wordt blootgesteld, dan kan de rek van dat materiaal tot praktisch nul worden gereduceerd. (Bij kunstmatig verouderen doet men iets dergelijks).

Hoe sterk deze achteruitgang kan zijn, is al in 1952 door Soete en van Crombrugge met behulp van trekproeven aangetoond.

De vervormingen die tijdens lassen in de warmtebeïnvloede zone optreden, liggen normaal in de orde van enkele tienden van procenten. Dit heeft

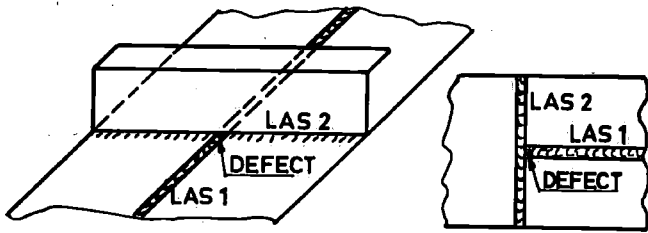


Fig. 34

wel enige nadelige invloed op de kerftaaiheid van die zone, maar lang niet zoveel als voor het materiaal ter plaatse van kerftippen, dat enige procenten vervormd kan worden tijdens het lassen. Hiermede is het grote verschil tussen notched and welded, en welded and notched plates verklaard. Immers in het laatste geval bevindt de kerf zich in betrekkelijk licht beschadigd materiaal.

De vraag rest nu of Wells' proeven niet te streng zijn als indicatie voor wat in de praktijk kan gebeuren. Het antwoord luidt nee. De in de figuren van fig. 34 getekende situaties kunnen gemakkelijk voorkomen.

Hierbij wordt het materiaal ter plaatse van lasdefecten verbrost door later gelegde (kruis)lassen of lagen.

Met het voorgaande is toch nog niet geheel duidelijk, waarom Amerikaanse resultaten van proeven met complete constructie-elementen gunstiger uitkwamen dan op grond van de praktijkervaring kon worden verwacht. De proefstukken waren namelijk geheel volgens werfpraktijk vervaardigd.

Dit probleem is blijven liggen tot omstreeks 1962, toen in het Laboratorium voor Scheepsconstructies is bekeken of in het feit dat schepen niet statisch, maar tengevolge van de golfwerking cyclisch belast worden, niet de oorzaak lag. De Amerikaanse proefstukken zouden dan in een te gunstige conditie, namelijk niet-vermoeid, beproefd worden zijn.

c. Vermoeing

Het is lange tijd een vraag geweest of brosse breuken wel ontstaan ter plaatse van vermoeiingsscheuren. Voor schepen is pas in 1966 aangetoond dat een brosse breuk in de kimbeplating van een tanker wel degelijk ontstaan was vanuit een vermoeiingsscheurtje /3/, maar het kostte wel veel moeite om duidelijk te maken dat het in fig. 35 lichtgekleurde gedeelte van het breukvlak aan vermoeiing te wijten was. Deze praktijkbreuk is geen uitzondering, maar juist erg karakteristiek voor scheepsbreuken. (Die overigens tegenwoordig nog maar zeer zelden voorkomen!).

- Het plaatmateriaal was slecht (10 Joule Charpy-energie bij 0°C).
- De verbindingsstrippen tussen kimkiel en huid waren onderbroken t.p.v. de dwarslassen in de kimbeplating. Hierdoor ontstond een constructieve kerf.
- Aan de einden van die verbindingsstrippen moest een rondgaande hoeklas gelegd worden, waarvan de teen (en randinkarteling) in de overgangszone van de dwarslas in de kimplaat lag.
- De spanningstoestand op de betrokken plaats is sterk triaxiaal, waardoor hoge lasspanningen aanwezig kunnen zijn.

De ontstane brosse breuk is aan een kant in de las gedoken en gestopt. Dit is een klein wonder omdat breuken zich meestal onder invloed van de lasspanningen uit de laszone verwijderen, zoals aan de andere kant inderdaad geschiedde.

Het verraderlijke van vermoeiingsscheuren is dat zij, zolang ze klein zijn, en niet ontdekt kunnen worden, gevaarlijk zijn. Zij groeien dan immers in de las of in overgangszones en bereiken vroeg of laat een plaats waar de materiaalkwaliteit het slechtst is. Is dan toevallig gedurende enige tijd de temperatuur laag en komen hoge belastingspieken voor (winter), dan zijn alle omstandigheden gunstig voor het ontstaan van een brosse breuk. Zodra de vermoeiingsscheur zo groot is geworden, dat de tip buiten de laszone is komen te liggen, is het gevaar voor brosse breuk geweken. Dit lijkt in strijd te zijn met de breukmechanica, maar is het niet zoals fig. 36 duidelijk maakt.

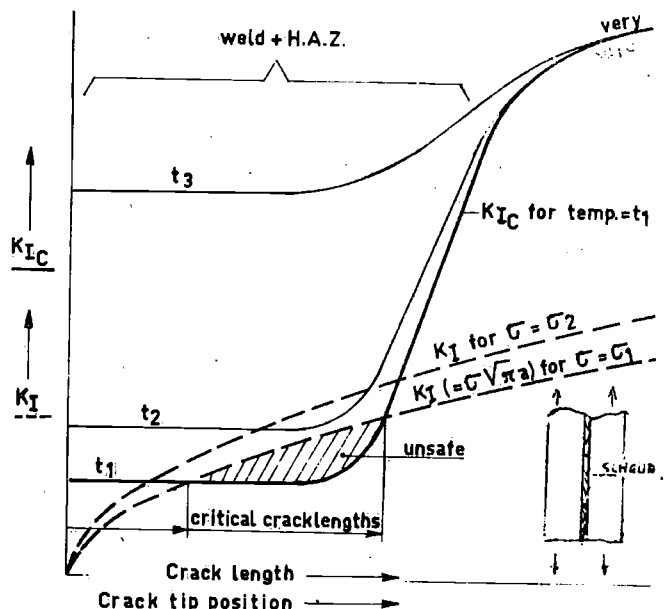


Fig. 36. Relatief belang van scheurlengte en materiaalkwaliteit bij lassen.

Ter afsluiting van dit hoofdstuk worden de proeven besproken die het effect van vermoeiing op de sterkte bij lage temperatuur tevoorschijn gebracht hebben /4/.

De constructies waren van het in fig. 20 getoonde type op ware grootte. De resultaten van 25 jaar (met grote tussenpozen!) Amerikaans en Nederlands onderzoek staan in fig. 37. De stippelijijn "Amerikaans oorlogsstaal" toont een overgangsgebied

