

Carina Berggren

Monica Markinger

SPRICKTILLVAXT I STYV PVC

SP-rapport 1989:51

Materialteknik och mekanik

Göteborg 1989

Abstract

Crack growth in unplasticized PVC

In pressure pipes, conventional materials have been replaced by unplasticized PVC. This replacement has not been without problems. In some cases the uPVC pipes fail in a brittle manner and long before the predicted lifetime.

A testing method, in which the deflection of a prenotched curved pipe section is used to determine the crack growth, has been examined.

The crack length has been calculated by using deflections and compliances.

Finally, by using different sample loads the crack growth velocity for different stress intensities are given for the materials.

As the resistance against crack growth in amorphous polymers can be influenced by physical aging, materials of different ages have been examined.

Keywords: Crack propagation, PVC plastics, fracture mechanics

STATENS PROVNINGSANSTALT
RAPPORT 1989:51
ISBN 91-7848-201-1
ISSN 0284-5172
Borås 1989

SWEDISH NATIONAL TESTING INSTITUTE
REPORT 1989:51

Postal address:
P.O Box 857, S-501 15 BORAS Sweden
Telephone Int + 46 33-16 50 00
Telex 36252 Testing S
Telefax Int + 46 33 13 55 02

Innehållsförteckning

Abstract

Sammanfattning

Symbolförteckning

| | | |
|------|--|----|
| 1. | Inledning | 1 |
| 1.1. | Bakgrund | 1 |
| 1.2. | Syfte och mål | 2 |
| 2. | Experiment | 3 |
| 2.1. | Provmaterial | 3 |
| 2.2. | Provstavsgeometri | 3 |
| 2.3. | Tillverkning av provstavar | 3 |
| 2.4. | Utrustning | 5 |
| 2.5. | Utförande | 6 |
| 3. | Teori | 7 |
| 4. | E-modulsbestämning för spricktillväxtberäkning | 12 |
| 5. | Utvärdering av provresultat | 14 |
| 6. | Brottytoras utseende | 19 |
| 7. | Slutsatser och diskussion | 21 |
| | Appendix A | 23 |
| | Appendix B | 26 |
| | Appendix C | 27 |
| | Appendix D | 28 |
| | Appendix E | 29 |
| | Referenslista | 32 |
| | Övriga referenser | 33 |

Sammanfattning

Styv PVC har ersatt andra material i trycksatta rör. Detta har inte varit helt problemfritt eftersom rören ibland uppvisar spröda brott som sker långt före den beräknade livslängdens slut.

En provmetod för att bestämma spricktillväxten har undersökts. Nedböjning som funktion av tid mäts upp på en anvisad krökt rörsektion. Ur nedböjningen kan man via kompliansen beräkna motsvarande spricklängd. Till sist har spricktillväxthastigheten vid olika spänningsintensiteter kunnat tas fram genom att provstavarna har belastats med ett antal laster.

Då den fysikaliska åldringen hos ett amorft polymermaterial eventuellt kan påverka materialets motstånd mot spricktillväxt, har samma material med olika åldringsgrad undersökts.

Symbolförteckning

- a – spricklängd
A – tvärsnittsarea
b – provstavsbredd
C – komplians
E – elasticitetsmodul
g – gravitationskonstant
G – energifrigörelsehastighet
I – tröghetsmoment
J – böjstyrhetens tvärsnittsfaktor
K – spänningssintensitetsfaktor
L – upplagslängd
m – massa
M – moment
P – kraft
r – krökningsradie
 R_0 – rörets ytterradie
t – tid
T – temperatur
U – elastisk energi
w – provstavstjocklek
Y – geometrifaktor
 σ – spänning
 δ – nedböjning

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Sedan 1950-talet har styv PVC använts i trycksatta rör^[1], t ex vattenledningsrör. De har fungerat tillfredsställande och ersatt andra materialtyper främst vid små och medelstora diametrar ($D < 200\text{mm}$). Problemet med tryckrör i styv PVC är att det speciellt i tjockväggiga rör av grövre dimensioner förekommer haverier, som uppträder långt innan den beräknade livslängdens slut och att de uppvisar spröda brott^[2].

Provningar som är gjorda enligt standard och som omfattar både längs- och korttids trycksättning, visar alla på att brotten som uppkommer är duktial^[3]. Vid användning av resultaten extrapoleras de till lämplig tid, exempelvis 50 år^[4], och justeras med en säkerhetsfaktor^[5] (ofta 2–2.5) som grundas på tidigare erfarenhet samt tar hänsyn till faktorer i installation och produktegenskaper. Det som förvirrar är att laboratorieförsök uppvisar sega brott till skillnad mot verkligheten där brott sker sprött och vid lägre spänningsnivåer än vad som är maximalt tillåtet.

Vid undersökning^[6] av ett hundratal haverier under åren 1979–1986 som uppvisat sprött brott, kom man fram till två kännetecken:

*Sprött brott initierades från en defekt i röret.

*Spänningskoncentrationen vid defekten ökade pga punktlast. Enbart det invändiga trycket har sällan varit orsak till brottet^[3].

Defekter i materialet kan huvudsakligen hänföras till tillverkningen även om en del av dem kan uppkomma vid hantering^[6]. De ger upphov till spänningskoncentrationer och kan därmed orsaka brott. Punktlaster ger ett tillskott till rörets ringspänning i form av böjspänningar. Dessa är ofta lokala och höga och man tror att de är den främsta orsaken till sprickinitiering. Därefter är det de lägre tryckspänningarna (inre trycket) som ger sprickpropagering när sprickan har blivit tillräckligt stor.

Fysikalisk åldring kan också inverka på materialets egenskaper. Fysikalisk åldring^[7] är en process som ger polymeren en tätare struktur och därmed också högre densitet. Detta beror på att molekylkedjorna lägger sig tillräcka med tiden. I en amorf polymer (tex PVC) ligger kedjorna oordnade. När temperaturen överstiger glastransitionstemperaturen T_g är de fritt rörliga. Man har tekniskt sett en smälta. Rörligheten avtar med sjunkande temperatur för att helt avstanna när T_g har passerats. Detta stabila tillstånd förutsätter dock att polymeren helt är i

jämvikt. Vid extrudering av PVC-rör kyls rören i slutsteget. Temperatursänkningen förbi T_g sker då så snabbt att materialet är långt ifrån jämvikt. Pga detta finns det alltid en viss rörlighet eftersom längsta möjliga energi eftersträvas, dvs materialet vill nå sitt jämviktsläge. Aldringsprocessen sker mycket långsamt vid rumstemperatur och ökar när man närmar sig T_g. När materialets densitet ökar pga åldringen, ökar eventuellt också risken för sprödbrott eftersom man får ett styvare material (E-modulen ökar).

1.2. Syfte och mål

Vi vill med detta arbete undersöka dels hur olika spänningsnivåer i PVC-rör påverkar spricktillväxthastigheten och dels hur materialets ålder inverkar på densamma.

Målet är att komma fram till en enkel och lätt reproducerbar provningsmetod med vilken ett materials spricktillväxthastighet kan bestämmas för olika spänningsintensiteter.

2. Experiment

Då det är mycket svårt att på optisk väg studera sprickpropagering i en pigmenterad och därmed opak polymer, tex PVC, måste man finna en annan metod för att mäta spricktillväxten. En enkel metod är att med hjälp av 3-punkts böjprov mäta nedböjning som funktion av tid vid konstant belastning. Via brottmekaniska teorier kan man bestämma spricklängden vid olika tider då man känner nedböjningen (se avsnitt 3).

2.1. Provmaterial

PVC-rören ur vilka provstavar uttagits är tillverkade av Poloplast i Österrike.

Materialdata: ytterdiameter 280mm
godstjocklek 13.4–15.0mm
tryckklass PN10 (max tillåtet arbetstryck 1MPa
vid högst 20°C)

2.2. Provstavsgeometri

Provstavarna har tillverkats enligt ASTM STP 736^[8] med modifiering av vinkeln Θ (se fig.1).

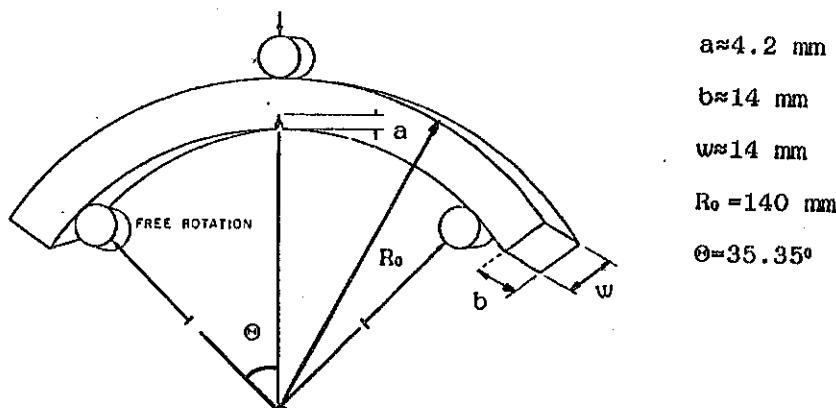


Fig.1 Provstavsgeometri för 3-punkts böjprov.

