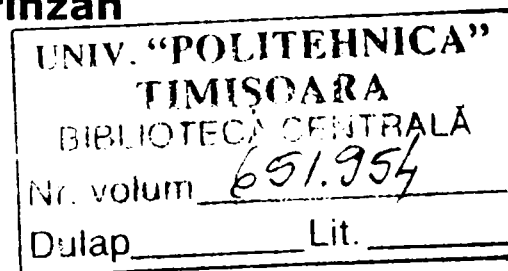


STUDIUL PRELUNGIRII DURABILITĂȚII CONDUCTELOR DE TRANSPORT PRODUSE PETROLIERE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul INGINERIE MECANICĂ
de către

Ing. Ovidiu Brînzan



Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing. Iosif Hajdu
prof.univ.dr.ing. Ion Dumitru
prof.univ.dr.ing. Ion Păstrav
prof.univ.dr.ing. Nicolae Iliescu

Ziua susținerii tezei: 15.12.2006

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Această lucrare a fost concepută din dorința de a aprofunda studiul comportării mecano-chimice și prelungirii durabilității conductelor de transport al produselor petroliere confecționate din diferite oțeluri folosite în industria de profil din țara noastră importantă economic și cu un deosebit impact social.

Teza în sine reprezintă o sinteză a activității de cercetare științifică desfășurată individual sau în grup începând din anul 1997 sub conducerea strălucită a domnului prof. dr. ing. Iosif Hajdu, reputat specialist și om de o deosebită probitate morală și profesională cărui și cu această ocazie îi exprim întreaga mea recunoștință și gratitudine.

Confruntarea fizică în producție în acțiunile de identificare și optimizare a sistemelor tehnologice ale conductelor de transport produse petroliere și mai cu seamă urmărirea influențării costurilor au condus la rezultatele reliefate în prezenta lucrare.

O bibliografie bogată și la zi permite aprofundarea conținutului și abordarea unor probleme actuale de complexitate și rigurozitate sporită.

Un gând de recunoștință îl adresez pe această cale membrilor comisiei de doctorat constituită din Prof. Univ. Dr. Ing. Ioan Păstrav, de la Universitatea Tehnică Cluj Napoca, Prof. Univ. Dr. Ing. Nicolae Iliescu de la Universitatea Politehnică București, Prof. Univ. Dr. Ing. Ion Dumitru de la Universitatea Politehnică Timișoara, Prof. Univ. Dr. Ing. Nicolae Neaguț de la Universitatea Politehnică Timișoara care au avut răbdarea de a analiza această lucrare și care prin observațiile critice avute m-au îndrumat în elaborarea finală a tezei.

De asemenea cu recunoștința menționez cu această ocazie sprijinul primit din partea domnului Prof. Univ. Dr. Ing. Mircea Rațiu, din SUA, care prin sfaturile indirecte dar mai ales prin materialele bibliografice trimise, a reușit mă orienteze spre cele mai noi direcții de cercetare ale domeniului abordat.

De asemenea mulțumesc tuturor aceluia care într-un fel sau altul, prin observații și sugestii m-au ajutat să duc la bun sfârșit această teză care nădăjduiesc să aducă un plus de clarviziune în implementarea soluțiilor tehnice pentru prelungirea durabilității respectivelor conducte.

Timișoara 1. oct. 2006

Autorul

Brînzan, Ovidiu

Studiul prelungirii durabilității conductelor de transport produse petroliere.

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr.4, Editura Politehnica 2006, 206 pagini, 59 figuri, 10 tabele.

ISSN: 1842-4937

ISBN (10) 973-625-396-1; ISBN (13) 978-973-625-396-6

Cuvinte cheie:

Durabilitate, conducte petroliere, coroziune, mecanica ruperii, siguranța în exploatare.

Rezumat:

Se prezintă stadiul actual în prelungirea durabilității conductelor de transport produse petroliere printr-un studiu bibliografic amplu și de actualitate, după care se prezintă importanța Mecanicii Ruperii în prelungirea durabilității conductelor. În capitolele de contribuții originale se disting studiile efectuate în vederea evidențierii coroziunii asupra fenomenului de propagare a fisurilor la conductele de transport petrolier. Se elaborează o procedură de apreciere a duratei remanente de viață a sistemelor de conducte pentru transport petrolier. Se insistă asupra dimensiunilor critice a defectelor,

CUPRINS

Cap.1.	Introducere	9
1.1	Modalități de transport	9
1.2	Principalele cerințe impuse conductelor de gaze și produse petroliere	10
1.3	Rețele de conducte pentru gaze	10
1.4	Rețele de conducte pentru produse petroliere	11
1.5	Importanța temei tezei de doctorat	12
Cap.2	Caracteristici ale conductelor de transport produse petroliere	14
2.1	Elemente constructive și de calitate ale materialului tubular	14
2.1.1	Cerințe generale	14
2.1.2	Forme constructive și condiții tehnice	14
2.1.3	Caracteristici mecanice. Grade de rezistență	19
2.1.3.1	Încercarea la tracțiune	19
2.1.3.2	Încercarea la încovoiere prin șoc pe epruvete cu crestătura în V	22
2.1.3.3	Încercarea la rupere prin șoc a materialului conductei (Drop-Weight Tear Test-DWTT)	23
2.1.3.4	Încercarea la oboseală	26
2.1.4	Factorii metalurgici și tehnologici care trebuie să asigure caracteristicile impuse țevilor pentru conducte	26
2.1.4.1	Compoziția chimică și tratamentele chimice	27
2.1.4.2	Condiții de elaborare	30
2.1.4.3	Controlul formei și cantității incluziunilor nemetalice	30
2.2	Cerințe de bază ale proiectării conductelor utilizate pentru transportul produselor petroliere	30
2.2.1	Generalități	30
2.2.2	Solicitările principale ale conductelor cu pereți subțiri	31
2.2.3	Determinarea grosimii peretelui conductei	33
2.2.4	Calculul de verificare	34
2.2.5	Încercarea la presiune interioară a conductelor	37
Cap.3	Noțiuni de mecanica ruperii	39
3.1	Tenacitatea la rupere a materialelor	39
3.2	Aprecierea comportării mecanice a oțelurilor	40
3.2.1	Aprecierea comportării mecanice a oțelurilor prin încercări bazate pe absența fisurilor	40
3.2.2	Aprecierea tenacității oțelurilor prin încercări în prezența fisurilor	41
3.3	Starea de tensiune și deformație în vecinătatea frontului fisurii în domeniul elastic	41
3.4	Caracteristici de apreciere a tenacității și tenacității la rupere	45
3.4.1	Factorul de intensitate al tensiunii K și tenacitatea la rupere K _c	46

3.4.2	Determinarea tenacitatii la rupere pe epruvete tip Chevron	52
3.4.3	Deplasarea și deschiderea la vârful fisurii	53
3.4.4	Integrala de contur	54
3.4.5	Forța critică de extensie a fisurii	56
3.4.6	Corelații între caracteristicile de apreciere a tenacității la rupere ale materialelor	57
3.4.7	Factorii care influențează tenacitatea la rupere	58
3.4.8	Eterminarea tenacității la rupere a unor oțeluri utilizate la confecționarea conductelor de abur	58
3.5	Aplicarea Mecanicii Ruperii la conducte	61
3.5.1	Considerații generale	61
3.5.2	Încărcări și tensiuni	63
3.5.3	Tipuri de fisuri	64
3.6	Conductă cu fisură longitudinală de suprafață supusă la presiune interioară	65
3.6.1	Soluțiile în domeniul elastic ale caracteristicilor de tenacitate	65
3.6.2	Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	66
3.6.3	Soluțiile în domeniul elasto-plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	67
3.7	Conductă cu fisură interioară circumferențiară de suprafață solicitată la întindere	68
3.7.1	Soluțiile în domeniul elastic de solicitare, ale caracteristicilor de tenacitate	68
3.7.2	Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	69
3.7.3	Soluțiile în domeniul elasto-plastic ale caracteristicilor de tenacitate	69
3.8	Conductă cu fisură circumferențiară străpunsă, solicitată la întindere	70
3.8.1	Soluțiile în domeniul elastic, ale caracteristicilor de tenacitate	70
3.8.2	Soluțiile în domeniul plastic ale caracteristicilor de tenacitate	71
3.8.3	Soluțiile în domeniul elasto-plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	71
3.9	Conductă cu fisură circumferențială străpunsă solicitată la încovoiere	72
3.9.1	Soluțiile în domeniul elastic, ale caracteristicilor de tenacitate	72
3.9.2	Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	72
3.9.3	Soluțiile în domeniul elasto-plastic, ale caracteristicilor de tenacitate	73
3.10	Conductă supusă la presiune interioară, având o fisură longitudinală străpunsă	73
3.11	Conductă supusă la presiune interioară, având o fisură longitudinală la suprafața interioară de formă semieliptică	75