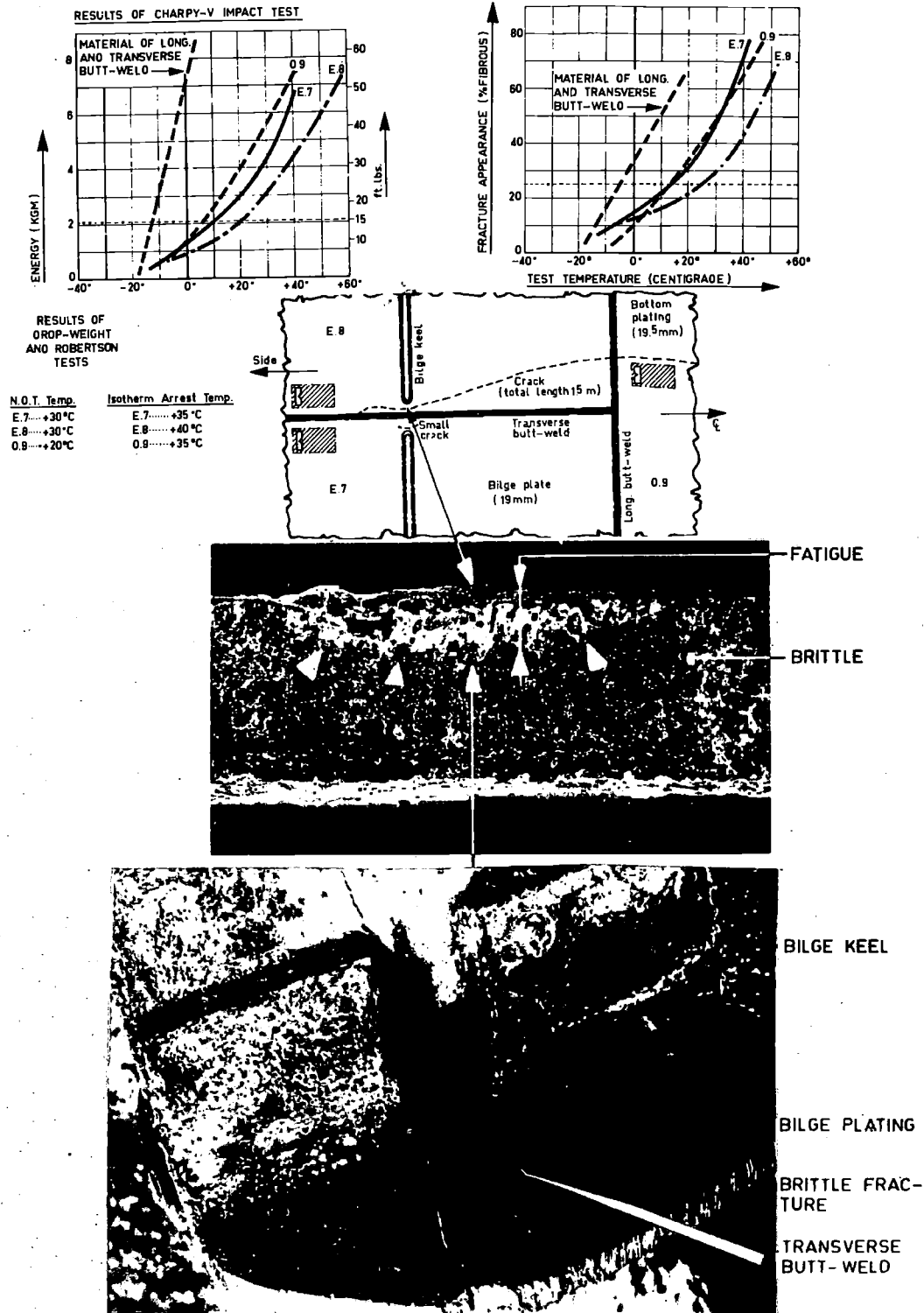


Fig. 35. Brosse breuk in kimbeplating ontstaan t.p.v. een vermoeiingsscheurtje.

bij -18°C . Dit is een overgang van semi-hoogspannings- naar vloeispanningsbreuken als aangeduid in fig. 20. Dit resultaat was indertijd een verrassing omdat deze temperatuur ca. 20°C lager is dan die waarbij schepen voorzien van deze constructies gebroken waren. Ongeveer 20 jaar later zijn in Delft proefstukken van dezelfde vorm tot breuk belast, die gemaakt waren van Al-rustig C-Mn-staal. De resultaten worden aangegeven door de lijn "Fe 410 - niet ver-

moeid". We zien dat het in die tijd gebruikte scheepsstaal verantwoordelijk was voor een verschuiving van de overgangstemperatuur van ca. 20°C in gunstige zin. -40°C is een temperatuur die op zee nooit bereikt wordt in constructies, omdat de watertemperatuur niet lager dan -7°C komt. Dit leek erg geruststellend, maar "klopte" niet met de in fig. 35 behandelde schip-breuk. Pas toen een aantal proefstukken dusdanig vermoeid werd dat kleine scheurtjes werden gevormd,

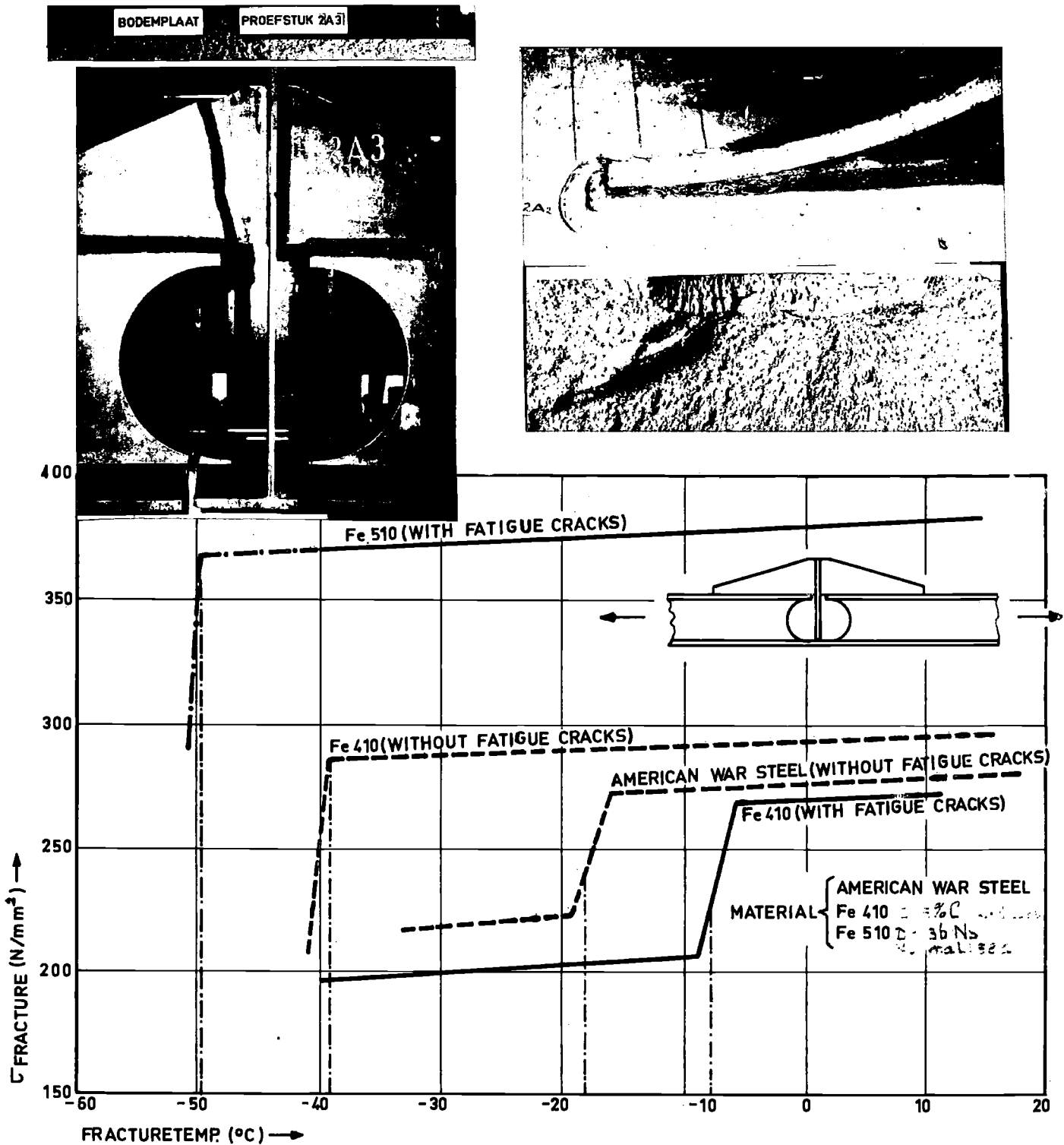


Fig. 37. Invloed van verbeteringen van het scheepsstaal op de breukveiligheid.

ontstonden bij de daarop volgende trekproeven bij lage temperatuur, breuken in een voor schepen interessant temperatuurgebied. De overgangstemperatuur van -10°C was nota bene nog hoger dan die van de (niet-vermoeide) Amerikaanse proefstukken.

Voor het Nederlandse staal veroorzaakte vermoeien een terugval in veilige temperatuur van ca. 30°C . Wanneer deze verschuiving ook voor het Amerikaanse materiaal zou gelden, zou de veilige temperatuur $-18^{\circ} + 30^{\circ} = +12^{\circ}\text{C}$ zijn. Hiermede zijn de praktijkbreuken in de in de 2e wereldoorlog gebouwde schepen wel verklaard. De verbeteringen aan het staal gingen ook na 1965 door. In 1975 zijn in Delft weer constructies van het besproken type beproefd, maar nu vervaardigd van fijnkorrelstaal

met hogere vloeigrens (Fe 510 met Nb, genormaliseerd). De vooruitgang was weer spectaculair: de overgangstemperatuur voor vermoeide proefstukken verschoof 40°C omlaag! Bovendien steeg de breukspanning evenredig met de vloeigrens. Dit was weliswaar volgens de verwachting, maar betekende toch een stevige experimentele bevestiging daarvan. In fig. 37 komt sterk tot uiting dat uit een oogpunt van brosse breuk de materiaalkwaliteit van veel meer direct belang is dan de constructieve vorm. Indirect speelt de vorm wel een rol, doordat in slechte constructies (eerder) vermoeiingscheuren ontstaan met het nu bekende gevolg. Het verschil tussen "vermoeid" en "niet-vermoeid" met betrekking tot de vervormingen tot breuk toont fig. 38. Bij -35°C bedraagt de lokale rek in de