2.3. Tillverkning av provstavar

Provstavar sågades ur en rörsektion. Därefter frästes med en skivfräs en första anvisning på stavens insida (fig.2). Denna lades på samma axiella linje utmed röret på samtliga stavar. Detta gjordes för att minimera spridningen i resultaten då materialegenskaperna kan variera i ringled.

Anvisningens krökningsradie r , uppmättes i mikroskop till $94\mu\text{m}$ (fig.3). Då detta är en för stor radie för att få reproducerbara resultatl^[3,4] skärptes anvisningen ytterligare med ett rakblad. Rakbladet trycktes med hjälp av en servohydraulisk maskin, MTS 810, ned i botten på den frästa skåran (fig.4). Nytt blad användes till varje prov. Därmed fick man en mycket skarp spricka (fig.5). Förhållandet mellan anvisning och provstavens tjocklek $a/w \approx 0.3$ hos samtliga provstavar.

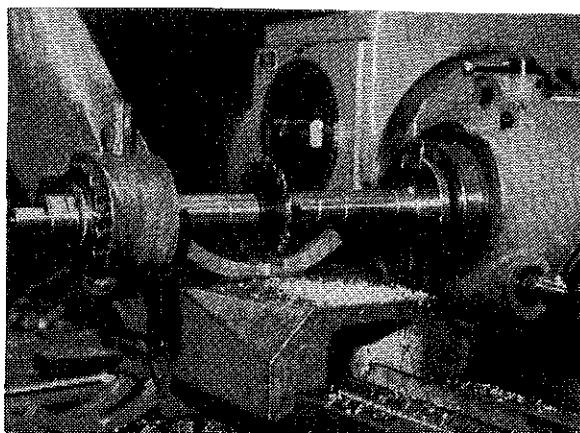


Fig.2 Fräsning av anvisning.

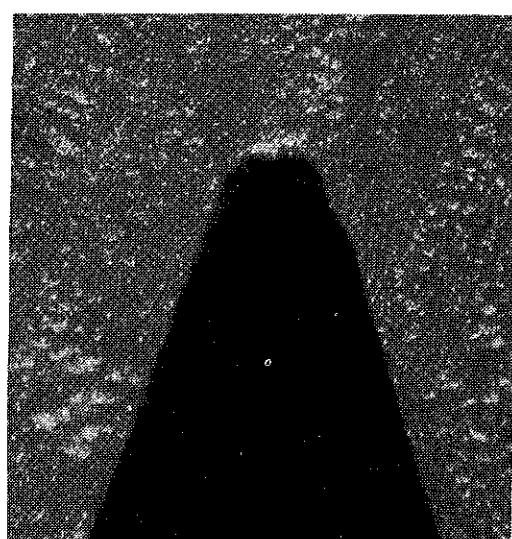


Fig.3 Mikroskobild (80x) av fräst anvisning.

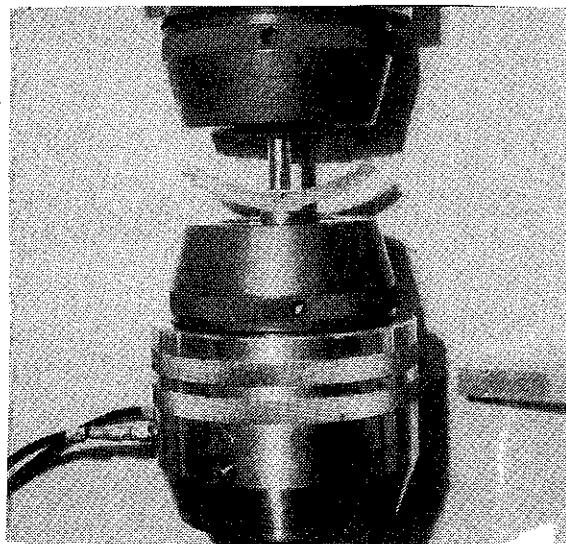


Fig.4 Skärpning av den frästa anvisningen.

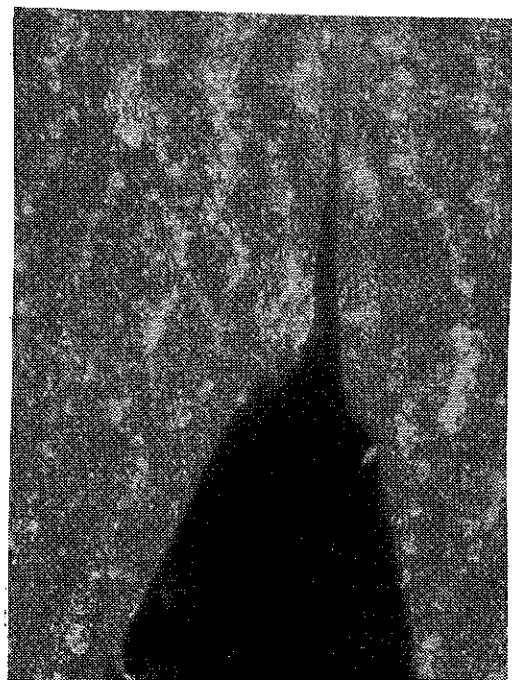


Fig.5 Mikroskobild (80x) av rakbladsanvisning.

2.4.Utrustning

Vid försökens utförande har två typer av provutrustning använts. En universalprovningsmaskin, Instron 1195, samt provriggar tillverkade vid Statens Provningsanstalt, Göteborg för detta ändamål.

Registrering av nedböjningen har i universalprovningsmaskinen skett elektroniskt via en skrivare och i provriggarna manuellt med hjälp av mätklockor (fig.6-8).

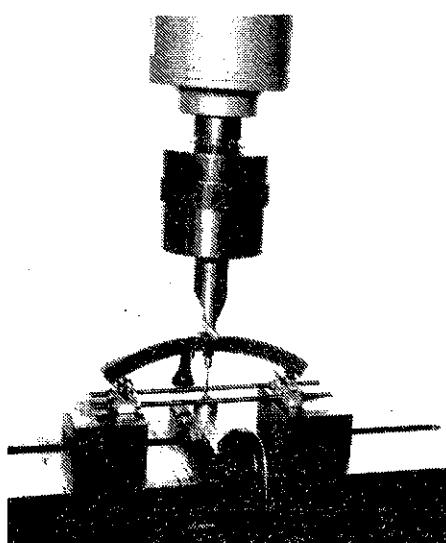


Fig.6 Uppriggning av provstav för 3-punkts böjprov i univer-salprovningsmaskin.

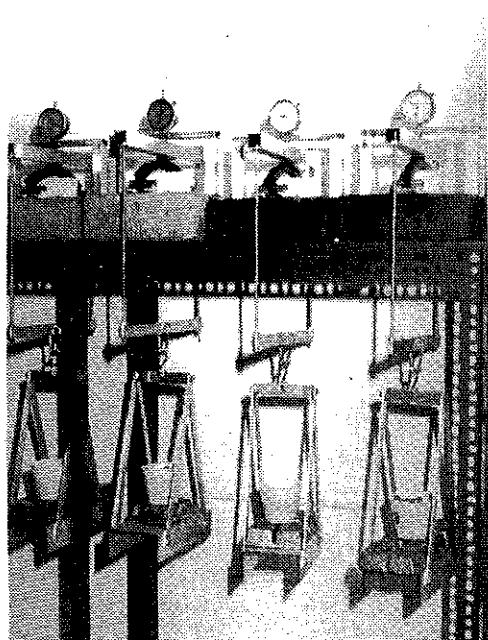


Fig.7 Provriggar för 3-punkts böjprov.

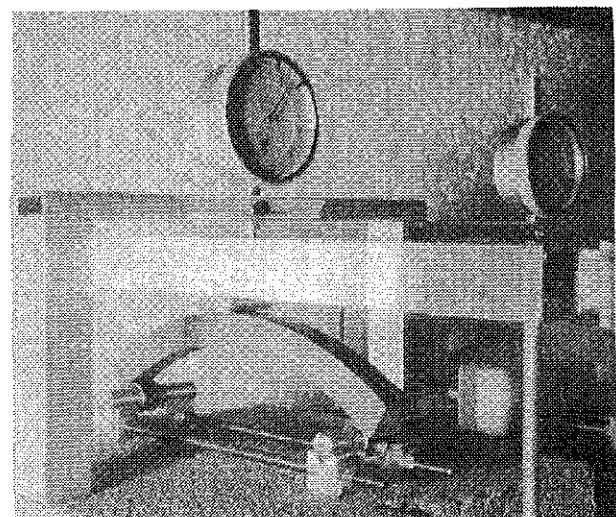


Fig.8 Detaljbild av provrigg.

2.5.Utförande

För att bestämma vilka belastningsnivåer som skulle användas, gjordes en preliminär bestämning av materialets kritiska spänningssintensitetsfaktor K_t ^[9]. Resultatet gav att $K_t = 3.76 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1/2}$ vilket motsvarar en kritisk last på ca 167N. Fjorton olika lastnivåer valdes utifrån detta i intervallet 39–177N.

Eftersom den fysikaliska åldringen påverkar materialets egenskaper och därmed också spricktillväxten, utfördes provningen på material av tre olika åldringsgrad. För att få provstavar ur samma rörsektion fast med olika ålder delades proven in i tre olika grupper som preparerades på olika sätt.