3.12	Uniformizarea metodologiei de determinare a tenacității la rupere	77
3.13	Influența vitezei de încărcare și a orientării suprafețelor de rupere raportate la direcțiile de laminare asupra tenacității de rupere a oțelului pentru vasele sub presiune	77
3.13.1	Considerații generale	77
3.13.2	Alegerea epruvetelor pentru testele de mecanică a ruperii	78
3.13.3	Instalarea de probă a barelor restate de tip Chevron cu viteză de încărcare constantă a diferitelor valori	79
3.13.4	Încercarea epruvetelor Chevron cu viteze de încărcare	82
3.13.5	Determinarea forței de rupere și a tenacității la rupere pentru epruvetele Chevron destinate probelor la temperatura mediului ambient	83
3.13.6	Modificarea rezultatelor primare ale epruvetelor Chevron încercate	84
Cap.4	Coroziunea materialului tubular și protecția împotriva efectelor acesteia	94
4.1	Forme specifice de coroziune a materialului tubular	94
4.2	Coroziunea garniturii de foraj și a burlanelor pentru tubaj	95
4.3	Coroziunea țevilor de extracție	96
4.4	Fisurarea corozivă sub tensiune	97
4.5	Acțiunea hidrogenului asupra oțelurilor expuse mediilor acide cu hydrogen	100
4.6	Coroziunea datorită CO ₂	104
4.7	Coroziunea conductelor de colectare și transport	104
4.8	Protecția împotriva coroziunii	105
4.8.1	Protecția prin tratarea mediului adiacent metalului pentru a-i micșora agresivitatea	105
4.8.2	Protecția prin micșorarea intensității de desfășurare a proceselor catodice și/sau anodice	106
4.8.3	Protecția împotriva coroziunii prin metode electrochimice	107
4.8.4	Protecția împotriva coroziunii prin acoperirea suprafețelor de protejat	107
4.8.5	Combaterea coroziunii conductelor metalice subterane	109
4.9.	Considerații privind efectul coroziunii asupra rezistenței de rupere la încovoiere al unui oțel pentru conducte de transport produse petroliere	110
4.9.1	Considerații generale	110
4.9.2	Metode de protecție anticorosivă a metalelor [2] [8]	111
4.9.3	Fisurarea corozivă sub tensiune a metalelor	112
4.9.4	Dispozitivul realizat pentru studiul experimental al ruperii metalice prin F.C.T	113
4.9.5	Încercări efectuate	118
4.9.6	Rezultatele obținute și concluzii	119
Cap.5	Măsuri care urmăresc prelungirea durabilității sistemelor de conducte petroliere și gaze	121
5.1	Procedura de apreciere a duratei remanente de viață a sistemelor de conducte [65]	121
5.1.1	Introducere	122
5.1.2	Achiziția datelor	123
5.1.2.1	Proiectarea sistemului de conducte și stabilirea datelor de montaj	123

5.1.2.2	Stabilirea istoriei solicitării în serviciu a conductelor	123
5.1.2.3	Caracteristicile de material și stabilirea modului de vătămare	124
5.1.3	Procedura de evaluare a duratei remanente de viață	124
5.1.3.1	Modelarea secțiunii transversale vătămate	126
5.1.3.2	Estimarea pătrunderii extrapolate a vătămării	128
5.1.3.3	Stabilirea criteriilor de acceptare	129
5.1.3.4	Evaluarea acceptabilității	130
5.1.3.5	Prelungirea durabilității conductelor de transport produse petroliere impuse	130
5.1.4	Concluzii	131
5.2	Problema siguranței în exploatare a rețelelor de conducte petroliere	131
5.2.1	Dimensiunea critică a defectelor	131
5.2.2	Condițiile inițierii ruperii	133
5.2.3	Criterii de garantare a siguranței în exploatare	137
5.4	Exemple	141
Cap.6	Sinteza lucrării. Contribuții personale	143
6.1	Sinteza lucrării	143
6.2	Contribuții personale	147

CAP. 1 INTRODUCERE

1.1 Modalități de transport a produselor petroliere [5], [7], [81]

Relativ la modalitățile și mijloacele folosite pentru transportul țițeiului, produselor petroliere, petrochimice și a gazelor lichefiate tehnice, se disting următoarele cinci posibilități:

- transportul auto (transportul rutier) care se realizează pe șosele sau autostrăzi (transport pe uscat) cu autocisterne autotrailere, containere sau autoremorci speciale (recipiente transportabile) etc.; transportul auto se folosește preponderent, și uneori pe distanțe de mii de kilometri, pentru desfacerea (prin centrele de distribuție de tip PECO) a produselor petroliere de larg consum cotidian (benzine, motorine, uleiuri, vaseline, unsori consistente, petrol lampant, petrosin, aragaz, etc.);

- transportul pe cale ferată (transportul feroviar) realizat pe căi ferate normale, înguste sau speciale, de tip tramvai sau tren (transport pe uscat), cu vagoane-cisternă sau recipiente transportabile (pe boghiuri) integrate în trenuri petroliere sau în trenuri de mărfuri mixte, cu containere, bidoane, butelii, butoaie etc. Încărcate pe platformele unor vagoane de marfă închise sau deschise etc. Deși capacitatea sa este relativ limitată, în prezent, transportul feroviar al țițeiului și produselor petroliere, petrochimice și gazelor lichefiate tehnice este încă cel mai folosit pe platformele continentale și mai ales în țările dezvoltate cu climă temperată sau nordice, (cu căderi de zăpadă abundente, geruri mari și cu înghețarea căilor navigabile), etc.

- transportul pe apă (transportul naval), realizat pe căi navigabile, fluviale, maritime sau oceanice cu tancuri (petroliere), șlepuri petroliere, cu recipiente transportabile, containere, butoaie, bidoane, butelii, etc. Încărcate în cargoboturi, ș.a. ; transportul pe apă prezintă dezavantajul că este deseori sezonier însă este de 4-5 ori mai ieftin decât transportul pe C.F. și uneori este chiar mai ieftin decât transportul prin conducte (magistrale);

- transportul aerian (aertransportul) realizat cu avioane de transport speciale, elicoptere sau dirijabile, cu containere sau în ambalaje speciale luate la bordul aparatelor de zbor clasice, etc.

- transportul prin conducte (magistrale) este considerat ca fiind cel mai perfecționat mod de transportare a petrolului, produselor petroliere – petrochimice și gazelor lichefiate tehnice; transportul prin conducte prezintă următoarele avantaje principale: etanșitate perfectă din punct de vedere tehnic și posibilitatea unei pompări (transportări) neîntrerupte.

Transportul prin conducte se poate face la unele fluide cu ajutorul pompelor, compresoarelor, ventilatoarelor, iar la altele folosind o parte din energia pe care aceste fluide o posedă.

1.2 Principalele cerințe impuse conductelor de gaze [81] [97] [102] [113]

Ca și pentru alte instalații industriale și la conducte trebuie să se asigure o fiabilitate corespunzătoare, cel puțin egală cu fiabilitatea instalațiilor în care acestea s integrează. Această cerință se pune cu acuitate mai ales acolo unde defectarea conductelor poate provoca daune mari industriei respective sau chiar mediului înconjurător, cum este cazul conductelor petroliere de transport.

În mediile în care se folosesc, conductele pot avea o structură simplă, în care caz transportă fluide între două puncte situate la anumite distanțe, sau uneori pot fi concepute și realizate ca rețele sau sisteme de conducte care au ramificații multiple, și care sunt racordate la mai multe puncte ale utilajelor deservite.

Atât conductele cât și sistemele de conducte trebuie dimensionate pe baza unor calcule tehnico-economice cu ajutorul cărora să se poată determina soluția optimă, aceasta mai ales pentru acele cazuri care impun folosirea unor materiale scumpe, metale bogat aliate, fie a unor conducte de diametre și lungimi mari, care necesită pentru realizare mari cantități de materiale.

Dimensionarea conductelor se face cu ajutorul calculului hidraulic și mecanic ținând seama de caracteristicile materialului.

Pentru a putea efectua aceste calcule precum și pentru a realiza și exploata în condiții corespunzătoare, conductele sau sistemele de conducte, este necesar să se cunoască cerințele impuse de transportul mediilor respective dintre care se amintesc cele mai importante:

- alegerea materialului, a tipului conductelor, a flanșelor, armăturilor, a modului de îmbinare, a sistemului de etanșare la îmbinări etc., corespunzătoare ca siguranță de funcționare și ca economicitate aferente condițiilor date;
- dimensionarea economică a diametrului conductei prin stabilirea vitezei corespunzătoare de curgere a fluidului și a grosimii peretelui;
- asigurarea compensării dilatărilor termice ale conductelor;
- asigurarea accesului la toate elementele conductelor pentru exploatare și pentru reparații;
- asigurarea încălzirii, aerisirii și golirii conductelor;
- amplasarea corectă a aparatelor și a prizelor de impuls pentru măsurarea parametrilor fluidelor transportate: presiune, temperatură, debit, compoziție chimică, etc.
- realizarea protecției anticorozive a conductelor corespunzătoare agresivității fluidului sau a mediului exterior conductei;
- Subaprecierea importanței rezolvării corespunzătoare oricăreia din aceste și alte cerințe poate avea urmări defavorabile asupra întregii instalații din care fac parte aceste conducte.