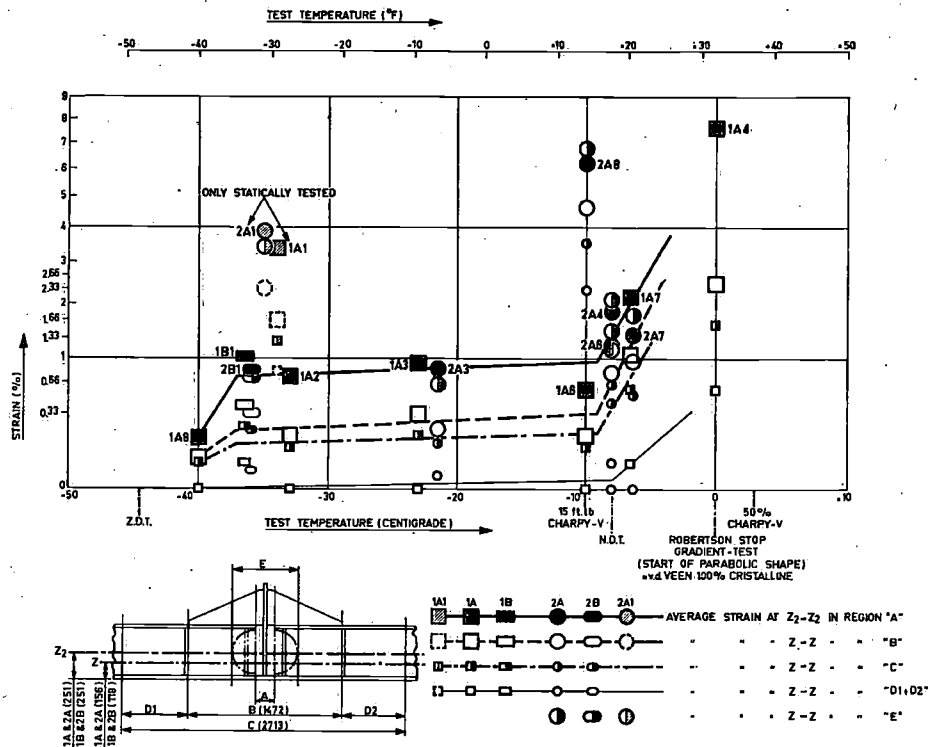


Fig. 38. Gemiddelde en plaatselijke rekken op het moment van breken van Fe 410-proefstukken.

bodemplaat van de Fe 410-proefstukken resp. 4% en 1%. Interessant is dat de overgangstemperatuur voor vermoede constructies aardig overeenkomt met de 21 Joule Charpy-temperatuur en de N.D.T. volgens Pellini.

7. Het mechanisch beproeven van lasmetaal

a. Inleiding

- In principe zijn er twee uitgangspunten mogelijk:
- 1e. Proeven dienen erop gericht te zijn het ontstaan van brosse breuken te voorkomen.
 - 2e. In gelaste verbindingen zijn defecten (in geometrische en metaal-fysische zin) niet te vermijden. Er is derhalve altijd een, zij het kleine, kans op het ontstaan van een brosse breuk in de laszone. In niet-spanningsarm gegloeide constructies zal die breuk uit de laszone lopen t.g.v. de invloed van de lasspanningen. Het basismetaal moet dan in staat zijn die breuk te doen stoppen.

Uit 2e volgt direct dat voor wel-spanningsarm gegloeide constructies aan las en overgangszone dezelfde eisen behoren te worden gesteld als aan het basismetaal. Dit kunnen weer eisen zijn gericht op het voorkomen van ontstaan van breuken of het voortlopen van breuken. (Soms zelfs op beide, waarmee een dubbele veiligheid wordt bereikt (second barrier)).

Een tweede consequentie van 2e zou kunnen zijn dat bij gebruik van scheurstoppend staal in niet-geglouide constructies, de kwaliteit van de las van ondergeschikt belang wordt. Immers elke eventueel beginnende breuk zal tijdig tot stoppen komen. Maar inspectielichamen als klassebureaus zullen die gedachtegang met weinig geestdrift verwelkomen. Het zou op den duur tot een bedenkelijke daling van het kwaliteitsniveau van het laswerk kun-

nen leiden. Voor schepen en vaten was er bovendien een onwonderbaarlijk argument voorhanden: ook kleine, niet-gevaarlijke scheuren zijn bezwaarlijk vanwege lekkage.

Een ander punt van belang was dat de kans op stoppen van een brosse breuk in grote gelaste constructies minder gemakkelijk aan te geven is dan na de uitvinding van de Robertson-stopproef algemeen gedacht werd. Bij pijpleidingen heeft men dit pijnlijk ondervonden. Maar zelfs wanneer hierin door juiste proeven wordt voorzien, moet tegenwoordig toch weer rekening worden gehouden met de kans dat een brosse breuk vóórtloopt. De oorzaak is, dat tegenwoordig hogere belastingsspanningen worden toegelaten dan vroeger, waardoor de lasspanningen minder effect hebben en breuken niet uit de laszone kunnen komen. Laboratoriumproeven hebben dit bevestigd. Verder geldt, dat naarmate de warmteïnbreng hoger wordt, de gradiënt van de lasspanningen afneemt, wat eveneens tot gevolg heeft dat de neiging van een brosse breuk om de laszone te verlaten, afneemt.

Ondanks deze overwegingen is een werkgroep van het International Institute of Welding toch gaan zoeken naar een geschikte beproevingsmethode die de kans op het ontstaan van brosse breuken laat beoordelen.

Allerlei bestaande proeven werden onder de loupe genomen zoals de Schnadt-proef, de Pellini Drop Weight Test, de Explosion Bulge Test, de Side Bend Test van het C.R.M. te Luik, de Drop Weight Tear Test, de Van der Veen proef, de Wells Wide Plate Test, de ESSO-test, de Double Tension Test. Vele hiervan waren duidelijk scheurstopproeven; ten aanzien van enkele bestond verschil van mening. Eigenlijk was alleen de toen nog nauwelijks bekende C.O.D.-proef (fig. 39a) een echte initiatieproef. Bij die proef wordt de belasting echter zo langzaam aangebracht, dat de resultaten dikwijls veel gunstiger zijn dan die van de Charpy-proef.

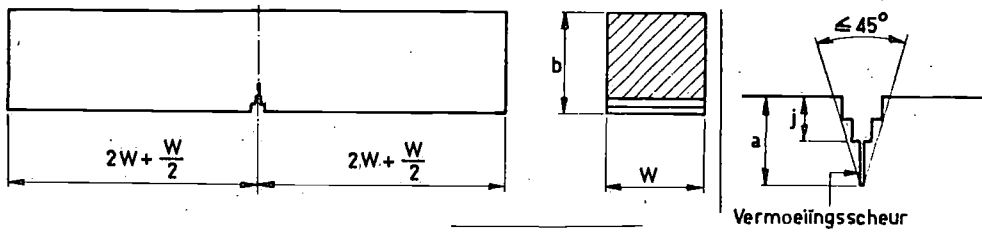


Fig. 39 a Het COD-proefstuk

Afmetingen proefstuk

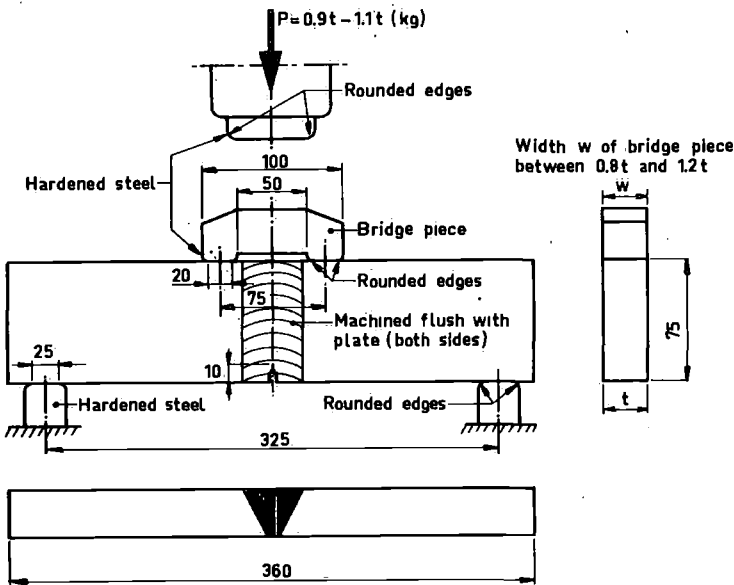
$b = W$

$a = \frac{W}{3}$

$j = \frac{a}{2}$

Opleglengte is 4W.