Material A: Ingen behandling, naturåldrat, 248 dagar vid provstart.

Material B: Värmebehandlat i 90°C i 20min, därefter snabbkylt i vattenbad. Då den fysikaliska åldringen är termoreversibel, har materialet då det upphettats över Tg (ca 80°C för PVC) återgått till ett tillstånd motsvarande nyproducerat material^[10].

Material C: Värmebehandlat i 66°C i 168 timmar, därefter snabbkylt i vattenbad. Denna behandling påskyndar den fysikaliska åldringen pga att molekylkedjerörigheten ökar när man närmar sig Tg. Man erhåller ett material som är äldre än material A.

Provstavarna applicerades i provriggarna och belastades med de förbestämda lasterna. Nedböjningen δ uppmättes som funktion av tiden. Proven avslutades innan sprickan propagerat till brott för att ett slutvärde på spricklängden (vid känd nedböjning) skulle erhållas. Spricklängden har uppmäts i ljusmikroskop sedan provstaven slagits av efter nedkyllning i flytande kväve.

För att med hjälp av kompliansen kunna beräkna spricklängden måste man känna den tidsberoende E-modulen (krypmodulen). Därför har också krypkurvor tagits upp med hjälp av 3-punkts böjprov på de tre olika materialen. Provstavarna dimensionerades så att b=14mm, w=5mm och L=80mm. Två olika spänningssnivåer användes; ca 12 och 30MPa för att undersöka om krypmodulen var spänningsberoende.

3. Teori

Vid belastning av provstavar i 3-punkts böjprov erhålls nedböjningen δ vid olika tidpunkter t . Från denna kända nedböjning vill man bestämma hur mycket detta motsvarar i spricklängd. Följande teori förklrar sambandet mellan nedböjning δ och spricklängd a vid olika tidpunkter t .

Enligt linjär brottmekanik är energifrigörelsehastigheten G vid föreskriven last [11, 12]

$$G = \frac{P^2}{2bw} \cdot \frac{dC}{d(a/w)} \quad (1)$$

Sambandet mellan G -faktorn och spänningsintensitetsfaktorn K är vid plan spänning [11, 12]

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (2)$$

där K -faktorn definieras [11, 13]

$$K = \sigma_0 \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Y \quad (3)$$

Y är en dimensionslös faktor som tar hänsyn till provstavens geometri.

Viss försiktighet bör iakttas vid användandet av K -funktioner, då dessa i viss litteratur definieras som $K = \sigma_0 \cdot \sqrt{a} \cdot \Phi$. Detta ger alltså att $Y = \Phi/\sqrt{\pi}$, där också Φ är en geometrifaktor.

Spänningsintensitetsfaktorn K för en C-formad provstav kan skrivas som summan av K -faktorerna för rak balk utsatt för böjning samt rak balk utsatt för enaxlig dragning [13, 14, 15]

$$K = \sigma_{0,1} + Y_1 \cdot \sqrt{\pi a} + \sigma_{0,2} + Y_2 \cdot \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

där böjtermen [13]

$$\sigma_{0,1} = \frac{6M}{bw^2} = 1.5 \cdot P \cdot \tan\theta \cdot \frac{2R_0 - w}{bw^2} \quad (5)$$

och dragtermen^[13]

$$C_{0,2} = \frac{P \cdot \tan\theta}{2bw} \quad (6)$$

insättes (5) och (6) i ekvation (4) fås

$$K = \sqrt{na} \cdot \left[\frac{1.5 \cdot P \cdot \tan\theta \cdot (2R_0 - w) \cdot Y_1}{bw^2} + \frac{P \cdot \tan\theta \cdot Y_2}{2bw} \right] \quad (7)$$

Geometrifaktorerna Y_1 och Y_2 ovan kan för rak provstav med kantspricka skrivas^[16] (observera definitionen där $Y=\Phi/\sqrt{\pi}$)

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left[1.93 - 3.07\left(\frac{a}{w}\right) + 14.53\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 25.11\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 25.80\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (8)$$

$$Y_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \cdot \left[1.99 - 0.41\left(\frac{a}{w}\right) + 18.70\left(\frac{a}{w}\right)^2 - 38.48\left(\frac{a}{w}\right)^3 + 53.85\left(\frac{a}{w}\right)^4 \right] \quad (9)$$

Felet man gör ovan när man räknar som om provstaven var en rak balk kan anses försumbart ty $\text{okrökt balk} = 1.037 \cdot \text{räk balk}$ (se Appendix A).

Ekvation (1) och (2) ger

$$K^2 = \frac{P^2 E}{2bw} \cdot \frac{dC}{d(a/w)} \quad (10)$$

Integreras ekvation (10) fås

$$C = \frac{2bw}{P^2 E} \cdot \int K^2 \left(\frac{a}{w}\right) \cdot d\left(\frac{a}{w}\right) + C_0 \quad (11)$$

där C_0 är kompliansen då spricklängden $a=0$.

Mellan kraften P och nedböjningen δ gäller sambandet^[11]

$$\delta = C \cdot P \quad (12)$$

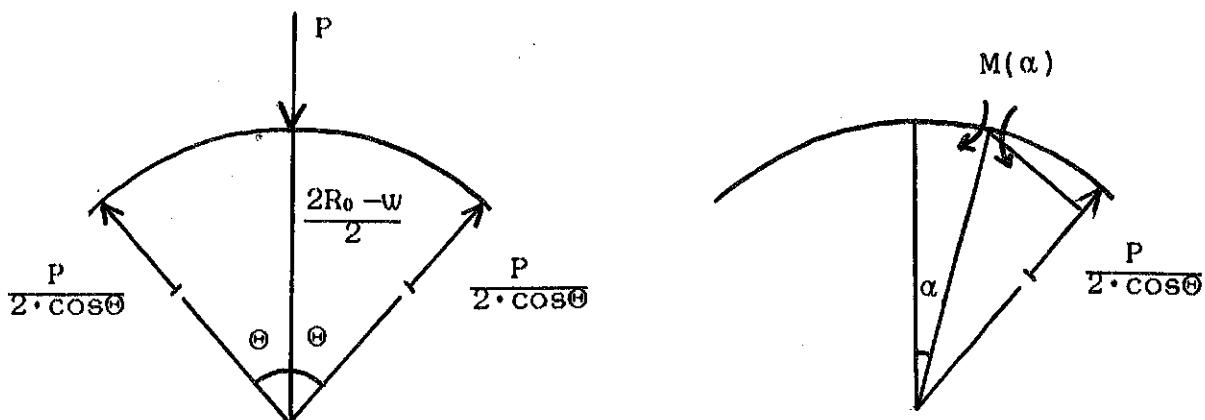
Nedböjningen δ_0 för en enkelkrökt balk fås med hjälp av Castigianos sats^[13, 17]

$$\delta_0 = \frac{\partial U}{\partial P} \quad (13)$$

där elastiska energin i balken

$$U = 2 \cdot \int_0^{\Theta} \frac{M^2(\alpha)}{2E_e J} \cdot \frac{2R_0 - w}{2} d\alpha \quad (14)$$

Normal- och tvärkraftens bidrag till elastiska energin kan anses försumbart små.



$$M(\alpha) = -\frac{P}{2\cos\theta} \cdot \frac{2R_0 - w}{2} \cdot \sin(\theta - \alpha) \quad (15)$$

(13), (14) och (15) ger (se Appendix B)

$$\delta_0 = \frac{P(2R_0 - w)^3}{32E_c J} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \quad (16)$$

insättes (16) i ekvation (12) fås

$$C_0 = \frac{(2R_0 - w)^3}{32E_c J} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \quad (17)$$

där J är böjstyrhetens tvärsnittsfaktor för en enkelkrökt balk^[13]

$$J = I + [1 + \frac{3}{5}(\frac{w}{2R_0 - w})^2 + \frac{3}{7}(\frac{w}{2R_0 - w})^4 + \dots]$$

$J \approx I$ då $w=14\text{mm}$ och $R_0=140\text{mm}$.

Tröghetsmomentet för rektangulärt tvärsnitt^[13]

$$I = \frac{bw^3}{12} \quad (18)$$

insättes (18) i ekvation (17) fås

$$C_0 = \frac{3(2R_0 - w)^3}{8E_c bw^3} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \quad (19)$$

Kvadreras (7) fås (se Appendix C)

$$K^2 = \frac{P^2 \cdot \tan^2\Theta \cdot \pi a}{b^2 w^2} \cdot [A^2 Y_1^2 + AY_1 Y_2 + \frac{Y_2^2}{4}] \quad (20)$$

A , Y_1^2 , $Y_1 Y_2$ samt Y_2^2 fås från (C3)–(C6) i Appendix C.

Ekvation (12), (19) och (20) i (11) ger

$$\left(\frac{\delta}{P} - \frac{3(2R_0-w)^3}{8E_c bw^3} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \right) \cdot \frac{Eb}{2\tan^2\Theta \cdot \pi} = \\ = \int_0^x \left(A^2 Y_1^2 + AY_1 Y_2 + \frac{Y_2^2}{4} \right) x \, dx \quad (21)$$

där $x = a/w$.