1.3 Rețele de conducte pentru gaze

Gazele naturale se transportă din câmpurile de zăcăminte prin conducte lungi de presiune înaltă, creată în majoritatea cazurilor cu ajutorul compresoarelor; în unele cazuri zăcămintul poate dispune de o presiune suficientă pentru transportul gazelor la mari distanțe. Alimentarea cu gaze a consumatorilor din orașe și din industrie se fac cu ajutorul unor rețele de distribuție de joasă presiune racordate la conductele de transport prin stații de reducere.

Gazele de sondă sunt asociate cu zăcămintele de țiței, fiind utilizate în multe cazuri pentru repomparea în straturile respective pentru aducerea țițeiului la suprafață. Debitul de gaze în excedent poate fi folosit în scopuri industriale.

Îmbinarea acestor conducte din oțel se realizează prin sudură cu mașini automate astfel încât să fie asigurată atât rezistența mecanică cât și o etanșeitate corespunzătoare. Conductele magistrale pentru transportul gazelor naturale se opresc în general la periferia orașelor în stațiile de reducere, în incinta urbană amplasându-se numai rețele de distribuție în subsolul părții carosabile a străzilor, dimensionate să suporte forța de apăsare a pământului și sarcinile provenite din traficul rutier.

Presiunea gazelor naturale în conductele de transport poate fi de 20, 35, 60, 80 atmosfere iar în rețelele de distribuție de obicei până la 6 atmosfere. Închiderea conductelor pentru manevrare în exploatații și pentru reparații se realizează cu ajutorul vanelor și ventilelor, având o etanșare corespunzătoare. Vitezele uzuale ale gazelor în conductele de transport sunt de 25 -30 m/s. iar în rețelele de distribuție de 15 - 25 m/s.

1.4 Rețelele de conducte pentru produse petroliere

Acestea servesc la: transportul țițeiului de la locul de extracție la rafinării sau la punctele de încărcare în mijloace de transport (maritime, cale ferată, auto); transportul produselor rafinate la locul de consum.

Cerințele pentru proiectarea și realizarea conductelor pentru produsele petroliere sunt multiple și cuprinse în normativul Ministerului Petrolului și Geologiei.

Principalele cerințe care trebuiesc luate în considerare la proiectarea acestor rețele de conducte sunt: debitele de transportat, felul produsului, temperaturile, presiunile, vâscozitatea, distanțele de transport, necesitatea unor stații intermediare de pompare, efectele dinamice (lovituri de berbec) la închiderea vanelor pe conducte, materialele folosite, efectele de coroziune internă și externă (datorită mediului în care sunt pozate conductele), tipurile de îmbinare a conductelor, siguranța de funcționare, costurile de investiții și de exploatare, pericolul de incendiu și de exploatare etc.

Dimensiunea rețelilor de transport se face ținându-se seama și de aspectele economice și anume costurile de investiții și de exploatare precum și siguranța în funcționare. Cu ajutorul acestor calcule trebuie să se determine diametrul optim al conductei, grosimea peretelui țevii, capacitatea și numărul stațiilor de comprimare, traseul cel mai economic, siguranța în funcționare a rețelei, rezervele pentru cazurile de avarii a unor porțiuni de traseu și creșterea previzibilă a consumului.

În plus pentru conductele menționate trebuie avut în vedere la dimensionare atât presiunea maximă care poate apărea în exploatare a unei rețele lungi, cât și depresiunea accidentală care ar putea duce eventual la turtirea conductei. De asemenea, trebuie luate în considerare și sarcinile datorate șocurilor, vântului, vibrațiilor, rezonanței, dilatărilor și contractării termice, a masei proprii și a fluidului conținut, ca și unele influențe exterioare datorate traficului de vehicule, cale ferată, efectele cutremurelor, etc.

Pentru transportul la distanță al uleiului, motorinei și păcurii trebuie luate măsuri speciale datorită vâscozității mari la temperaturi scăzute. Există normative în care se indică pentru un anumit sort de păcură vâscozitatea și pierderea de presiune în funcție de temperatură pentru o conductă cu diametrul dat la o anumită viteză de curgere. Deoarece păcura are o temperatură de congelare destul de ridicată, pentru a putea fi transportată se încălzește la temperaturi de 110 – 120oC. Pentru a fi

protejate termic conductele de păcură se izolează și se asigură cu o conductă însoțitoare cu abur.

În instalațiile de ulei, conductele trebuie să fie etanșe, deoarece uleiul fiind inflamabil, la o temperatură apropiată de temperatura aburului, de exemplu din conductele din apropierea turbinelor de abur, poate da nașterea unor incendii de proporții cu mari pagube materiale.

1.5 Importanța temei tezei de doctorat [5] [28] [65] [76]

În prezent produsele petroliere (benzina motorina petrolul lampant, diferite sortimente de uleiuri, precum și gazele de sondă sau gazul metan) sunt larg folosite în special de diferite industrii, de transportul auto și cel aerian precum și cel de cale ferată tractate de locomotive diesel sau indirect de cele electrice, consumă cantități mari de produse petroliere. Cu toate că consumul foarte mare de producție de bază (țițeiul) amenință omenirea de epuizarea inevitabilă a rezervelor existente încă nu s-au introdus restricții de limitare a consumului materialului de bază (a țițeiului). Un prim pas al economisirii consumului s-a făcut pe calea consumului cât mai rațional al produselor petroliere, prin folosirea motoarelor cu consumuri specifice cât mai reduse.

Știind că dintre modalitățile de transport al petrolului brut (țițeiul) de la sonde la rafinării, iar de acolo al materialului transformat în produse direct utilizabile la locurile de distribuție pentru consum, transportul prin conducte (magistrale) este considerat ca fiind cel mai perfecționat și economic mod de transportare atât al petrolului brut cât și al produselor petroliere – petrochimice și a gazelor derivate.

Având în vedere cantitățile uriașe de gaze și de produse petroliere care se vehiculează zilnic în țările lumii și cantitățile foarte mari de conducte utilizate, fabricate din oțeluri de calitate tot mai superioare și mai scumpe pentru transportul acestora, atât cercetătorii cât și tehnicienii care deservește direct aceste conducte sunt preocupați intens și în prezent de găsirea unor soluții tot mai economice și eficiente pentru prelungirea duratei de viață a sistemului de transport al produselor petroliere.

Dacă durata de viață a unei rețele de conducte este prevăzută de exemplu pentru 10 ani atunci pentru fiecare an de funcționare în plus la parametrii prescriși reprezintă un câștig însemnat atât pentru proprietarul rețelei de conducte cât și pentru economia țării respective.

În prezenta teză de doctorat autorul a urmărit în primul rând să evidențieze caracteristicile de rezistență al materialului destinat fabricării conductelor, care sunt factorii de vătămate al capacității de transport al conductelor și care sunt mijloacele și metodele de combatere ale acestor factori de degradare sau cel puțin pentru întârzierea cât mai lung timp al manifestărilor acestor efecte.

În această problemă sprijinul cel mai eficient îl pot avea cei care răspund de funcționarea corectă a unei rețele de conducte petroliere sau gaze dacă se conduc de aplicarea cât mai conștiincioasă a soluțiilor celor mai noi din Mecanica Ruperii. Ca urmare, în capitolul 3 al tezei sunt prezentate noțiunile de bază ale acestor discipline relativ noi, aplicate la conducte.

Mecanica Ruperii urmărește să fundamenteze teoretic și să confirme experimental metodele de evaluare cantitativă a disponibilității de capacitate portantă mecanică și deci a intensificării nivelului de solicitare, aceasta în condițiile considerării atât a discontinuităților ca atare, cât și adaosului specific de comportare

sub sarcină a materialelor tehnice utilizate în dependență de caracteristicile dimensionale proprii și de cele a regimurilor de exploatare.

Formulându-și obiectivul principal în stabilirea unor corelații între tensiunile mecanice pe de o parte și factorii constructivi geometrici pe de altă parte, Mecanica Ruperii înlocuiește unele caracteristici mecanice ale proiectării tradiționale (rezistența la rupere, duritatea, etc.) prin concepte și mărimi fizice noi, care definesc univoc caracteristici noi.

Una dintre caracteristicile pe baza căreia se apreciază comportarea mecanică a oțelurilor este tenacitatea.