Vermoeïngsscheur



Observations.

For acceptance testing at least three specimens are needed. The temperature should be a realistic lower service temperature. (For ships for instance -10°C).

Drop weight in kg is equal to thickness of plate in mm + or - 20%.

In case the weight in kg is not equal to plate thickness in mm, the drop height should be corrected correspondingly so that weight * height remains the same.

Drop height: first blow: height in cm is equal to specified lower yield point of plate material in kg/mm^2 rounded off upwards.

Step magnitude of consecutive blows: 100 mm below 1000 mm and 200 mm above 1000 mm. (So for $\sigma_y = 24 \text{ kg}/\text{mm}^2$ initial height is 30 cm; the height for the consecutive blows is 40, 50 etc. cm's respectively.)

After each blow the residual C.O.D. is measured as indicated in the figure. The weld is acceptable when the results of the three specimens conform to $\text{C.O.D.}_1 \times \text{C.O.D.}_2 \times \text{C.O.D.}_3 \geq (0,06)^3 \text{ mm}^3$.

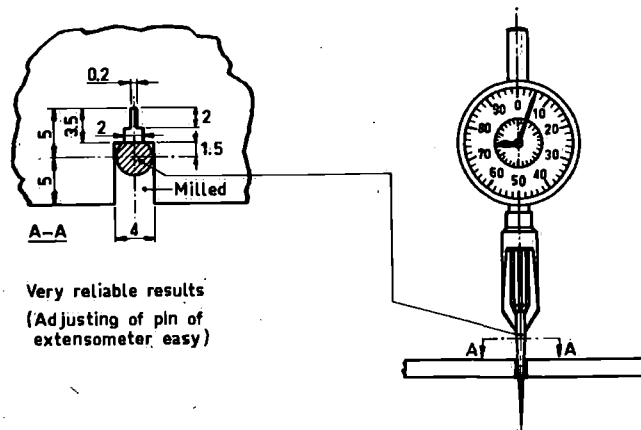
When the results do not meet this requirement, three more specimens may be tested after which the results of all have to be taken together:

$\text{C.O.D.}_1 \times \text{C.O.D.}_2 \times \text{C.O.D.}_3 \times \text{C.O.D.}_4 \times \text{C.O.D.}_5 \times \text{C.O.D.}_6 \geq 0,06^6 \text{ mm}^6$.

A specimen is finished when a brittle crack of at least 5 mm in depth has developed (5 mm at half plate thickness). When the residual C.O.D. shows a sudden large increase a 'tunnel crack' may be the cause. This can be revealed by final fracturing after ink-staining.

For stress-relieved structures the minimum required C.O.D. is 0,03 mm.

Suggested: 3 temp's and 3 spec's per temp.



Very reliable results
(Adjusting of pin of extensometer easy)

Fig. 39b. Niblink test procedure.

Dit maakte dat de proef in die tijd weinig kans had om als universele vervanging van de Charpy-proef aanvaard te worden. Alleen in de grote-drukvaten-wereld lag dit anders. Daar voldeed de Charpy-proef totaal niet, vanwege de kleine afmetingen in vergelijking met de grote wanddikten van de vaten. Tevens vond men dat die vaten in de praktijk uitsluitend statisch belast werden, waardoor een schok- of slagproef niet terecht zou zijn.

Voor constructies als schepen, bruggen e.d. wilde de werkgroep het schokkarakter in de beproeving graag behouden. Men streefde ernaar een als het ware verbeterde Charpy-proef te ontwikkelen. Dit heeft eerst geleid tot de z.g. Niblink-proef van

Van den Blink en de schrijver. Tot ieders verrassing resulteerden de zeer essentiële verbeteringen verwezenlijkt in die proef niet tot werkelijk spectaculaire verschillen tussen de Niblink- en de Charpy-resultaten. Eén conclusie van de werkgroep luidt dan ook dat voor normaal constructiewerk de in zwang zijnde Charpy-eisen redelijk voldoen. Alleen voor bijzondere gevallen (extreme belastingcondities, zeer lage temperaturen, grote plaatdikten, speciale en zeer sterke staalsoorten, bijzondere lasmethoden, grote risico's voor personen, milieu en materieel) dient een beroep te worden gedaan op meer betrouwbare afnameproeven die de praktijkomstandigheden vergaand nabootsen.

b. Het effect van verbeteringen aan de Charpy-proef

In fig. 40 zijn de voor- en nadelen van de Charpy-proef samengevat. De waarde van de proef kan worden verhoogd door het breukuiterslijk en de contractie aan de kerftip mee te laten spelen. Verder kunnen door instrumenteren initiatie- en propagatie-energie onderscheiden worden. Maar voor gelaste verbindingen blijft het probleem welke Charpy-waarden representatief zijn voor het breukgedrag. Dit illustreert fig. 41. De waarden voor het lasmetaal op de halve dikte zijn lager dan voor het lasmetaal dicht bij het plaatoppervlak. De eerste gedachte is vanzelfsprekend om de laagste waarden bij de beoordeling van de kwaliteit te hanteren. Dit wordt in dit geval nog gesteund door de overweging dat rond defecten op de halve dikte een triaxiale spanningstoestand bestaat (plane strain). In zo'n geval is de rek tot breuk lager dan in een toestand van plane stress, zoals aan de oppervlakte. Er zijn echter meer punten van belang zoals de aard van de defecten (scherp, afgerond) en het feit of de lassing ter plaatse trek- of drukspanningen zijn. Wat evenzeer behoort mee te tellen is de kans op totale breuk, wanneer binnen in de las een scheurtje begint. Als het materiaal aan de oppervlakte van uitstekende kwaliteit is, kan een breukje daar tot stilstand komen. In het omgekeerde geval: slecht materiaal aan de oppervlakte en beter materiaal inwendig, is die kans zeer klein. Het stoppen van een breuk begint immers altijd aan de oppervlakte door shearlipvorming, vanwege de gunstige spanningstoestand aldaar. De aard van de belasting speelt ook een rol. Vermoeiingsscheuren ontstaan zeer vaak ter plaatse van randinkartelingen, dus aan het oppervlak. Tenslotte moeten nog de intensiteit en betrouwbaarheid van het niet-destructief onderzoek genoemd worden. (Dunne of dikke plaat, toegankelijkheid etc.).

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat de belangrijkste verbetering van de Charpy-proef moet zijn het gebruik van niet te kleine, gelaste proefstukken van de volle plaatdikte. In fig. 42 worden de in eerste instantie door de werkgroep bestudeerde mogelijkheden bij elkaar gebracht en vergeleken. Het zijn alle drie proeven waarbij de weerstand tegen ontstaan van scheuren wordt bepaald.

Het belangrijkste verschil tussen de statische C.O.D.-proef en de Niblink-proef zit in de belasting. Stootbelastingen komen in de praktijk vooral voor in de vorm van onregelmatigheden en ongelukken (botsingen, vallen van lasten door breuk van hijsogen e.d., explosies, ruw sluiten van grote openingen). Daarnaast kunnen in een constructie schokken optreden door interne oorzaken; fig. 43 verklaart dit nader. Ze zijn meestal nauwelijks merkbaar. Toch is een lichte schok in de onmiddellijke nabijheid van een scheur dikwijls gevaarlijker dan een zware schok op ruime afstand.

Bij de Niblink-proef (fig. 39b) wordt aan deze overwegingen in redelijke mate tegemoetgekomen. Een fundamenteel betere oplossing zou zijn van het lasmetaal te eisen dat het in staat is brosse breukjes, onmiddellijk na het ontstaan, tot stoppen te brengen. Van de bestaande en ingevoerde proefmethoden is de enige die hierop gericht is, de Pellini Drop Weight Test. Zie fig. 44-2. Helaas is die proef voor vele situaties niet toe te passen zoals aangegeven in de figuur. Een andere mogelijkheid van de constructeur om zijn constructie veilig te maken is dermate grondig niet-destructief onderzoek van alle laskruisingen uit-

voeren, dat elk defect wordt opgespoord. Repareren is dan de minst aantrekkelijke en wellicht minst doeltreffende oplossing. Een goed gecontroleerde plaatselijke gloeibehandeling verdient de voorkeur om een eventueel aanwezige slechte materiaaltoestand te verbeteren. Daarna zal de aanwezigheid van een of meer kleine defecten in het algemeen geen gevaar meer inhouden voor de constructie. De derde mogelijkheid aangegeven in fig. 44 zal in paragraaf c worden besproken. Voordien dient te worden gekeken naar het effect van de besproken verbeteringen van de Charpy-proef. Daartoe is een groot aantal proefresultaten samengevat in fig. 45. De proeven zijn in de laboratoria van 10 verschillende landen gedaan. Een gedeelte van de spreiding van de gegevens zal daaraan te wijten zijn. Bijvoorbeeld is niet altijd bekend waar de Charpy-staafjes uit de lassen genomen zijn.