Löses integral (21) fås

$$\left[A^2 \cdot \sum k_i \cdot x^i + A \cdot \sum l_i \cdot x^i + \frac{1}{4} \cdot \sum m_i \cdot x^i \right] = \\ = \left[\frac{\delta}{P} - \frac{3(2R_0-w)^3}{8E_c bw^3} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \right] \cdot \frac{Eb}{2\tan^2\Theta} \quad (22)$$

där $i = 2, 3, \dots, 10$. Konstanterna k_2-k_{10} , l_2-l_{10} samt m_2-m_{10} fås från Appendix D.

Löses ekvation (22) med hjälp av Newton-Raphson (se Appendix E) fås ett värde på x och därmed också den sökta spricklängden a .

4. E-modulsbestämning för spricktillväxtberäkning

En svårighet vid utvärdering av provresultat för polymera material är att de till skillnad från metaller har en tidsberoende E-modul.

I ekv (22), ur vilken spricklängden beräknas, ingår E-modulen, dels i form av E_c i termen C_0 som uttrycker kompliansen för en oanvisad provstav, dels som E i komplianstillskottet orsakat av sprickan (1:a termen i ekv (11)).

E_c är polymerens krypmodul och färs ur krypkurvor upptagna för materialet. Fig. 9 visar krypkurvor för de tre olika materialen A-C. Varje kurva är en medelvärdeskurva för modulen bestämd vid de två spänningsnivåerna 12 och 30 MPa. E-modulens spänningsberoende visade sig vara obetydlig vid dessa nivåer varför medelvärdet användes.

Att kurvorna ligger på olika nivåer beror på materialens skillnad i ålder. Den fysikaliska åldringen medför tydligent att E-modulen ökar, ett antagande som gjordes i avsnitt 1.1. Detta framgår också av fig. 10, som visar dragkompliansen (inversa E-modulen i drag), som funktion av kryptiden för styv PVC med olika åldringsgrad. Denna figur återfinns i referens 10 som behandlar fysikalisk åldring i polymerer och andra material.

Krypmoduler för PVC

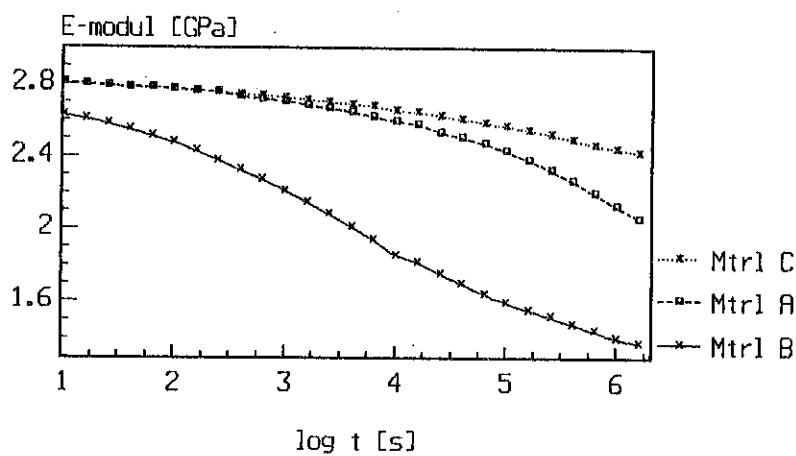


Fig.9

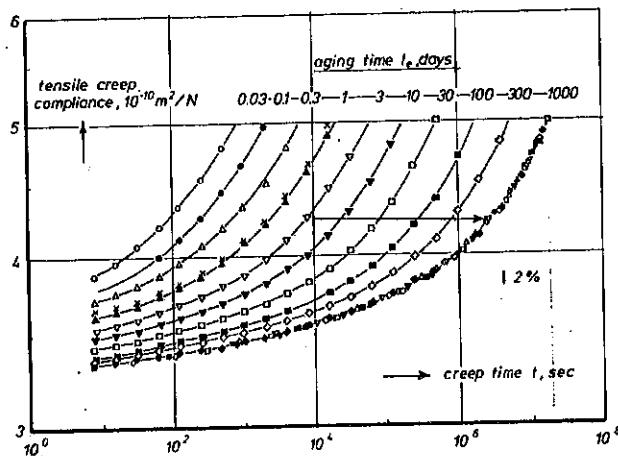


Fig.10 Krypkomplians (drag)
för stiv PVC.

Värdet på E dåremot är svårare att bestämma. Om sprickpropageringen sker långsamt är det troligen relevant att använda sig av långtidsdata (krypdata). Sker den dåremot mycket snabbt ökar spänningsnivån i närheten av sprickspetsen. Korttidsdata ger då möjligen ett sannare värde på E-modulen i sprickspetsens närmaste omgivning. Då kort- och långtidsmodulerna avsevärt kan skilja sig åt för samma material och korttidsmodulen delvis beror av den hastighet med vilken förlloppet sker är det mycket svårt att exakt bestämma värdet på E.

5. Utvärdering av provresultat

Vid bearbetningen av provresultaten sattes $E=E_c$ pga svårigheten att bestämma E . Approximationen visade sig senare vara rimlig.

Nedböjningen δ som uppmättes vid olika tidpunkter t , samt E_c tagen ur fig. 9 för respektive tid, insatta i ekv (22) ger ett värde på spricklängden a .

Den initierade, före provningen åstadkomna, spricklängden och på vissa prov slutspricklängden kunde uppmätas. Vid jämförelse mellan de uppmätta och de beräknade värdena varierade felet mellan 0 och 20 procent.

Detta fel ansågs vara för stort varför andra värden på E_c provades. Det visade sig att små förändringar av E_c gav ett stort utslag på spricklängden a .

För att försöka hitta rätt startvärde på E_c kunde man genom att initierat spricklängden var känd, med hjälp av ekv (22) "baklänges" räkna fram en passande E -modul E_c . På samtliga prov befanns startvärdet på E_c ligga inom ett snävt intervall under motsvarande värde på den uppmätta krypmodulkurvan (fig. 9). Avvikelsen från den uppmätta kurvan kan vara en följd av ett eventuellt spänningsberoende, statistiska variationer eller bådadera. Något direkt spänningsberoende kunde inte påvisas då E -modulen generellt inte sjönk med ökande last.

Med framräknat startvärde på E_c antogs den tidsberoende E -modulen följa den uppmätta krypkurvans form i fig. 9. Detta innebar en parallellförflyttning av krypkurvan vid varje last.

När dessa modifierade modulkurvor istället användes i ekv (22) för framräkning av spricklängden blev felet mindre än 10 procent. Detta får anses som fullt godtagbart.

Figur 11, 12 och 13 visar spricklängden som funktion av tiden för material A, B och C. Korrelerande nedböjning som funktion av tid illustreras i figur 14, 15 och 16.

Ur diagrammet i figur 11 kan man få den uppfattningen att spricklängden minskar i början. Detta är naturligtvis orimligt. Förklaringen till felet kan vara att värdet på E -modulen inte har bestämts tillräckligt noggrant. Små variationer på E -modulen gav ju stort utslag på spricklängden.