Una dintre cele mai bune definiții se consideră: Tenacitatea este însușirea unui material de a suporta până la rupere sub acțiunea unui nivel de solicitare ridicat și deformații plastice mari. Avarierea sau distrugerea unei singure componente ale unei instalații conduce la compromiterea funcționării instalației întregi. În funcție de prezența sau absența deformațiilor plastice până la rupere, ruperea materialelor poate fi ductilă sau fragilă. Ruperea ductilă fiind precedată de deformații plastice importante are o energie de rupere apreciabilă.

Ruperea fragilă a elementelor de rezistență este deosebit de periculoasă deoarece se produce brusc într-un timp relativ scurt și pe lungimi mari și nu mai permite luarea unor măsuri de protecție eficiente împotriva consecințelor deseori foarte grave.

În literatura de specialitate se utilizează două noțiuni aparent asemănătoare dar cu domenii de aplicabilitate diferite și anume:

- tenacitatea materialelor, apreciată în general pe baza ariei suprafeței de sub curba caracteristică la tracțiune; aceasta este specifică materialelor considerate fără discontinuități fizice (goluri, fisuri etc.)

tenacitatea la rupere a materialelor, dezvoltată pe baza conceptelor Mecanicii

Ruperii și este specifică materialelor (elementelor de rezistență) care prezintă discontinuități fizice (goluri, fisuri etc.).

Pentru ca în prezența unui defect fizic să nu se producă distrugerea (ruperea) unui element de rezistență este necesar ca valoarea caracteristicii de tenacitate determinată analitic pentru acel defect să fie mai mică decât o valoare critică a caracteristicii de tenacitate, numită tenacitate la rupere.

Tenacitatea la rupere este o caracteristică mecanică care se determină experimental. În prezent sunt cunoscute mai multe expresii ale caracteristicii de tenacitate la rupere stabilite pe baza conceptelor Mecanicii Ruperii și toate sunt fundamentate teoretic. Cele mai utilizate caracteristici critice de tenacitate la rupere care cuprind metodele experimentale de determinare a caracteristicilor critice care sunt recomandate în proiectarea și verificarea conductelor de transport petrolier sunt prezentate în capitolul 3 al tezei.

CAP.2 CARACTERISTICI ALE CONDUCTELOR DE TRANSPORT PRODUSE PETROLIERE

2.1 Elemente constructive și de calitate ale materialului tubular

2.1.1 Cerințe generale

În ultimele decenii transportul prin conducte a cunoscut o dezvoltare rapidă datorită extinderii activității de extracție, de prelucrare și comercializare a petrolului brut, a gazelor naturale și produselor petroliere.

Pentru transportul economic al produselor, se tinde spre creșterea diametrului și grosimii peretelui țevilor fiind deja uzuale diametre de 7601420 mm. Presiunile ridicate de lucru, până la 120 bar, au condus la utilizarea unor grosimi de perete de peste 25 mm, în special pentru conducte submarine.

Tinând cont de condițiile menționate, oțelurile pentru conducte trebuie să prezinte caracteristici mecanice, tehnologice și economice însemnate și anume: rezistență mecanică ridicată, tenacitate ridicată (prescrisă uneori la temperaturi scăzute - 65° C), rezistență la coroziune, în special la acțiunea fragilizantă a hidrogenului, deformabilitate (plasticitate) ridicată, sudabilitate bună și cost redus.

Cerințele tehnico-economice reclamă utilizarea oțelurilor de înaltă rezistență pentru a permite reducerea grosimii peretelui în scopul reducerii costului țevilor, al operațiilor de sudare și al materialelor pentru sudare. În prezent se fabrică uzual conducte cu limita de curgere de peste 500 Mpa.

De asemenea se impune ca oțelul conductelor să prezinte o ductilitate și tenacitate ridicată datorită necesității asigurării unei comportări ductile a materialului pentru evitarea ruperilor fragile la temperatura de exploatare (în special la temperaturi sub 0° C).

În cazul transportului fluidelor cu H₂S, oțelul conductelor trebuie să asigure rezistență la fragilizare și rupere sub acțiunea hidrogenului.

Oțelul conductelor trebuie să prezinte o deformabilitate ridicată la cald și la rece pentru că majoritatea țevilor de diametru mare sunt executate prin îndoire și sudare.

Sudabilitatea este impusă atât de necesitatea fabricării țevilor sudate cât și pentru executarea sudurii în condiții de șantier.

Toate aceste cerințe au în general un caracter contradictoriu, astfel că realizarea lor simultană este posibilă numai printr-un complex de factori metalurgici (reducerea procentului de carbon, microaliere, controlul incluziunilor nemetalice, ș a.) și tehnologiei (tratamente termomecanice, tehnologii de sudare, etc.)

2.1.2 Forme constructive și condiții tehnice

Formele constructive, dimensiunile și condițiile tehnice generale de calitate ale țevilor pentru conducte destinate industriei petroliere sunt reglementate în

România prin mai multe standarde : STAS 715/2-88 [103]; "Ţevi de conductă cu capete netede pentru industria petrolieră" : STAS 6898/2-95 [104]; "Ţevi din oţel sudate elicoidal pentru conducte "STAS 11082-80 ; " Ţevi din oţel sudate elicoidal pentru conducte petroliere "Standard de ramură STR-MIM 331-86; " Ţevi din oţel sudate longitudinal pentru conducte".

O importanță deosebită prezintă standardele și normativele din C.S.I. S.U.A., Canada, Norvegia ș.a. țări cu o bogată experiență privind executarea și exploatarea conductelor pentru condiții grele de lucru (diametre și presiuni mari, lungimi mari, temperaturi scăzute, conducte submarine, ș.a.) Majoritatea standardelor au la bază standardul Institutului American al Petrolului (API) Spec.5L [112]. De asemenea țevile pentru conducte petroliere sunt reglementate pe plan mondial și de Standardul Organizației Internaționale de Standardizare ISO 3483-1980 " Oil and natural gas industries. Steel pipeline "[115].

Ţevile destinate industriei petroliere se diferențiază în funcție de două criterii de bază: 1. Din punct de vedere al modului de asamblare și 2. Din punct de vedere al tehnologiei de fabricație.

Din punct de vedere al modului de asamblare, se utilizează trei categorii de țevi:

- a. - țevi de conductă cu capete filetate, asamblate prin mufe;
- b. - țevi de conductă cu capete netede, asamblate între ele prin sudare.
- c. - țevi de conductă cu capete netede, asamblate între ele prin flanșe.

Din punct de vedere al tehnologiei de fabricație, țevile de oţel pot fi executate prin două procedee:

a. - prin deformare plastică la cald, de regulă prin laminare (prin metoda Manesmann) fără sudură.

b. - în construcție sudată

Diametrul maxim al țevilor laminate este limitat.

Prin procedeul de laminare la cald conform STAS 715/2-88 diametrul maxim este de 355,6 mm. Ele au avantajul că pot fi supuse unei deformații la rece în scopul obținerii formei, dimensiunilor și caracteristicilor mecanice impuse.

Ţevile în construcție sudată sunt fabricate dintr-o platbandă din oţel obținută prin laminare, deformată plastic prin curbare și sudată fie longitudinal, pe una sau pe două generatoare, fie elicoidal (sau în spirală). Acest procedeu de fabricație permite executarea țevilor cu diametre mari. Au fost executate țevi cu diametre de peste 2000 mm.

La fabricarea țevilor sudate se folosesc mai multe procedee de sudare:

a. - sudarea electrică prin presiune la cald, fără metal, încălzirea realizându-se prin rezistență electrică sau prin inducție.

b. - sudare prin presiune la cald, încălzirea capetelor pentru sudare făcându-se în cuptor;

c. - sudare automată sub strat de flux (SAF), sudare efectuându-se în cel puțin un strat la interior și cel puțin un strat la exterior.

d. - sudare cu arc electric cu electrod fuzibil cu protecție gazoasă de obicei gaze inerte (procedeu MIG – metal inert gaz) asigurând cel puțin un strat la interior și cel puțin un strat la exterior;

e. - procedee combinate între MIG, pentru stratul rădăcină și SAF, pentru straturile următoare.

Ţevile pot fi livrate la rece prin expandare cu excepția celor executate prin sudare prin presiune la cald.

Expandarea la rece constă în deformarea plastică a țevilor prin creșterea diametrului cu 1.....3% sub acțiunea unei presiuni interioare, prin introducerea țevii într-o matriță de calibrare prin care se realizează. Scopul operației este calibrarea dimensională și creșterea caracteristicilor de rezistență prin ecrusare.

Țevile pot fi livrate în stare obținută după laminare sau sudare fie tratate termic. În funcție de caracteristicile mecanice urmărite, se aplică următoarele tratamente termice : normalizare și revenire, recoacere de detensionare (la temperatura sub punctele critice), îmbătrânire și îmbunătățire (călire și revenire, aplicată pentru gradele de rezistență simbolizate prin X).