Wanneer we nu de Niblink-proef zien als iets dat de omstandigheden die in de praktijk voorkomen goed nabootst, dan geeft fig. 45 een idee van de betrouwbaarheid waarmee men met behulp van Charpy-gegevens de veiligheid van constructies kan beoordelen. Van alle resultaten geven alleen degenen, die boven de spreidingsband liggen een te optimistisch beeld van de kwaliteit van de constructie. Dit wil zeggen dat de Charpy-proef in bijna 80% van de gevallen geschikt was (of te veilig). Wat de andere gevallen betreft, moet opgemerkt worden dat voor de sterkere en speciale staalsoorten dikwijls meer dan 35 Nm/cm² geëist wordt, of dat de beproevingstemperatuur lager wordt gesteld dan de laagste diensttemperatuur. De conclusie uit het voorgaande kan derhalve luiden dat wanneer de laagste Charpy-waarden voor een las of overgangszone, verkregen bij de laagste bedrijfstemperatuur, hoger zijn dan 35 Nm/cm² er een goede garantie is dat de constructie in de praktijk zal voldoen.

De hoogte van de eis zou eventueel kunnen worden aangepast aan de sterkte en de samenstelling van het lasmetaal, en het basismetaleel. In de gevallen dat het laatste in staat is scheuren tot stoppen te brengen wordt de veiligheid uiteraard nog een orde groter.

Het hanteren van de Charpy-proef houdt in dat in minstens één op de vier gevallen een constructie wordt verkregen die te veilig is, d.w.z. te goed van kwaliteit. Uit een oogpunt van economisch construeren zal dit niet altijd gewenst zijn. In die gevallen kunnen betere proeven uitkomst geven. Anderzijds is het niet altijd zo dat de constructie onveilig is als de las niet aan de Charpy-eisen voldoet. Het heeft dus altijd zin om dan met behulp van Niblink-proeven de betrokken instanties ervan te overtuigen, dat de constructie wel degelijk "fit is for purpose". Voor statisch belaste constructies is de C.O.D.-proef het meest aangegeven, omdat die proef al zeer goed is ingevoerd. Een nog betere proefmethode wordt in de volgende paragraaf aan de orde gesteld.


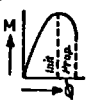
c. Vermoeien bij lage temperatuur

Een groot bezwaar van zowel C.O.D.- als Niblink-proeven is dat in feite niet meer dan enkele mm³'s materiaal beproefd worden van een proefstuk dat vele cm³'s metaal bevat. Wil men een nauwkeurige, d.w.z. statistisch verantwoorde, interpretatie van de proefresultaten geven, dan is een groot aantal proefstukken vereist. Dit geldt in het bijzonder voor met de hand gelaste proefstukken, waar van plaats tot plaats grote verschillen in breuktaaiheid kunnen voorkomen. Aan dit bezwaar wordt

VOORDELEN

- GOEDKOOP -
- GOED INGEVOERD -
- VEEL ERVARING -
- EENVOUDIG -
- AFTASTEN MOGELIJK - (SCREENING)

NADELEN

- NIET VOLLE PLAATDIKTE - (spanningsbestand)
- ONSCHERPE KERF - ("shearlip" grootte)
- PLAATS-INVLOED - 
- ENERGIE = SOM VOOR ONTSTAAN EN VOORTPLANTEN - 
- PROEFRESULTAAT IS ENERGIE I.P.V. VERVORMING -
- SCHEUR PLANT ZICH VOORT IN ZWAAR VERVORMD MATERIAAL - (DEELS GEREKT, DEELS SAMENGEPERST)

VOORTPLANTEN

ONTSTAAN

HOGE BELASTINGSSNELHEID

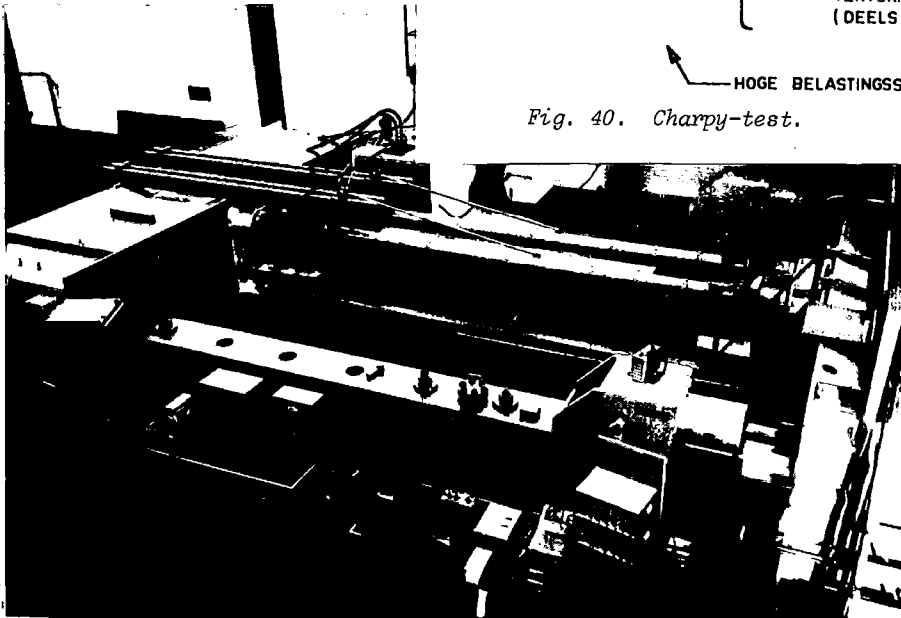


Fig. 40. Charpy-test.

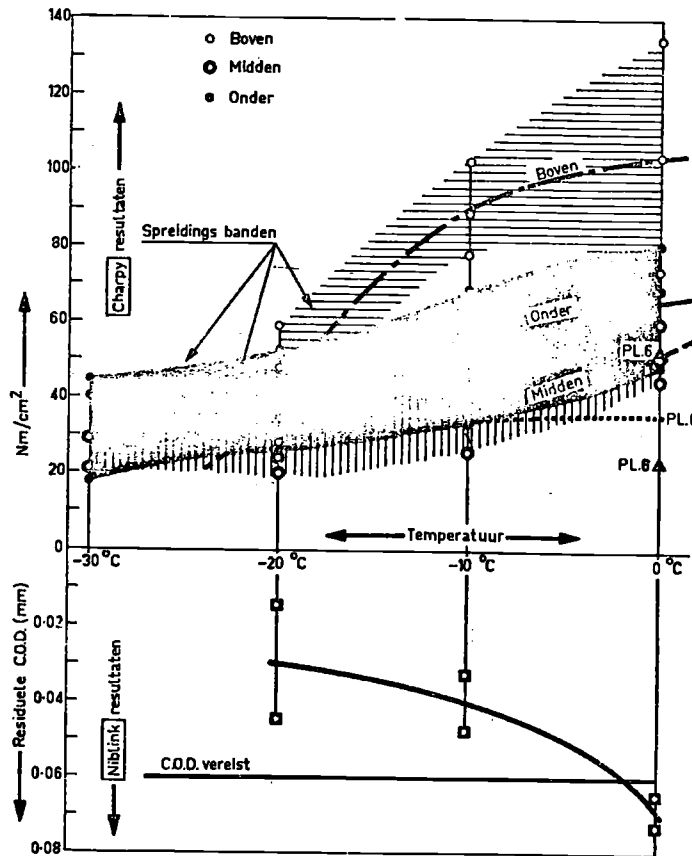
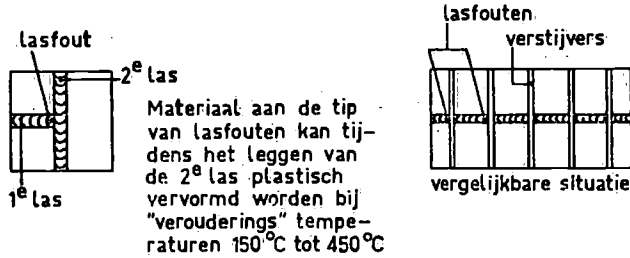


Fig. 41. Invloed van de heterogeniteit van met de hand gemaakte lassen op proefresultaten (St. 52-27 mm).

INTERNE OORZAKEN VAN DYNAMISCHE BELASTING EN "POP-IN"
T.P.V. BESCHADIGD MATERIAAL AAN KERFTIPPEN.