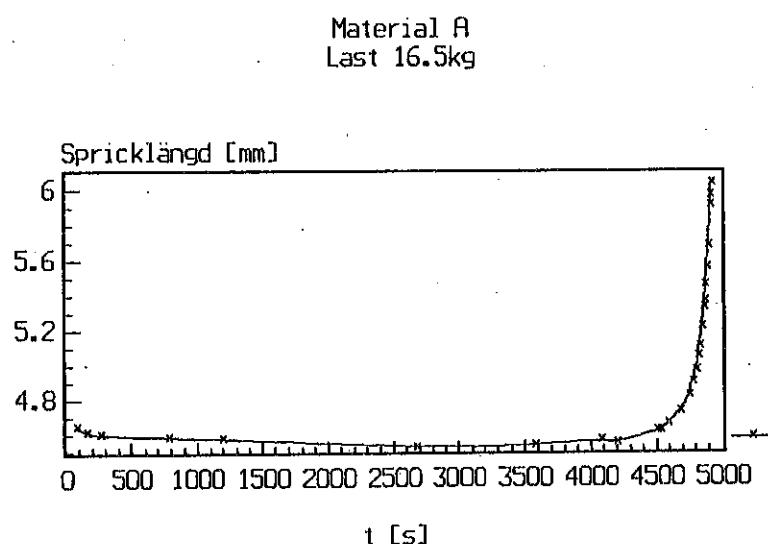


Fig.11

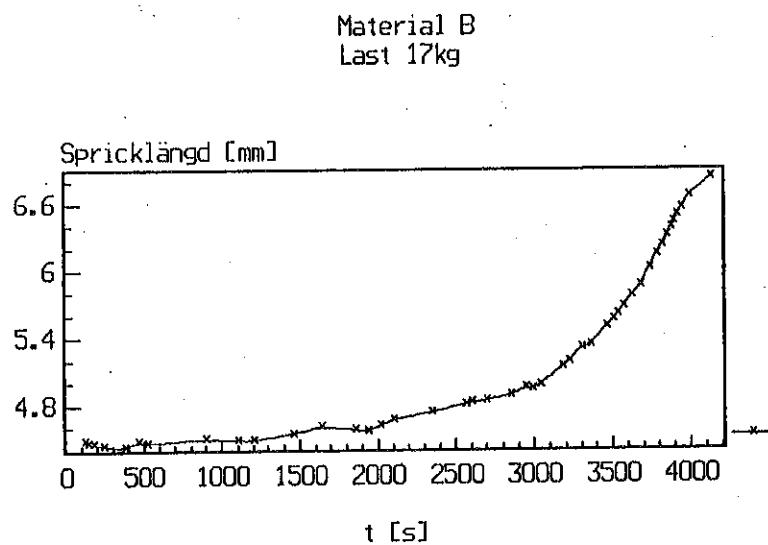


Fig.12

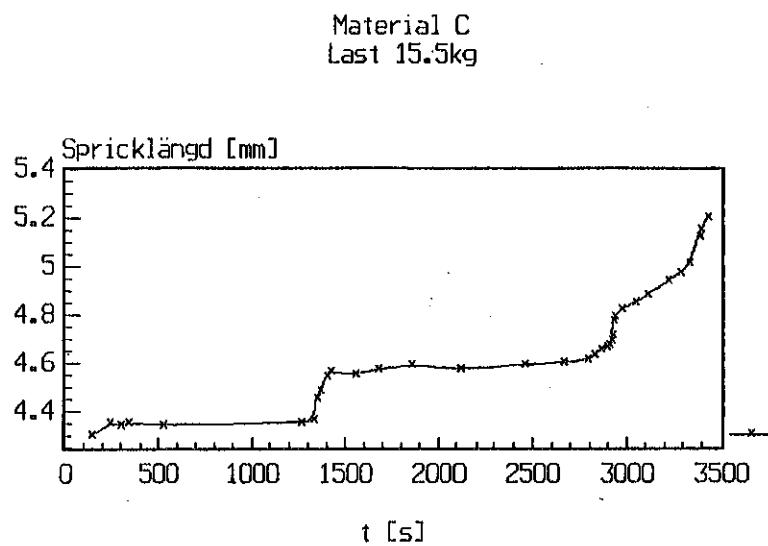


Fig.13

Material A
Last 16.5kg

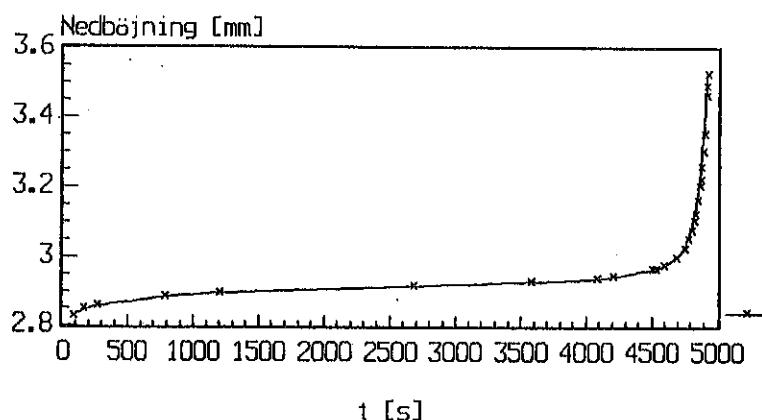


Fig.14

Material B
Last 17kg

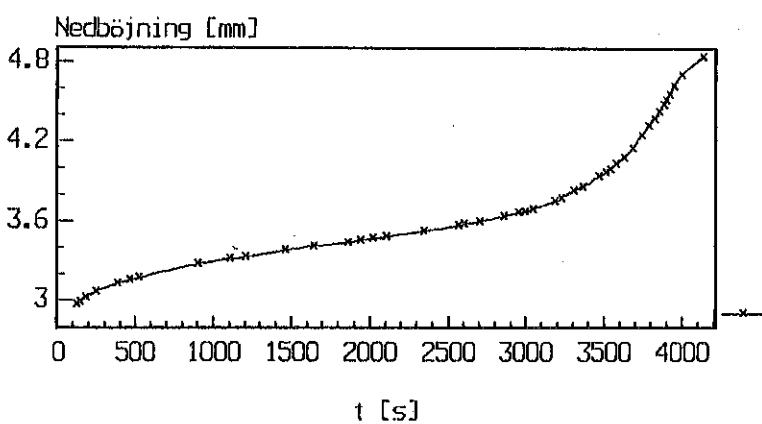


Fig.15

Material C
Last 15.5kg

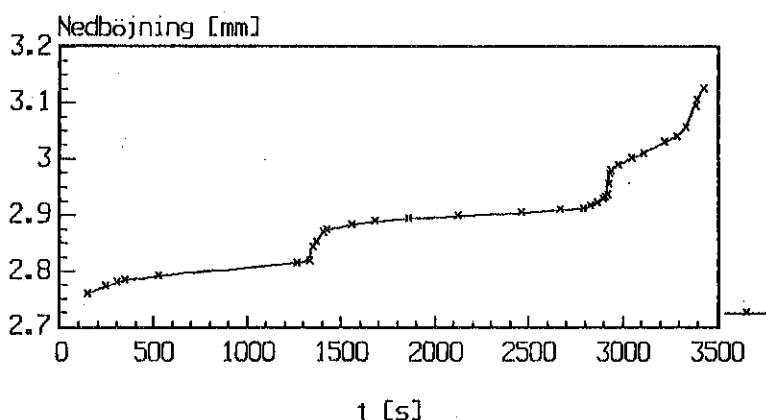


Fig.16

Sprickhastigheten å har sedan bestämts ur spricklängd-tid-diagrammen. Inom varje prov varierade sprickhastigheten med tiden. Hastigheten var konstant inom ett intervall av spricklängden. Varje intervallets max- och minvärde på å avlästes och användes för beräkning av spänningssintensitetsfaktorn K_Q med hjälp av ekv (7). För de prov som uppvisade en diskontinuerlig sprickpropagering, exvis material C fig. 13, redovisas medelhastigheten över stegen.

Slutligen har diagram med K_Q som funktion av å kunnat konstrueras. Figur 17-19 visar dessa för de olika materialen. Där framgår med olika markeringar övre och undre gränser för K_Q . Även medelhastigheten har i förekommande fall markerats.

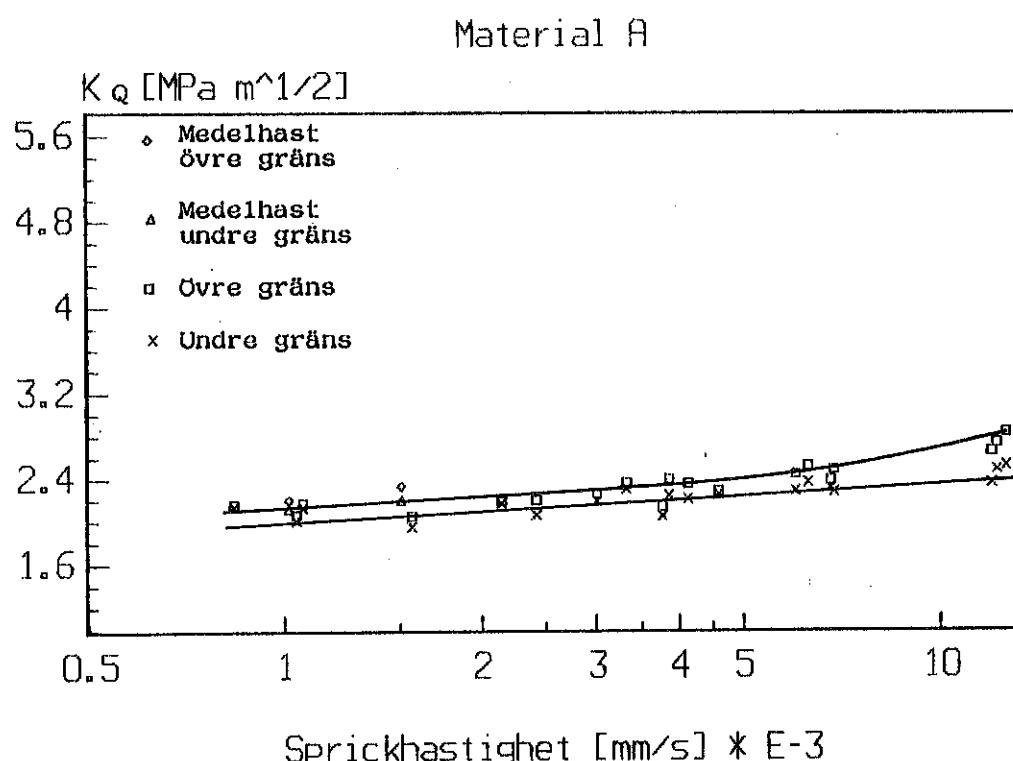


Fig.17 (provningsunderlaget utgörs av sex prov i intervallet 152-176 N)