La fabricarea conductelor de diametru mare, pentru transportul țiteiului și gazelor se folosesc în principal țevi în construcție sudată.

1. Țevi din oțel sudate longitudinal. Țevile sunt executate din platbandă de oțel obținută prin laminare, deformată plastic succesiv în formă de U, O și sudată pe generatoare. Dacă apoi țevile sunt supuse și operației de expandare la rece, tehnologia de fabricație este simbolizată U-O-E.

Sudura longitudinală se execută de regulă din două treceri, una la interior, folosind sudarea sub flux cu unul sau doi electrozi, iar mai modern, pentru creșterea productivității și a calității sudurii se folosesc 3 electrozi.

La țevile sudate longitudinal, axa țevii este paralelă cu direcția de laminare, astfel încât tensiunea principală în exploatare (circumferențială) este orientată în direcția transversală în raport cu direcția de laminare. În cazul în care apar avarii în exploatare, fisura se propagă paralel cu axa țevii, unde rezistența este minimă. De aceea, aprecierea rezistenței la rupere trebuie efectuată pe epruvete orientate transversal în raport cu axa țevii. Ca urmare, la țevile sudate longitudinal este necesar controlul calității și formei incluziunilor nemetalice. Aceasta se realizează printr-o desulfurare avansată și prin sferoidizarea incluziunilor prin aliere cu pământuri rare, în principiu ceriu.

2. Țevi din oțel sudate elicoidal. Țevile sunt sudate din platbandă de oțel obținută prin laminare, înfășurată și sudată elicoidal prin sudare electrică sub strat de flux sau în atmosferă de gaze protectoare. Lățimea platbandei trebuie să fie cuprinsă între 0,83D, unde D este diametrul exterior al țevii. Cusătura elicoidală se sudează în maximum 2 straturi, unul la interior și altul la exterior, folosind unul, doi sau trei electrozi.

Țevile sudate elicoidal prezintă față de țevile sudate longitudinal următoarele avantaje:

a. - se pot fabrica țevi cu diametre de peste 1700 mm, într-o gamă largă de diametre, cu utilizarea unui număr redus de scule și dispozitive de formare.

b. - precizia dimensională este ridicată, iar ovalitatea redusă, făcând inutilă operația de calibrare prin expandare.

c. - înfășurarea elicoidală are ca efect faptul că direcția de laminare a platbandei este înclinată cu un unghi mic față de direcția circumferențială a țevii, după care se dezvoltă tensiunile maxime datorită presiunii interioare.

Aceasta permite o utilizare mai eficientă a caracteristicilor mecanice ale platbandei, mai ridicate în direcția de laminare.

d. - având în vedere că solicitarea cea mai defavorabilă a îmbinării sudate o reprezintă tensiunile de tracțiune normal pe cordonul de sudură, rezultă un avantaj important al țevilor sudate elicoidal, că tensiunea de tracțiune normală pe cordonul de sudură reprezintă numai 50-70 % din valoarea tensiunii circumferențiale (tensiunea maximă rezultată din presiunea interioară).

e. - la realizarea coturilor prin îndoire la rece nu este necesară luarea în considerație a poziției cusăturii ca la țevile sudate longitudinal. Astfel experimentările efectuate prin îndoirea la rece a țevilor sudate elicoidal au arătat că ovalitatea în secțiunea deformată se încadrează în recomandările normelor internaționale [45], care prevăd ca ovalitatea să nu depășească 2,5% la o îndoire ce corespunde unui unghi de $1,5^\circ$, pe o lungime egală cu diametrul conductei ($1,5^\circ D$)

f. - cercetările experimentale la spargerea conductei sub acțiunea presiunii interioare au confirmat avantajele menționate, evidențiind faptul că la rupere fisura se propagă pe o lungime mică după direcția axială, ca apoi să se orienteze în direcție circumferențială și să se oprească. Aceasta face posibilă utilizarea oțelurilor semicalmate, mai ieftine decât cele calmate, la fabricarea țevilor.

Țevile de conductă fără sudură destinate industriei petroliere, filetate la capete și îmbinate cu mufe sunt standardizate în STAS 715/1-80 și au diametrele exterioare cuprinse între 60,3 mm și 164,5 mm. Forma constructivă este prezentată în figurile 2.1,a pentru țevă și 2.1, b pentru mufă, iar forma filetului este prezentată în figurile 2.2 a și b

Fig. 2.1. - Țevi de conducte și mufe filetate
a- țevă ; b - mufă

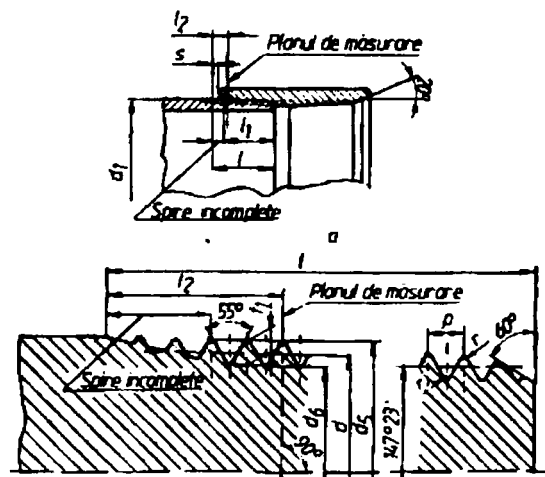
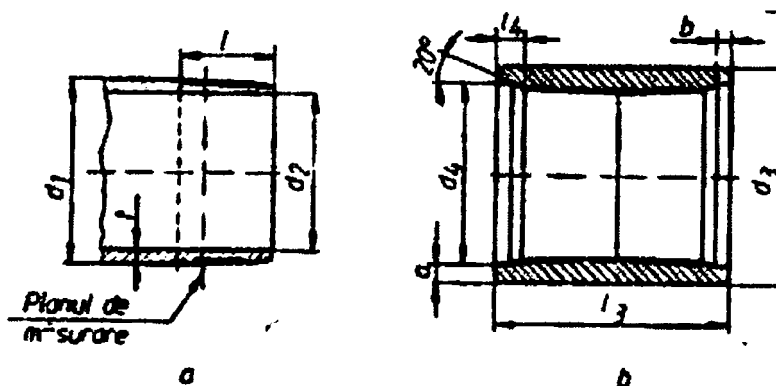
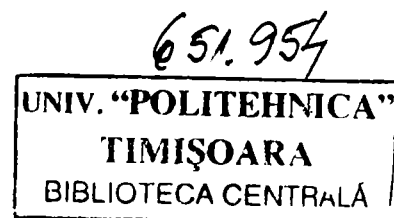


Fig. 2.2, a și b Forma filetului



Țevile de conductă filetate la capete se execută din oțel OLT 65 conform STAS 8185-88, iar mufele se execută din același material ca țevile sau dintr-un material de calitate superioară.

Conform normelor API [112] țevile filetate pentru conducte se execută în două variante - cu grosimea de perete normală (standard) și cu grosime de perete mărită.

Țevile filetate cu grosime de perete normală se fabrică în gama de diametre 10,3 mm508 mm , având grosimea de perete cuprinse între 1,79,5mm. Țevile filetate cu grosimea de perete mărită se fabrică în gama de diametre 10,3323,8mm, având grosimile de perete cuprinse între 2,4.....12,7 mm.

Conform [112] la conductele petroliere se folosește filetul cu profil triunghiular rotunjit ("rotund"), prezentat în Fig. 2,2 a și b.

Țevile de conducte cu capetele netede se fabrică în variantele laminate, sudate longitudinal și sudate elicoidal.

Dimensiunile țevilor de conductă cu capete netede, fără sudură, sunt date în STAS 715/2 - 88 în care se specifică și presiunea de încercare normală.

Țevile se livrează cu următoarele lungimi de fabricație : 48 m pentru $D \leq 114,3$ mm; 512 m pentru $D > 114,3$ mm.

Dimensiunile țevilor pentru conducte petroliere cu capete netede, sudate elicoidal, sunt cuprinse în STAS 11082-80.

În STAS 6892/2-90 sunt standardizate țevile sudate elicoidal pentru conducte petroliere, magistrale de gaze, termoficare, etc. și cuprind suplimentar față de STAS 11082-80, diametrele 1300, 1400, 1500 și 1600 mm. Țevile din STAS 6898/2-90 sunt executate din oțeluri cu caracteristici mecanice inferioare celor din STAS 11082-80. Din punct de vedere al rezistenței, se deosebesc două categorii și anume categoria S, cu coeficientul de calitate al îmbinării sudate $\phi = 1,0$ și categoria 0, cu coeficientul de calitate al îmbinării sudate $\phi = 0,9$. Țevile sudate elicoidal se livrează cu următoarele lungimi de fabricație : 6.....12 m STAS 11082-80; 6.....16 m , STAS 6898/2-90. Diametrele și grosimile de perete ale țevilor laminate, sudate longitudinal și elicoidal, corespund valorilor standardizate în normele API [112], care cuprind o gamă mai largă de tipodimensiuni, având diametrele între 10,3..2032 mm și grosimile de perete între 1,6.....31,8 mm.