- a. VERBROSSING DOOR WARM VERSTEVIGEN TIJDENS LASSEN
(VEROUDEREN) EN AANWEZIGHEID VAN HOGE RESIDUELE
SPANNINGEN. (GREENE-WELLS [4]) :



- b. VERBROSSING DOOR VERMOEÏING (PLASTISCHE ZONES) [13]
- c. WATERSTOFVERBROSSING
- d. COMBINATIE a. + b. HET MEEST GEVAARLUK [3] ; [13]

Fig. 43.



FIG. 44 OPLOSSINGEN:

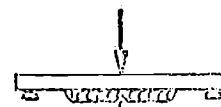
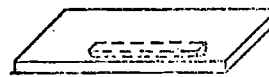
1. 100% NIET DESTRUCTIEF ONDERZOEK VAN ALLE LASKRUISINGEN (vermijden van ontstaan van scheuren)
2. LAS- EN MOEDERMATERIAAL MOETEN BRASSE BREUKJES IN HET BEGINSTADIUM (kleine lengte) TOT STOPPEN KUNNEN BRENGEN.

FUNDAMENTELE PROEF:

PELLINI-DROP WEIGHT PROEF [5]

HUIDIGE BEZWAREN:

- NIET GESCHIKT VOOR DIKKE PLAAT-
- GROFKORRELIGE ZONES VERBETEREN IN KWALITEIT TIJDENS HET LEGGEN VAN DE BRASSE LAS, WAARDOOR EEN TE OPTIMISTISCH PROEFRESULTAAT WORDT VERKREGEN -



gekerfde
brasse las

3. VERMOEÏEN BIJ LAGE TEMPERATUUR (ZIE FIG. 44b)

Fig. 44

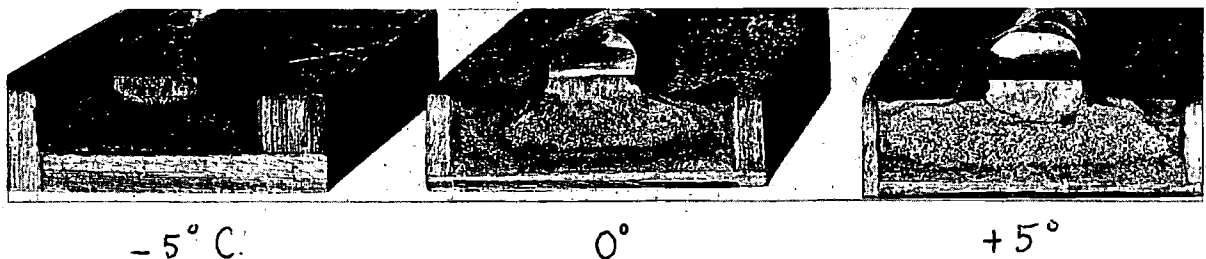


Fig. 44a. Pellini Drop Weight Test.

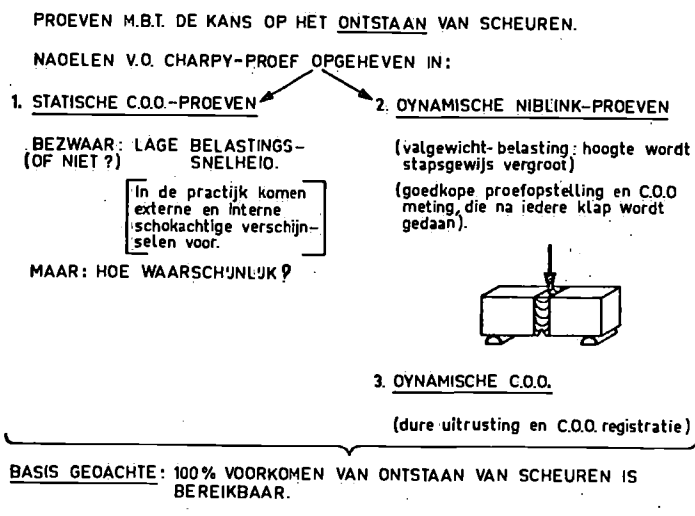


Fig. 42. Proeven ter beoordeling van de weerstand tegen het ontstaan van scheuren.

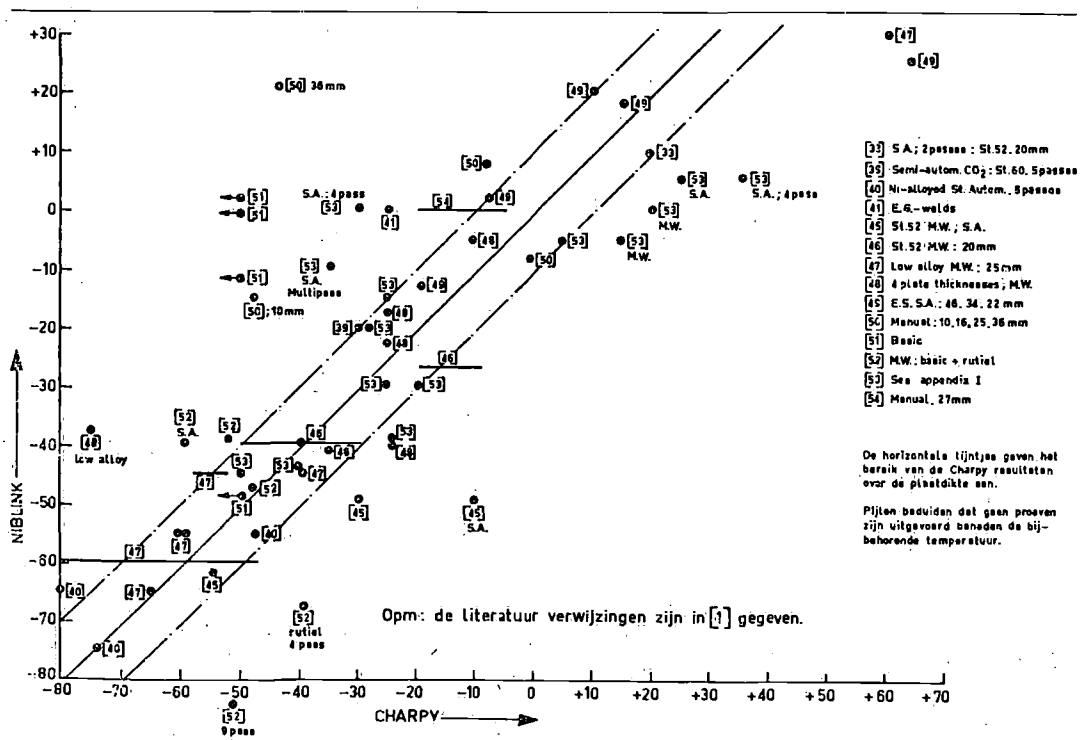
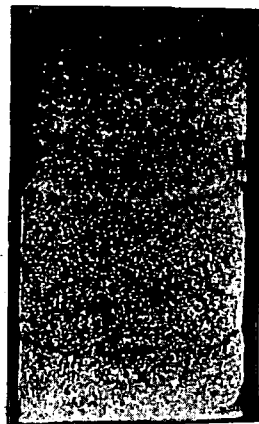


Fig. 45. Vergelijking tussen Charpy- en Niblink-resultaten in termen van temperatuur (Charpy: 35 Nm/cm²).

FIG. 46 VERMOEIEIEN BIJ LAGE TEMPERATUUR.

VOORDELEN:

1. REALISTISCHE BELASTING, KERF(SCHEUR) EN VERBROSTE ZONE.
2. MOGELIJKHEID VAN DYNAMISCHE "POP-INS"

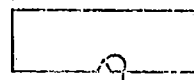


----- begin kerf
 ----- vermoeid
 ----- brosse stap
 ----- vermoeid
 etc.

3. PROEF LEVERT DIRECT EEN CRITISCHE SCHEURLENGTE VOOR EEN BEPAALDE NOMINALE SPANNING WAARUIT $K_{cr} = \sigma_{nom} \sqrt{Y \cdot a_{cr}}$ IS TE BEREKENEN.
4. TIJDENS SCHEURGROEI WORDT GROOT DEEL VAN PROEFSECTIE "AFGETAST".



duizenden initiatie punten.



één initiatie punt

C.O.D.
NIBLINK

(scheur "vindt" zwakste plaats).

5. DE BROSE BREUKJES DIE ONTSTAAN IN DE VERBROSTE PLASTISCHE ZONE EN BIJ HET VERLATEN VAN DIE ZONE STOPPEN; GEVEN EEN GOEDE INDICATIE VAN DE N.D.T. (NIL-DUCTILITY-TEMPERATURE).
6. GEEN C.O.D. METINGEN NODIG NOCH CORRECTIES I.V.M. ONZEKERHEID T.A.V. DE PLAATS VAN HET DRAAIPUNT.