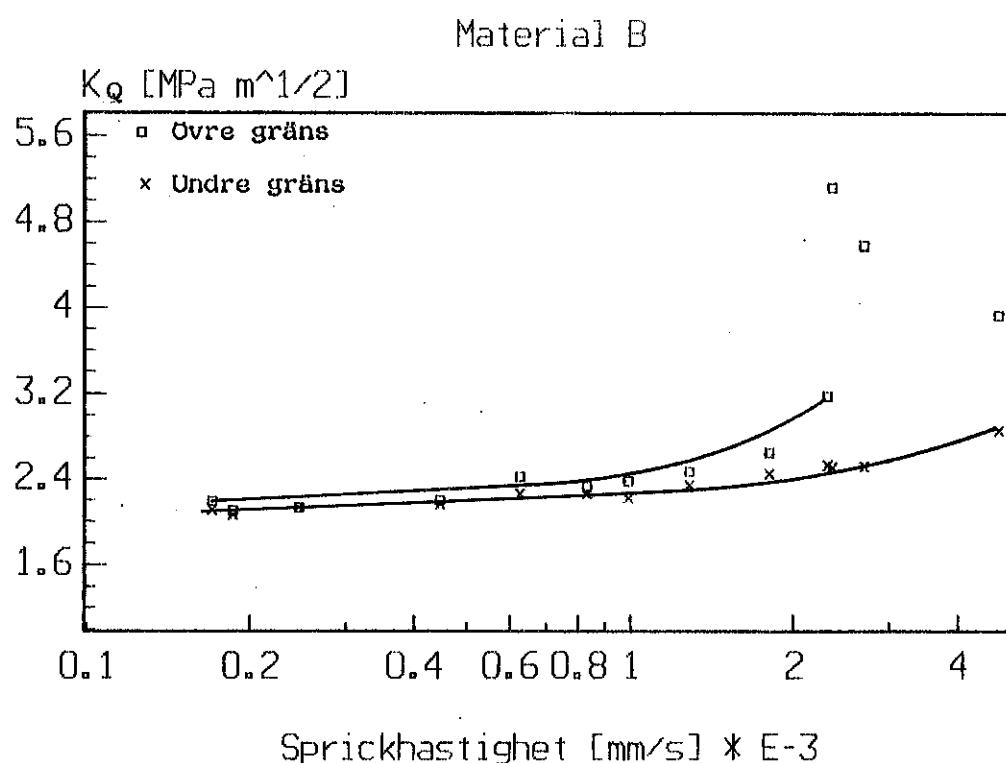


Fig.18 (provningsunderlaget utgörs av fem prov i intervallet 137-177 N)

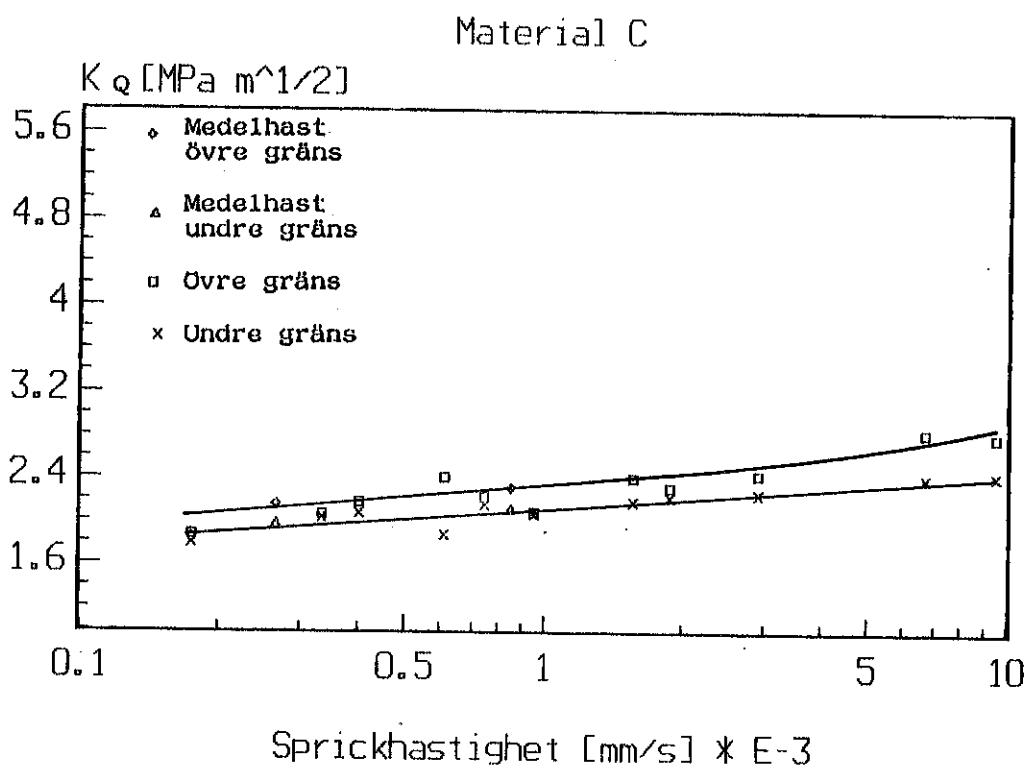


Fig.19 (provningsunderlaget utgörs av fem prov i intervallet 137-162 N)

6. Brottytornas utseende

Vad som var överraskande vid undersökningen av brottytorna var att vissa av proverna, främst material C och material A vid höga laster, uppvisade tydliga striationer (randmönster) (fig.20).

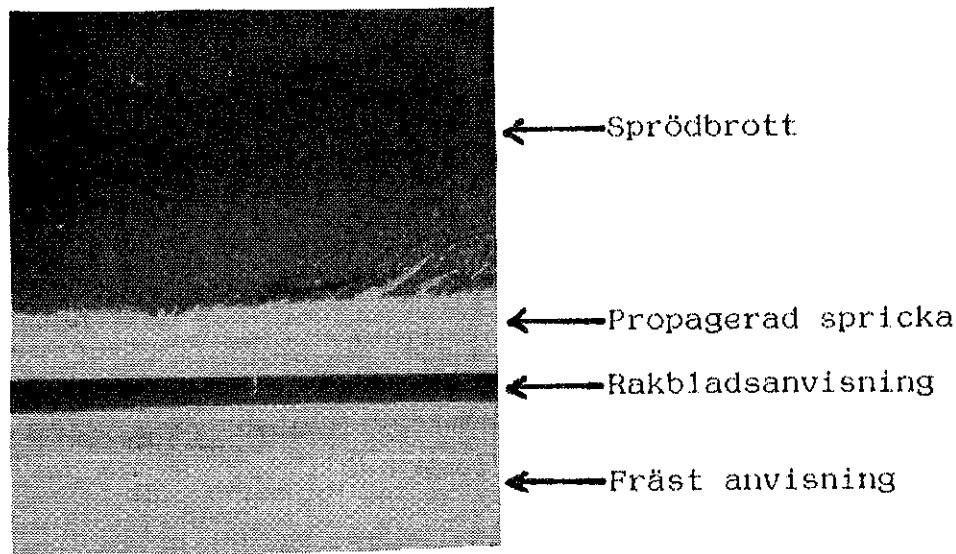


Fig.20 Fotografi av brottyta
(8X).

Vid jämförelse av brottytan och spricklängd-tid-kurvan (fig.21) fann vi att antalet striationer överensstämde med antalet "trappsteg" i diagrammet.

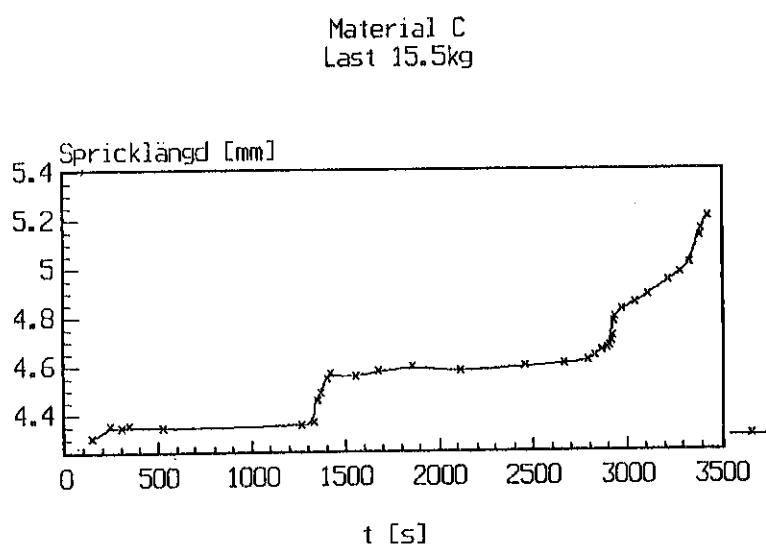


Fig.21

Eftersom provet såg ut att ha varit utsatt för utmattning trots att belastningen varit statisk, söktes en orsak till fenomenet.

En förklaring^[4] kan vara att det uppkommer crazes (mikrosprickor) i sprickspetsens omedelbara närhet. När sprickan under tillväxten når fram till denna zon accelererar den och passerar snabbt genom det redan defekta materialet. Sprickan avstannar sedan tillfälligt då området med crazes passerats. Spricktillväxten sker alltså diskontinuerligt.

7. Slutsatser och diskussion

Metoden att använda 3-punkts böjprov på krökta provstavar för att bestämma ett materials spricktillväxthastighet verkar vara en relativt tillförlitlig metod. Jämförelse har gjorts med tidigare försök som utförts enligt samma princip fast med raka provstavar^[6]. Detta visar god överensstämmelse av resultaten m a p sprickhastighetens beroende av spänningsintensiteten.