Normele ISO 3182-80 [115], standardizează tipodimensiuni având diametrele cuprinse între 60,31420 mm, cu grosimi de perete cuprinse între 1,625 mm. Valorile diametrelor și grosimilor de perete corespund normelor API [112].

Pentru asigurarea unor dimensiuni unitare ale elementelor conductelor (țevi, armături, flanșe) și pentru standardizarea acestora se folosește noțiunea de diametru nominal. Conform STAS 2099-89, diametrul nominal este un număr convențional, fără dimensiuni, care servește pentru indicarea univocă a mărimii conductelor și elementelor de conducte. Valoarea lui numerică reprezintă, cu aproximație, dimensiunea în mm a diametrului interior efectiv al elementului de conductă respectiv. Diametrul nominal se notează cu simbolul D_n , urmat de valoarea numerică respectivă. Șirul de diametre nominale standardizate este cuprins între 1; 1,2; 1,5;3800; 4000. Valorile prescrise concordă practic cu recomandările normelor API [112] pentru dimensiunile și gradele de rezistență corespunzătoare .

2.1.3 Caracteristici mecanice. Grade de rezistență

Principalele caracteristici mecanice ale țevilor pentru conducte de transport petrolier se determină uzual prin încercarea la tracțiune în direcție perpendiculară pe direcția de laminare și sunt următoarele: limita de curgere, rezistența la rupere, alungirea la rupere iar energia de rupere prin încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătură în V. Pentru o apreciere mai completă a comportării în exploatare a conductei se efectuează și alte încercări mecanice și anume: încercarea la rupere prin șoc a materialului conductei, numită Drop Weight Tear Test – DWTT [113], determinarea tenacității la rupere după metoda K_{IC} (STAS 9760-84), încercarea la îndoire (STAS 777-88 și STAS 5340/3-81), încercarea de durtate Brinell (STAS 165-83) ș.a.

Caracteristicile mecanice determinate prin încercarea la tracțiune (STAS 200-87 "Încercarea la tracțiune" și STAS 6718-85 "Încercarea la tracțiune a țevilor") reprezintă principalul criteriu de clasificare a țevilor pentru conducte de transport în clase sau grade de rezistență.

2.1.3.1 Încercarea la tracțiune

Caracteristicile mecanice prescrise țevilor din diferite grade de rezistență sunt date în tabelul 2.1, conform normelor API [112] care stau și la baza standardelor românești și internaționale. Simbolizarea gradelor de rezistență cuprinde două cifre, care reprezintă valoarea limitei minime de curgere a materialului exprimată în 1000 psi (pounds/in²); 1 Ksi = 1000 pounds/in² = 6,895N/mm².

La simbolizarea ISO cele două cifre reprezintă tot valoarea limitei de curgere exprimată în N/mm².

Tabelul 2.1

Gradele de rezistență ale țevilor pentru conducte

Gradul		Limita de curgere conv. Minimă sau $R_{t0,5}$ [N/mm ²]	Rezistența la rupere min R_m [N/mm ²]		Alungirea min %	
API	ISO				$L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$	$A_{50,8}$
A25	E 17	172	310		27	
A	E 21	207	331		25	
B	E 24	241	373		21	
X 42		289	413			
X 64		317	434			
X 52		358	455 ²	496 ³		$1942,57 S_0^{0,2} / R_{m, \min}^{0,9}$
X 56		386	489 ²	517 ³		
X 60 ¹		413	517 ²	537 ³		
X 65		448	530 ²	551 ³		
X 70		482	565			
X 80		551	min 620; max 827			

Semnificația indicilor din tabelul 2.1.

1. Rezistența la rupere minimă pentru gradul X60 fabricat prin sudare electrică prin rezistență este 517 N/mm^2 .
2. Pentru țevile cu $D < 508 \text{ mm}$ (20 in) cu orice grosime de perete cu $D \geq 508$ și $t > 9,5 \text{ mm}$.
3. Pentru țevile cu $D \geq 508$ și $t \leq \text{min}$.
4. Alungirea minimă admisibilă se determină cu relația dată în tabelul 2.1 în care S_0 este aria secțiunii transversale a țevii.

În legătură cu caracteristicile mecanice cerute țevelor se mai precizează:

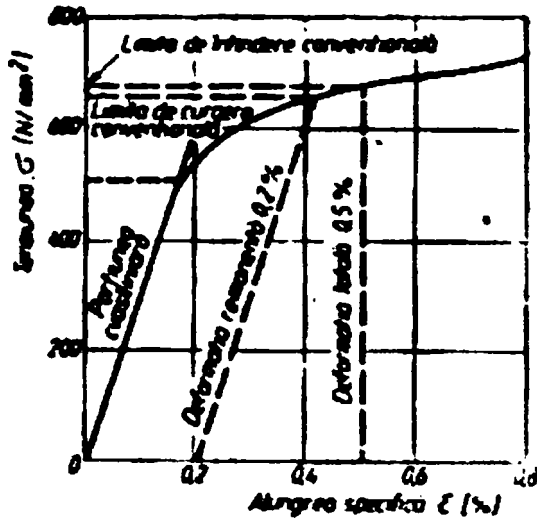
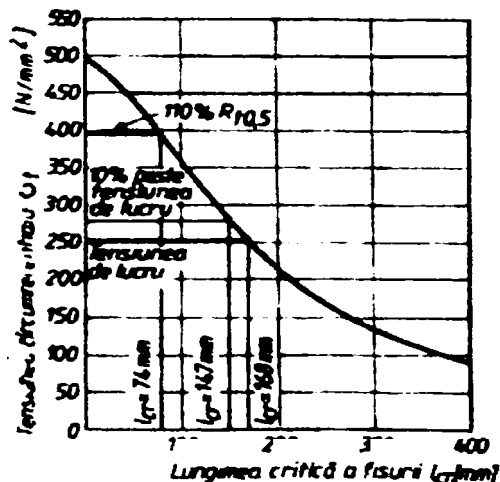


Fig.2.3 curba caracteristică a materialului

- a) Limita de curgere sau de elasticitate (marcate în figura 2.1) este definită ca limita de întindere convențională pentru

o alungire totală prescrisă de 0,5% ($R_{t0,5}$). Se folosește de asemenea și limita de curgere convențională corespunzătoare unei alungiri remanente de 0,2% ($R_{p0,2}$). Pentru oțelurile uzuale cele două valori sunt practic egale.



- b) Prelevarea epruvetelor pentru încercarea la tracțiune este reprezentată în Fig. 2.4, conform [110]. La țevile sudate longitudinal, epruvetele longitudinale pot fi prelevate și de la mijlocul platbandei laminate.

$$12,5 \geq t \leq 25,5$$

Fig. 2.4

Epruvetele longitudinale utilizate pentru încercarea la tracțiune pot fi epruvete tronson (Fig. 2.5a [112] și STAS 6718-85), epruvete fâșie (Fig. 2.5,b [112] și STAS 715/22-88) sau epruvete cilindrice (Fig. 2.5,c) cu diametrul 12,7mm pentru țevi cu $t > 19,1\text{mm}$. Epruvetele longitudinale au grosimea corespunzătoare grosimii peretelui țevii și se încearcă fără aplatizare (îndreptare).