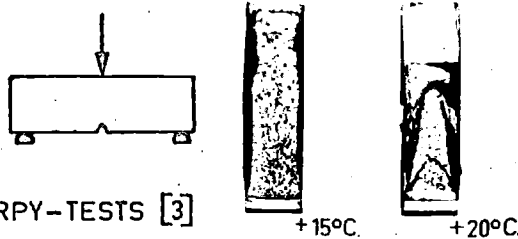
tegenoetgekomen door vermoeien bij lage temperatuur. Deze methode, die ontwikkeld is in het Laboratorium voor Scheepsconstructies van de T.H. Delft, heeft nog meer voordelen, die in fig. 46 zijn samengebracht. Het afgebeelde breukvlak vereist enige toelichting. Het gebruikte proefstuk was van het onder fig. 46-4 getekende type: 34 mm plaat van St. 52 met Nb, electrogas gelast. De beginkerf lag in de overgangzone op 1 mm van de smeltlijn. Tijdens het vermoeien bij -20°C ontwikkelde zich eerst een vermoeiingsscheurtje van enkele mm's lengte. Daarna ontstond een bros breukje dat onmiddellijk stopte, waarna het materiaal weer verder scheurde door vermoeiing tot een tweede bros breukje ontstond enz. Aanvankelijk werd gedacht dat de brose stapjes optraden als gevolg van grote verschillen in breuktaaiheid van het materiaal op verschillende plaatsen langs de smeltlijn. Dezelfde

proef is daarna gedaan met een ongelaste plaat van St. 52 Nb die 2 uur lang op 1300°C gegloeid was. Weer ontstonden tijdens vermoeien brose stapjes. De lengte ervan kwam goed overeen met de berekende diepte van de plastische zones aan de tip van de scheur. Kennelijk ging de kwaliteit van het materiaal in die plastische zones door het afwisselend rekken en krimpen tijdens vermoeien zo sterk achteruit, dat bij de proeftemperatuur een brosbreukje kon ontstaan. Het materiaal buiten die zones bleek dan nog voldoende kerftaai te zijn om die kleine breukjes tot stoppen te dwingen. Anders gezegd, de proeftemperatuur lag (net) boven de Nil Ductility Temperature van het materiaal in de overgangzone bij de smeltlijn. Men moet de brose stapjes dus niet zien als aanwijzingen voor het feit dat de verbinding bij de proeftemperatuur niet voldoende veilig is. Voor constructies die

BESTE OPLOSSING: GEBRUIK SCHEURSTOPPEND STAAL

VEREIST: RESULTATEN VAN GROTE PROEFSTUKKEN
(Robertson lange plaat)

BETROUWBARE BENADERING: DROP WEIGHT TEAR TESTS



ONBETROUWBAAR: CHARPY-TESTS [3]

PROBLEMEN: NIET GEHEEL VEILIGE OPLOSSING VOOR DWARSLASSEN
WANNEER DE LASSPANNINGEN NIET IN STAAT ZIJN
SCHEUREN UIT DE LASZÖNE TE LEIDEN.

DUS INGEVAL VAN: a. SPANNINGSARM GLOEIEN
b. LASSEN MET HOGE WARMTEINBRENG [3]
c. HOGE NOMINALE SPANNINGEN

FIG. 47

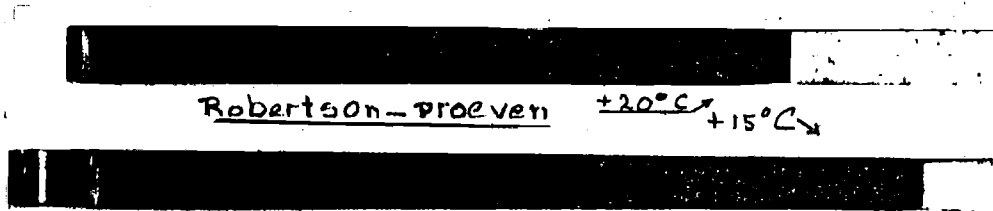


Fig. 47

hoogbelast worden en waarvoor breuk een catastrofe betekent, zal men natuurlijk een extra veiligheidsmarge verlangen. Het criterium is dan dat het oppervlak tot op ca. 15 mm van de kerftip uitsluitend uit een vermoeiingsscheur mag bestaan. (Bij de in het Lab. voor Scheepsconstructies gebruikte proefstukmaten en belastingen wordt bij die scheurlengte de restdoorsnede volledig plastisch).

Overigens is voor dat soort constructies het gebruik van scheurstoppend staal een eerste vereiste. Figuur 47 vat de overwegingen hierbij nog eens samen.

8. Het gevaar van schokbelastingen in constructies

(Dit hoofdstuk komt achteraan omdat informatie uit de vorige hoofdstukken ervoor nodig is).

Over het gevaar van schokbelastingen in constructies wordt door de deskundigen sterk verschillend gedacht. Dit komt voor een deel doordat er zo weinig over bekend is. Praktijkbreuken worden vrijwel nooit toegeschreven aan schokbelastingen. Vanzelfsprekend zijn diverse schip-breuken tijdens de 2e wereldoorlog veroorzaakt door explosies. Maar men heeft er geen idee van of bijv. een explosie op enige afstand van een schip (bijv. 10 m) als een echte schok gevoeld wordt. Met andere woorden wanneer een schip in die situatie breekt, gebeurt dit dan als gevolg van de schok (dynamische invloed) of als gevolg van de extreem hoge belasting (quasi-statisch).

In hoofdstuk 7 is gesteld dat drukvaten alleen aan statische belastingen worden onderworpen, maar gasflessen zijn ook drukvaten, en daar wordt o.a. bij

het verladen, niet zachtzinnig mee omgesprongen. Een brug wordt normaal quasi-statisch - d.w.z. laag-frequent - belast. Maar bij een verkeersongeluk kan een auto een pijler raken of een eindje door de lucht vliegen en met een klap neerkomen. Is dit alles gevaarlijk of niet? In fig. 43 zijn andere oorzaken van - lokale - schokbelastingen vermeld, die ook voor statisch belaste constructies gelden.

Dat er een groot verschil is in de taaigheid van staal onder langzame en snelle belasting is overbekend. (De Charpy-proef ontleent er haar bestaan aan). Het duidelijkst komt dit tot uiting bij resp. het ontstaan en het voortplanten van brosse breuken. Voor een ongelaste plaat van vloeistaal van bijv. 30 mm dikte (A-kwaliteit) ligt de initiatie-overgangstemperatuur - dat is de overgang van hoog- naar laagspanningsbreuken - bij -80°C à -100°C . De stoptemperatuur ligt tussen 0 en $+30^{\circ}\text{C}$.

Figuur 48 toont het resultaat van buigproeven onder langzame en schokbelasting voor verschillende typen kerven. De vervormingen onmiddellijk achter de kerf waren gemeten met rekstrookjes van 2 mm lengte. De dikke lijnen geven de resultaten van valproeven. Het blijkt dat schokbelastingen des te gevaarlijker zijn naarmate de kerven scherper zijn. Men moet hiervoor vergelijken de resultaten voor V-notches en Pellini-notches. De laatste is ultra-scherp, omdat het een brosse breuk in een brosse las is. Een vermoeiingsscheur is praktisch even scherp. Toch zijn de resultaten hiervoor nog ongunstiger. Dit komt doordat vermoeien een dubbel effect heeft: er ontstaat een scheur en het materiaal bij de tip van de scheur is vermoeid. Het eerste is verantwoordelijk voor