Någon nedre gräns för spänningsintensitetsfaktorn K_0 där spricktillväxthastigheten är försumbar har ej kunnat fastställas. För detta krävs mycket låga laster och därmed långa provningstider vilket det inte funnits utrymme för inom tidsramen för detta arbete.

Den fysikaliska åldringens inverkan på sprickbenägenheten kan tydligt ses vid jämförelse av material A och B. Material B som är "färskt" uppvisar lägre sprickhastighet och högre K_0 -värden än material A. Detta medför att material B är mindre känsligt för spröda brott, vilket var väntat.

Någon skillnad mellan material A och C är däremot svår att påvisa. Förklaringen till detta är troligen att materialet har ungefär samma E-modul vid dessa relativt sett korta provtider ($\log t < 5$), se figur 9. Utföres provningar under längre tider (lägre laster) skulle troligen material C uppvisa ett sprödare beteende, dvs högre spricktillväxthastighet jämfört med material A vid samma spänningsintensitet.

Äldern på material C kan ej heller bestämmas då tendensen för de uppmätta komplianskurvorna är svår att förutsäga (fig. 22) pga för korta provtider. Långa provtider ger komplianskurvor liknande de i fig. 10. Med hjälp av dessa kan man uppskatta ett materials ålder^[10]. Vad man klart kan säga är dock att material C är äldre än material A.

Krypkomplianser för PVC

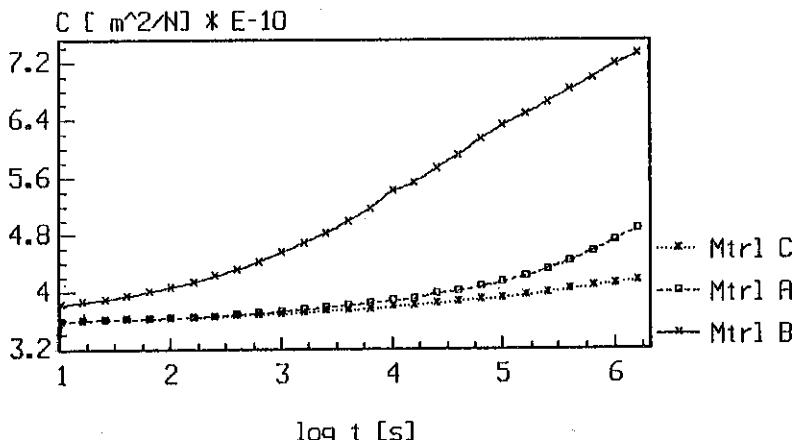


Fig.22

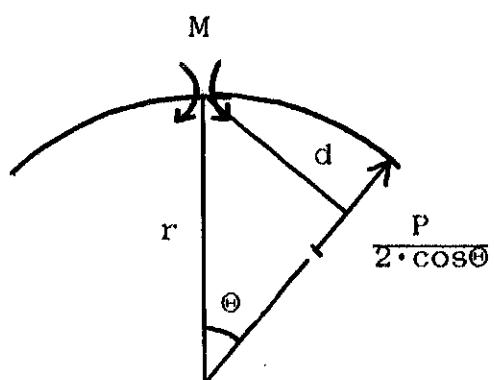
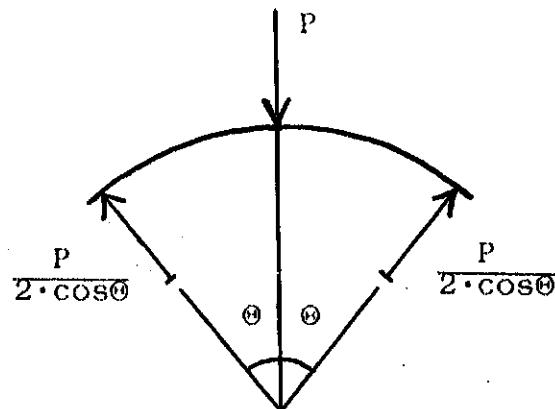
Provmetoden kan förfinas ytterligare för mer exakt beräkning av spricklängder. För detta krävs en större kännedom om materialets tidsberoende E-modul samt ett eventuellt hänsynstagande till den exakta korttidsmodulen i zonen runt sprickspetsen.

Appendix A

Enkelkrökta balkars böjning [13]

Normalspänningen

$$\sigma = \frac{\eta}{1+\eta/r} \cdot \frac{M}{J} + \frac{N+M/r}{A} \quad (A1)$$



$$r = (2R_0 - w) / 2 \quad d = r \cdot \sin\theta$$

$$M = - \frac{P}{2 \cdot \cos\theta} \cdot r \cdot \sin\theta = - \frac{P}{2} \cdot r \cdot \tan\theta \quad (A2)$$

$$N = \frac{P}{2} \cdot \tan\theta \quad (A3)$$

$$J \approx I = \frac{b \cdot w^3}{12} \quad (A4)$$

$$A = b \cdot w \quad (A5)$$

$$\eta = - \frac{w}{2} \quad (A6)$$

(A2) och (A3) ger

$$N + \frac{M}{r} = \frac{P}{2} \cdot \tan\theta - \frac{P \cdot r}{2} \cdot \tan\theta + \frac{1}{r} = 0 \quad (A7)$$

(A2), (A4)-(A7) i (A1) ger

$$\sigma = \frac{1.5 \cdot P \cdot \tan\theta \cdot (2R_0 - w)^2}{2 \cdot (R_0 - w) \cdot bw^2} \quad (A8)$$

Jämförtes detta med normalspänningen i rak balk där r går mot ∞ övergår ekvation (A1) i

$$\sigma = \eta \cdot \frac{M}{J} + \frac{N}{A} \quad (A9)$$

(A2)-(A6) i (A9) ger

$$\sigma = \frac{P \cdot \tan \Theta}{bw} \cdot \left[1.5 \cdot \frac{(2R_0 - w)}{w} + 0.5 \right] \quad (\text{A10})$$

Då $R_0 = 140\text{mm}$ och $w = 14\text{mm}$ fås från ekvation (A8) och (A10)

$$\text{Okrökt bälk} = 30.08 \cdot \frac{P \cdot \tan \Theta}{bw}$$

$$\text{Orak bälk} = 29 \cdot \frac{P \cdot \tan \Theta}{bw}$$

Appendix BBestämning av nedböjningen δ_0

$$\begin{aligned}
 U &= 2 \int_0^{\Theta} \frac{P^2 (2R_0 - w)^3 \cdot \sin^2(\Theta - \alpha)}{64EJ \cdot \cos^2\Theta} d\alpha = \\
 &= \frac{P^2 (2R_0 - w)^3}{32EJ \cdot \cos^2\Theta} \int_0^{\Theta} [\sin^2\Theta \cos^2\alpha - 2 \cdot \sin\Theta \cos\alpha \sin\alpha \cos\Theta + \sin^2\alpha \cos^2\Theta] d\alpha = \\
 &= \frac{P^2 (2R_0 - w)^3}{32EJ \cdot \cos^2\Theta} \left[\sin^2\Theta \left(\frac{\Theta}{2} + \frac{\sin 2\Theta}{4} \right) - 2 \sin\Theta \cos\Theta \frac{\sin^2\Theta}{2} + \cos^2\Theta \left(\frac{\Theta}{2} - \frac{\sin 2\Theta}{4} \right) \right] = \\
 &= \frac{P^2 (2R_0 - w)^3}{64EJ} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \quad (B1)
 \end{aligned}$$

$$\delta_0 = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{P (2R_0 - w)^3}{32EJ} \cdot \frac{\Theta - \sin\Theta \cos\Theta}{\cos^2\Theta} \quad (B2)$$

Kontroll $\Theta \ll 1$

$$\begin{aligned}
 \delta_0 &\approx \frac{P (2R_0 - w)^3}{32EJ} \cdot \left[\frac{\Theta - (\Theta - \Theta^3/6 + \dots) \cdot (1 - \Theta^2/2 + \dots)}{(1 - \Theta^2/2 + \dots)^2} \right] = \\
 &= \frac{P (2R_0 - w)^3}{32EJ} \cdot \frac{2\Theta^3}{3} = \frac{P [(2R_0 - w) \cdot \Theta]^3}{48EJ} = \frac{PL^3}{48EJ} \quad \text{SSB.}
 \end{aligned}$$

Appendix C

$$K = \sqrt{\pi a} \cdot \left[1.5 \cdot P \cdot \tan\theta \cdot \frac{(2R_0 - w)}{bw^2} \cdot Y_1 + \frac{P \cdot \tan\theta}{2bw} \cdot Y_2 \right] \quad (C1)$$

Kvadreras (C1) fås

$$K^2 = \left(\frac{P \cdot \tan\theta}{bw} \right)^2 \cdot \pi a \cdot \left[A^2 \cdot Y_1^2 + A \cdot Y_1 \cdot Y_2 + \frac{Y_2^2}{4} \right] \quad (C2)$$

där

$$A = \frac{1.5 \cdot (2R_0 - w)}{w} \quad (C3)$$

Y_1^2 , $Y_1 \cdot Y_2$ samt Y_2^2 fås ur ekvation (8) och (9) med $a/w=x$.