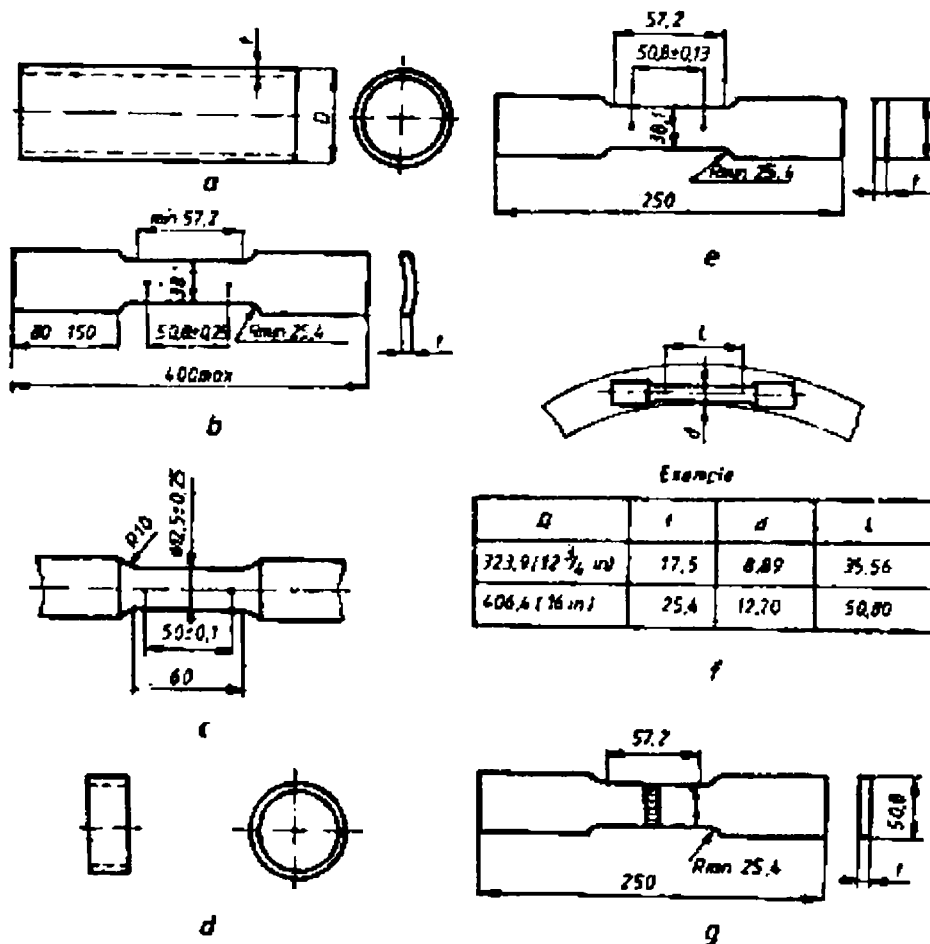


Fig. 25 Epruvete pentru încercarea la tracțiune : a,e - epruvetă tronson; b epruvetă fâșie; c - epruvetă cilindrică; d - epruvetă inel pentru proba de expandare; e-epruvetă transversală, f - epruvetă transversală cilindrică; g-epruvetă cu sudură.

Caracteristicile mecanice în direcție transversală se determină prin una din următoarele metode, la latitudinea producătorului de țevi: - determinarea pe epruvete plate "aplatizate" (Fig. 2.5,e [110] și STAS 11082-80), având grosimea corespunzătoare grosimii peretelui țevii sau pe epruvete cilindrice cu diametrul de 12,7mm sau 8,9mm (Fig. 2.5,f [110] și STAS 200-87) prelevate din peretele țevii fără îndreptare;

- determinarea numai a limitei de curgere prin extensia unui inel (Fig. 2.5,d), iar a rezistenței la rupere și a alungirii la rupere pe epruvete plate (aplatizate) [110]

Epruvetele pentru încercarea la tracțiune a sudurii sunt orientate perpendicular pe direcția cordonului, având cusătura în zona de mijloc, fără îndreptare (Fig. 2.5,g conform [110] și STAS 11082-80). Îngroșarea sudurii poate fi îndepărtată la opțiunea producătorului de țevi. Epruvetele au grosimea corespunzătoare grosimii peretelui țevii.

Țevile sudate pot fi supuse la cerere și unor încercări mecanice suplimentare conform [110], unele din ele fiind prevăzute și în standarde românești din care se menționează:

- încercarea la aplatizare;
- încercarea la tracțiune a epruvetelor din zona cusăturii, epruveta fiind prelevată în lungul axei cusăturii;
- încercarea la îndoire a îmbinării sudate pe epruvete prelevate perpendicular pe axa cusăturii supuse îndoirii în zona sudurii, la circa 180°, pe un dispozitiv de îndoire cu ghidaj. Încercarea este adoptată și pentru țevi sudate elicoidal conform STAS 11082-80.

Normele internaționale prevăd efectuarea încercărilor privind determinarea tenacității țevelor de conducte la temperatura cerută de beneficiar [110] sau când este impusă. Determinarea tenacității țevelor pentru conducte se efectuează prin următoarele încercări:

a) încercarea la încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătura în V, conform STAS 7511-81, pe țevi cu diametrul $D \geq 406,4 \text{ mm}$ grad X 42 și superioare, ca și țevile sudate cu $D \geq 508 \text{ mm}$, grad X 52 și superioare;

b) încercarea la rupere prin șoc a materialului conductei, conform [46], cu scopul aprecierii capacității de deformare a materialului conductei înainte de rupere, pentru țevile cu diametrului $D \geq 408 \text{ mm}$ grad X 52 și superioare. De asemenea, pentru aprecierea comportării la rupere se recomandă și încercarea de încovoiere cu șoc pe epruvete încărcate cu sudură (metoda Puzak - Pellini), STAS 9261-81, și determinarea caracteristicilor materialului specifice "mecanicii ruperilor", cum sunt tenacitatea la rupere determinată după metoda K_{IC} și caracteristica de deplasare la deschidere a fisurii, proiect STAS 10052-88.

2.1.3.2 Încercarea la încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătura în V Standardele românești pentru conducte nu prevăd aceste încercări.

Conform normelor [110] se recomandă efectuarea încercării pe trei epruvete cu creștătura în V prelevate transversal din peretele țevii fără îndreptare, având dimensiunea $10 \times 10 \text{ mm}^2$, sau pentru grosimi mai mici de perete, epruvete reduse în direcția axei creștăturii la $2/3(10 \times 7,5 \text{ mm}^2)$ sau $1/2(10 \times 5 \text{ mm}^2)$ din dimensiunea normală.

Pentru conducte cu diametrul $D < 168,3 \text{ mm}$ se folosesc epruvete longitudinale.

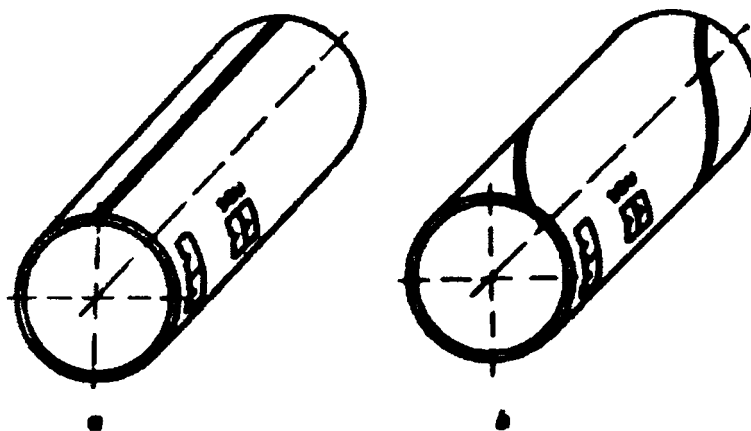


Fig. 2.6 Prelevarea epruvetelor pentru încercarea la încovoiere prin șoc:
a-țevi sudate longitudinal; b-țevi sudate elicoidal

Pentru conducte cu diametrul transversal în raport cu axa țevii, având creștătura orientată pe direcția grosimii peretelui. Se recomandă ca, la țevile sudate longitudinal, epruvetele să fie prelevate dintr-o zonă aflată la 90° față de cusătură (Fig. 2.6,a), iar la țevile sudate elicoidal să fie prelevate aproximativ la mijlocul distanței dintre două cordoane succesive (Fig. 2.6,b)

Criteriile de apreciere a rezultatelor încercării sunt următoarele:

- a) aspectul suprafeței de rupere pentru determinarea cristalinității și fibrozității ruperii conform STAS 10026-75;
- b) valoarea energiei de rupere KV;
- c) temperatura de tranziție

Conform [110], la țevile cu $D \geq 508 \text{ mm}$ grad X 52 și superioare, epruvetele se încercă la temperatura de 10°C sau la temperatură mai coborâtă, specificată de beneficiar.

Se cere ca aria rupturii ductile (fibroase) ca medie a trei încercări să nu fie inferioară valorii de 35% din aria secțiunii totale de rupere. Sunt supuse acestor încercări și țevile de conductă cu $D \geq 406,4 \text{ mm}$ grad X 42 și superioare, temperatura de încercare și criteriile de acceptare fiind stabilite de beneficiar. Pentru gradul de X80 de exemplu se impun următoarele cerințe privind tenacitatea, ca media a trei epruvete: KV_{min} la $0^\circ\text{C} = 27 \text{ J}$; aria minimă rupturii fibroase (ductile) la $0^\circ\text{C} = 40\%$.

2.1.3.3 Încercarea la rupere prin șoc a materialului conductei (Drop-Weight Tear Test - DWTT).

Încercarea este destinată aprecierii capacității de deformare a materialului conductei înainte de rupere. Fiind bazată pe un volum mare de experimentări, care au permis atât standardizarea încercării [110], cât și corelarea rezultatelor ei cu valorile KV.