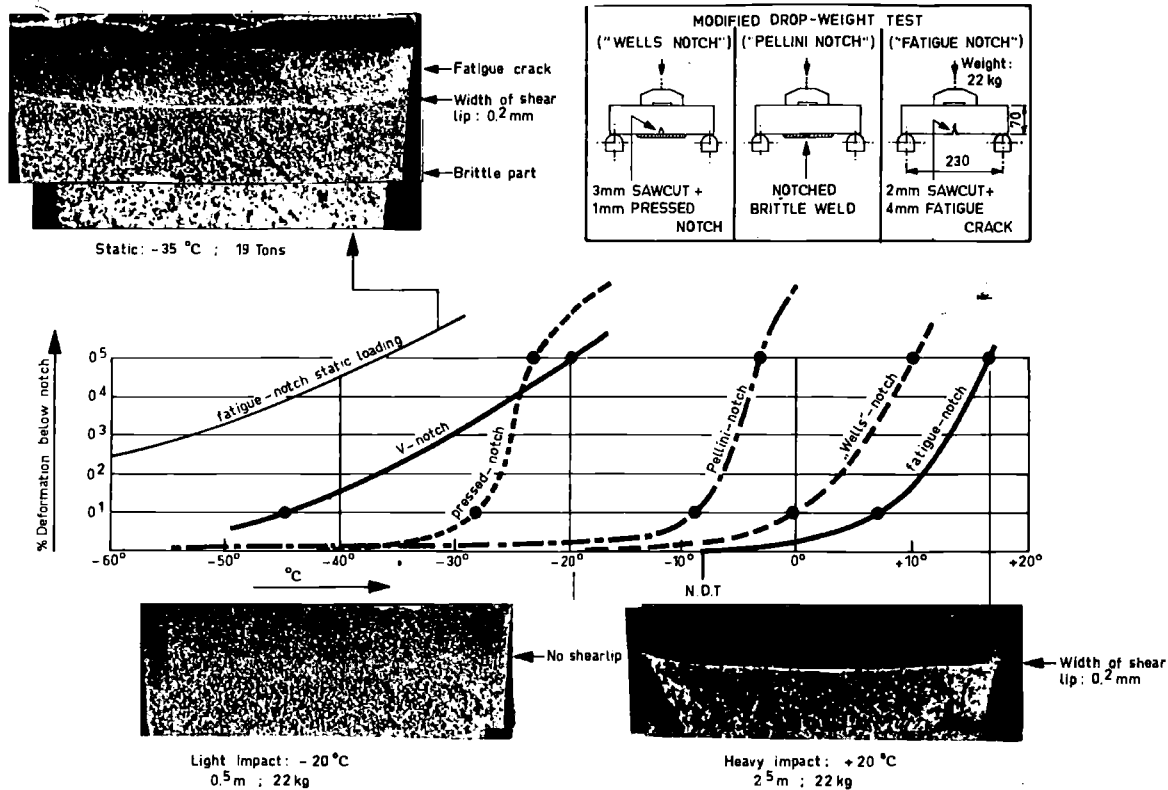


Fig. 48. De invloed van schokbelastingen op vermoeide constructiedelen.

een verschuiving van de overgangstemperatuur van ca. 30°C . Het tweede voegt er nog eens 20°C aan toe.

Wanneer we nu de resultaten van vermoeide proefstukken vergelijken voor statische en schokbelastingen, dan zijn die bepaald alarmerend voor de laatste. Het verschil in overgangstemperatuur bedraagt minstens 60°C . De teksten bij de breukvlakfoto's onderstrepen dit nog eens.

Een statisch belast proefstuk breekt bij -35°C pas na aanzienlijke plastische vervorming. De breuklast is 19 ton. Op het breukvlak is te zien dat er enige afschuiving heeft plaatsgevonden (shear lip) voordat de breuk instabiël werd. Een ander proefstuk dat bij -20°C op schok werd belast, vertoont geen spoor van plastische vervorming of afschuiven. Het proefstuk brak als glas onder een valenergie van slechts 220 Joule. Men moet zich realiseren dat dat stuk staal van 20 mm dikte met een voorhamer doormidden geslagen kan worden als de temperatuur maar lager is dan -10°C en er een kleine vermoeiingsscheur in zit. Ditzou met een houten of kunststoffen proefstuk niet lukken! Deze proeven waren aanleiding om enkele van de eerder besproken langsspanconstructies op schok te beproeven. Een viertal gebroken constructies werd gerepareerd. Vervolgens werden de bestaande scheuren "aangescherpt" door nog een tijdje te vermoeien.

De proefstukken werden daarna aan een lage axiale trekbelasting onderworpen (1/3 vloeilast) bij -20°C . In die toestand werden zij op schok belast door een gewicht van 22 kg te laten vallen van 3 m hoogte op het dwarsschot (dus loodrecht op de trekrichting). Twee van de vier proefstukken braken hierbij doormidden. Rekstrookmetingen wezen uit dat die breuken niet werden voorafgegaan door lokale plastische vervormingen.

De vraag die overblijft is: kunnen dergelijke schokbelastingen voorkomen in schepen? Het antwoord is ja. Lading kan uit de haak vallen, of te hard worden neergezet. De lasthaak zelf kan met

een klap tegen de luikhoofdbrandplaten, het dek of de dubbele bodem slaan. Een belangrijk punt is echter dat dergelijke gebeurtenissen zelden of nooit breuken veroorzaken. De kans is kennelijk erg klein. Hoe dit komt zal verder worden besproken. Eerst zal het enige geval van een door schok veroorzaakte scheepsbreuk dat de schrijver bekend is, worden besproken.

Het betrokken schip was uitgerust met rollende luiken, die in de haven aan de voorzijde van het luik op het dek stonden. Bij het sluiten werd het eerste luik van voor naar achter gerold, tot het tegen een aanslag kwam. Het tweede luik rolde dan tegen het eerste enz. Elke keer kreeg de aanslag aan het eind van het luik een stoot. Na enige jaren in bedrijf te zijn geweest, had zich in de langsscoaming van het luik ter plaatse van de aanslag een klein vermoeiingsscheurtje ontwikkeld. Het was te klein om te kunnen worden ontdekt. Dit laatste gebeurde pas toen de luiken eens werden gesloten bij vriezend weer en de beladings-toestand van het schip een hogging (opbuigend)

langsscheeps moment veroorzaakte. In de langsscoaming ontstond een brossse breuk die zich over de volle breedte van het dek uitbreidde. Deze gebeurtenis, en de zeldzaamheid ervan doet vermoeden dat stootbelastingen slechts dan brossse breuken kunnen veroorzaken, wanneer de stoot dicht bij een scherpe kerf optreedt. Maar als dat zo is, dan moeten schokgolven in staalconstructies snel uitdempen. Dit is op verschillende manieren in het Lab. voor Scheepsconstructies van de T.H. Delft onderzocht.

Eerst werd een 10 m lange en 0,5 m hoge plaat aan een kant ingeklemd en aan het andere eind aan een stootbelasting onderworpen. De ontstane schokgolven bleven praktisch constant over de volle lengte van de plaat (d.w.z. verloren zeer weinig energie). Daarna werd een schokbelasting uitgeoefend op een verticale stijl van een 12 m hoog schot dat op 1/3 en 2/3 van de hoogte voorzien was van dwarsbalken (stringers). Rekstrookmetingen wezen uit dat de schokenergie zich zeer snel verdeelde over

de breedte van het schot en dat voorbij de eerste stringer het schokeffect nauwelijks nog merkbaar was, behalve dan in de vorm van trillingen. Dit steunt de opvatting dat stoten alleen gevaarlijk zijn als ze zeer dicht bij vermoeiingsscheuren optreden.

Er zijn ook nog metingen gedaan aan een schip tijdens slamming. Ook hier bleek het - overigens lichte - schokeffect alleen merkbaar te zijn in de onmiddellijke omgeving van de klappen. Daarachter was de schokenergie omgezet in langsscheepse trillingen, waarvan de tweeknoops verreweg het belangrijkste was. Deze trillingen zijn, in vergelijkingen met schokverschijnselen, zo laag-frequent dat zij niet gevaarlijk zijn uit een oogpunt van brosse breuk. Dit is gebleken uit weer andere proeven in het Lab. voor Scheepsconstructies. Belastingfrequenties in de orde van 200 Hz moeten nog als laag-frequent worden beschouwd voor brosse breuk. Pas wanneer de frequenties in de orde van 10.000 Hz liggen, kan van gevaarlijke schokken worden gesproken. Dergelijke frequenties ontstaan (gelukkig) niet als gevolg van slamming, maar kunnen alleen optreden door klappen van staal op staal.

Literatuur

- /1/ E.R. Parker, "Brittle behavior of engineering structures", New York, John Wiley & Sons, Inc., 1957.
- /2/ W.J. Hall, H. Kihara, W. Soete & A.A. Wells, "Brittle fracture of welded plate", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1967.
- /3/ J.J.W. Nibbering, "Partial fracture of bilge and bottomplating of an oil-tanker", Welding in the world, 1968.
- /4/ J.J.W. Nibbering, Trans. R.I.N.A., vol. 109, jan. 1967;
Trans. R.I.N.A., vol. 118, 1976.
- /5/ W.S. Pellini, "Correlations of brittle fracture service failures with laboratory notch-ductility tests", Welding Journal, vol. 37, no. 9, sept. 1958.
- /6/ Final report of I.I.W. Working Group 2912 "Brittle fracture tests for weld metal", Welding in the world, vol. 13, no. 7/8, 1975.