$$Y_1^2 = [3.72 - 11.9x + 65.5x^2 - 186x^3 + 465x^4 - 888x^5 + 1380x^6 - 1300x^7 + \\ + 666x^8] / \pi \quad (C4)$$

$$Y_1 \cdot Y_2 = [3.84 - 6.90x + 66.3x^2 - 188x^3 + 555x^4 - 1200x^5 + 2230x^6 - 2300x^7 + \\ + 1390x^8] / \pi \quad (C5)$$

$$Y_2^2 = [3.96 - 1.63x + 74.6x^2 - 168x^3 + 596x^4 - 1480x^5 + 3490x^6 - 4100x^7 + \\ + 2900x^8] / \pi \quad (C6)$$

Appendix D

Konstanterna i ekvation (22)

| | | |
|-----------------|----------------|----------------|
| $k_2 = 1.86$ | $l_2 = 1.92$ | $m_2 = 1.98$ |
| $k_3 = -3.97$ | $l_3 = -2.30$ | $m_3 = -0.54$ |
| $k_4 = 16.4$ | $l_4 = 16.6$ | $m_4 = 18.6$ |
| $k_5 = -37.2$ | $l_5 = -37.6$ | $m_5 = -33.6$ |
| $k_6 = 77.5$ | $l_6 = 92.5$ | $m_6 = 99.3$ |
| $k_7 = -127$ | $l_7 = -171$ | $m_7 = -211$ |
| $k_8 = 172$ | $l_8 = 279$ | $m_8 = 436$ |
| $k_9 = -144$ | $l_9 = -256$ | $m_9 = -456$ |
| $k_{10} = 66.6$ | $l_{10} = 139$ | $m_{10} = 290$ |

Appendix E

```

DECLARE SUB NEWT2 (n#(), Rot#)
'program INTEGRAL.bas
'Beräknar integraluttryck för kompliansutvärdering
  DEFDBL A-Z
  DIM k(10), l(10), m(10), n(10)
  CLS
  PRINT "Integralberäkning"
  PRINT "Beräkningarna utföres med längdmått i mm och"
  PRINT "krafter i N."
  PRINT "Spänningar (och motsv.) redovisas således i"
  PRINT "MPa=N/mm2"
  PRINT
100   INPUT "Ange provbeteckningar. Max tre tecken!:", Prov$
        INPUT "Viktens massa i kg:", m
        INPUT "Rörets ytterradie i mm:", Ro
        INPUT "Rörets godstjocklek i mm:", w
        INPUT "Provets bredd i mm:", b
        P=m*9.81
        Ø=3.1416*35.35/180
        J=b*w3/12
        ***Beräkning av A och B***
        A=1.5*(2*Ro-w)/w
        B=0.5
        FAKTO=P*TAN(Ø)/(b*w)
        '- KOEFFICIENTER
        k(2)=1.86
        k(3)=-3.97
        k(4)=16.4
        k(5)=-37.2
        k(6)=77.5
        k(7)=-127
        k(8)=172
        k(9)=-144
        k(10)=66.6
        l(2)=1.92
        l(3)=-2.30
        l(4)=16.6
        l(5)=-37.6
        l(6)=92.5
        l(7)=-171
        l(8)=279
        l(9)=-256
        l(10)=139
        m(2)=1.98
        m(3)=-0.54
        m(4)=18.6
        m(5)=-33.6
        m(6)=99.3
        m(7)=-211
        m(8)=436
        m(9)=-456
        m(10)=290
110   INPUT "Ange a/w-värde:", X
        FOR i=0 TO 10
          n(i)=0
        NEXT i
        p1=0: p2=0: p3=0

```

```

FOR i=2 TO 10
p1=p1+k(i)·Xi
p2=p2+l(i)·Xi
p3=p3+m(i)·Xi
n(i)=A2·k(i)+2·A·B·l(i)+B2·m(i)
NEXT i
INTEGRAL=A2·p1+2·A·B·p2+B2·p3
FAKT1=(θ-SIN(θ)·COS(θ))/(COS2(θ))
INPUT "Beräkning för nytt a/w? (Ja=1, Nej=0):", in
IF in=1 THEN 110
'BERÄKNING AV a/w FÖR GIVEN NEDBÖJNING
150 INPUT "Ange totalnedböjningen i mm:", Dtot
INPUT "Ange E-modulen för denna nedböjning:", E
FAKT2=2·(TAN(θ))2/(E·b)
n(0)=-(Dtot/P-3·(2·R0-w)3/(8·E·b·w2)·FAKT1)/FAKT2
CALL NEWT2(n(), Rot)
A=w·Rot
PRINT "Spricklängden a blir:", a, "mm, då totalned-"
PRINT "böjningen är:", Dtot, "mm och E-modulen är:", E,
PRINT "MPa:",
PRINT
PRINT "Upprepa beräkning för annan nedböjning, nytt"
INPUT "prov eller avsluta. Skriv 1, 2 eller 3.", z
SELECT CASE z
CASE 1
    GOTO 150
CASE 2
    GOTO 100
CASE 3
    GOTO 300
END SELECT
300 END

```

```

DEFDBL A-Z
SUB NEWT2 (n(), Rot)
PRINT "Ekvationslösning en1 Newton-Raphson"
PRINT
'Beräkna derivatans koefficienter
FOR i=0 TO 9
p(i)=n(i+1)·(i+1)
NEXT i
'Sätt utgångsvärde på X
X=0.5
200 Q=0
210 S=1
F1=0
F0=0
'Räkna antalet iterationer
Q=Q+1
FOR i=0 TO 10
    'Beräkna funktionsvärdet
    F0=F0+n(i)·S
    'Beräkna derivatan
    F1=F1+p(i)·S
    S=S·X
NEXT i
'Är derivatan=0 ?
IF F1=0 THEN PRINT "Derivatan=0 för X=", X: GOTO 550

```

```
'-Korrigera X-värdet
S=X-F0/F1
'-Om nya värdet=gamla värdet, avbryt
IF X=S THEN Rot=S: GOTO 380
'-Spara sista värdet
X=S
IF Q > 100 THEN 490 ELSE 210
380 PRINT
PRINT "Rot", , "Fel", , "Derivata"
PRINT Rot, F0, F1
PRINT
GOTO 550
'-Skriv värdena efter 100 iterationer
490 PRINT "100 iterationer genomförda:"
Rot=X
PRINT "X=", X, "F(X)=", F0
PRINT "Fler iterationer? (1=Ja, 0=Nej)", ,
INPUT a
IF a=1 THEN 200
550 END SUB
```

Referenslista

1. R.W.Truss, Pure & Appl. Chem, Vol. 57, No. 7, 1985.
2. G.P.Marshall, M.W.Birch, Plastics and Rubber Processing and Appl., Vol. 2, No. 4, 1982.
3. G.P.Marshall, Plastics and Rubber Int., Vol. 7, No. 4, 1982.
4. D.Walton, F.T.Murphy, Int. conf. PVC Processing II, 1983.
5. Int. conf. Plastic Pipes VII, University of Bath, England, Sept. 1988.
6. M.W.Birch, M.D.Taylor, G.P.Marshall, Plastics and Rubber Processing and Appl., Vol. 3, No. 3, 1983.
7. C.Klasson, J.Kubat, M.Rigdahl, PGI-Rapport nr 43, 1983.
8. ASTM STP 736.
9. J.G.Williams, Testing Protocol, Dep. of Mechanical Engineering, England, Nov. 1988.
10. L.C.E.Struik, Physical aging in amorphous polymers and other materials, Elsevier Scientific publishing company, Amsterdam, 1978.
11. Janne Carlsson, Brottmechanik, Hållfasthetslära, KTH, 1985.
12. W.Brostow, R.D.Corneliussen, Failure of Plastics, Hanser Publishers, München, 1986.
13. Formelsamling i hållfasthetslära, KTH, 8:e upp1., 1978.
14. R.W.Truss, Materials Forum, Vol. 9, Nos. 1 & 2, 1986.
15. R.W.Truss, Plastics ans Rubber Processing and Appl., Vol. 7, 1987.
16. W.F.Brown, J.E.Strawley, ASTM STP 410, 1969.
17. Jan Hult, Bära Brista. Almqvist & Wiksell Förlag, Stockholm, 1975.

Ovriga Referenser

18. A.T.Jones, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 6, 1974.
19. R.J.Young, P.W.R.Beaumont, Polymer, Vol. 17, 1976.
20. J.G.Williams, Adv. Polymer Science, 1978.
21. J.F.Mandell, A.Y.Darwish, F.J.McGarry, Polymer Eng. and Science, Vol. 22, No. 13, 1982.
22. G.P.Marshall, Plastics and Rubber Processing and Appl., Vol. 2, No.2, 1982.
23. D.R.Moore, R.C.Stephenson, M.Whale, Plastics and Rubber Processing and Appl., Vol. 3, No. 1, 1983.
24. F.S.Uralii, R.L.Markham, Proceedings, Eighth Plastic Fuel Gas Pipe Symposium, New Orleans, Lousiana, 1983.
25. G.D.Dean, L.N.McCartney, Polymer Testing, Vol. 4, 1984.