Ca urmare încercarea este practic generalizată $t \leq 39,7\text{mm}$ pentru aprecierea comportării la rupere a conductelor având $D \geq 508\text{mm}$ și grosimea de perete. Încercarea constă în ruperea dintr-o singură lovitură a unei epruvete așezate liber pe două rezeme, folosind fie un ciocan pendul fie un berbec ce cade liber într-o sonetă. Soneta sau pendulul trebuie să realizeze energii de cădere de cca. 2700J. Viteza de lovire trebuie să fie mai mare decât 5m/s.

Pentru temperatura de încercare la determinarea energiei de rupere se adoptă valorile indicate în tabelul 2.2

Tabelul 2.2

Grosimea peretelui [110]	Temperatura de încercare [°C]	
	Conducte pentru gaze	Conducte pentru lichide
$t \leq 12,5$	$t = t_{\min} - 10$	$t = t_{\min}$
$12,5 \geq t \leq 25,5$	$t = t_{\min} - 10$	$t = t_{\min}$
$t \geq 25,5$	Se decide în fiecare caz	

Epruveta se prelevează astfel ca lungimea sa să fie orientată în direcția circumferențială a țevii (ca în figura 2.6). Forma și dimensiunile epruvetei sunt prezentate în figura 2.7.

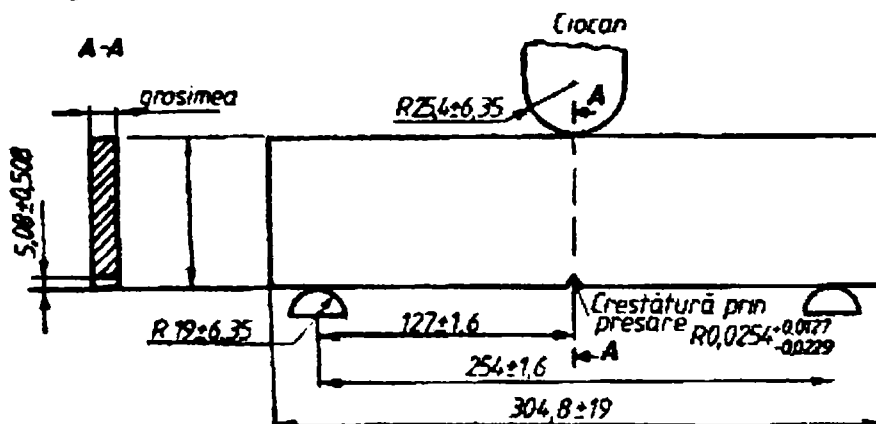


Fig. 2.7 Forma și dimensiunile epruvetei pentru încercarea la rupere prin șoc a materialului conductei după DWTT

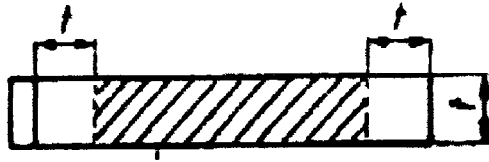
Epruvetele pot fi complet îndreptate (aplatizate) sau se poate lăsa neîndreptată o porțiune de 25 ... 50mm având curbura țevii. În zona centrală a epruvetei se practică o creștătură prin deformare plastică (presare) cu ajutorul unui penetrator din oțel, ascuțit la un unghi de $40^\circ \pm 2^\circ$, fără rază la vârful. Grosimea epruvetelor se alege, în funcție de grosimea peretelui țevii t , astfel:

- pentru $t \leq 19\text{mm}$ epruveta are grosimea peretelui țevii
- pentru $t > 19\text{mm}$ a) grosimea peretelui țevii; b) = 19mm, prin prelucrarea pe una sau pe ambele fețe

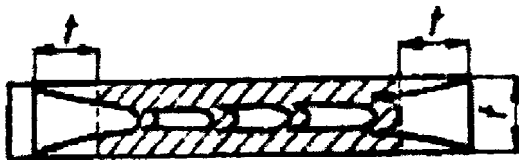
Răcirea epruvetelor se efectuează într-o baie cu amestec frigorific la temperatura de încercare cu o precizie de $\pm 1^{\circ}\text{C}$, prin menținerea minim 15 minute la temperatură constantă a epruvetelor cu $t \leq 19\text{mm}$, respectiv minimum 30 minute a epruvetelor având $t \geq 19\text{mm}$ ruperea se efectuează într-un interval de maximum 10s de la scoaterea epruvetelor din baie.

Determinarea cristalinității și fibrozității ruperii

Suprafața rupturii fibroase are un aspect cristalin mat de culoare gri închis și



a



b

este cu un unghi înclinată în raport cu suprafața epruvetei. Suprafața rupturii cristaline (sau fragile) are un aspect cristalin strălucitor și se extinde, în general, de la baza creștăturii, fiind înconjurată de o suprafață de rupere fibroasă.

În cadrul încercării, se determină fibrozitatea ruperii ca raport dintre aria rupturii fibroase și aria secțiunii transversale a epruvetei (exprimat în %), pentru evaluare luându-se în considerație numai o parte a secțiunii de rupere, după cum urmează:

pentru epruvete cu $t \leq 19\text{mm}$ se neglijează suprafețele cuprinse în limitele unei grosimi de perete de la baza concentratorului și de la partea opusă concentratorului (aria hașurată în Fig. 2.8,a)

Aria suprafeței de rupere utilizată la evaluarea fibrozității ruperii

Fig. 2.8

- pentru epruvete cu $t > 19\text{mm}$ se neglijează aceleași suprafețe în limita distanței de 19mm (Fig. 2.8,a)

Uneori se întâlnesc suprafețe de rupere de tipul celor prezentate în figura 2.8,b, aspectul sugerând zone de rupere fibroasă și cristalină în porțiunea centrală a epruvetei.

Zonele de rupere fibroasă din porțiunea centrală se neglijează, în calculul ariei ruperii fibroase luându-se numai porțiunea hașurată.

Determinarea (fibrozității vezi și STAS 10026-75) Determinarea cristalinității și fibrozității ruperii, se face prin mai multe metode din care se amintesc următoarele:

a) se măsoară, în ruptură dimensiunile secțiunii cu rupere fibroasă și se calculează fibrozitatea ruperii.

b) se compară aspectul rupturii cu scări de apreciere a caracterului tenace.

În normele API [110], valorile fibrozității la încercarea DWTT sunt prescrise numai pentru clasa de rezistență X80.

2.1.3.4 Încercarea la oboseală

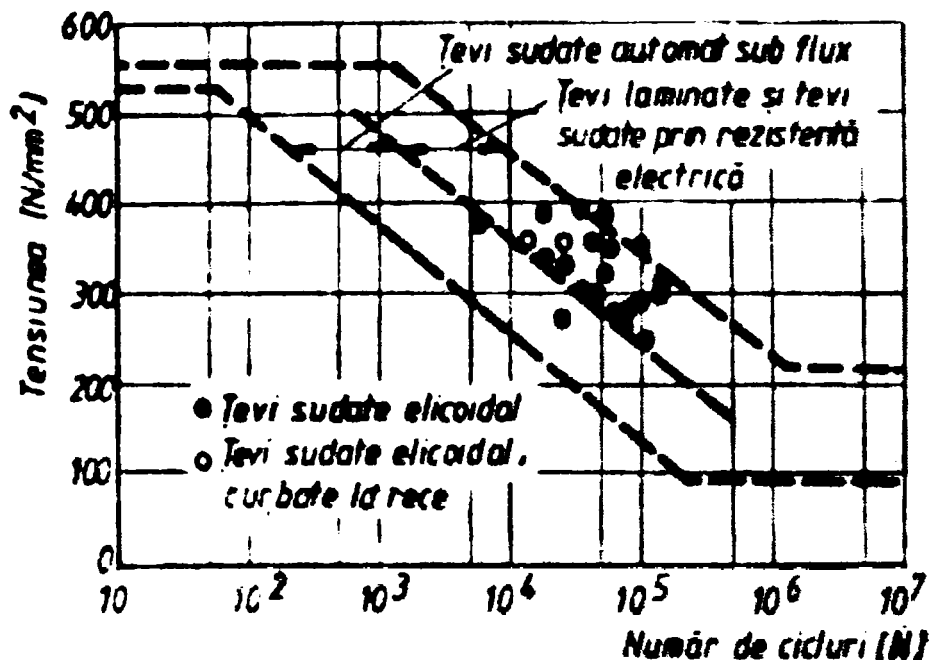


Fig. 2.9 Rezistența la solicitări variabile a țevilor de conducte

Comportarea țevilor sub acțiunea solicitărilor dinamice (la oboseală) reprezintă o caracteristică importantă pentru situația variațiilor pulsatorii ale presiunii, a șocurilor hidraulice, a oscilațiilor porțiunilor de conductă cuprinse între reazeme ș.a. Rezistența la presiune interioară variabilă corespunzătoare unei durabilități limitate a țevilor executate prin diferite procedee tehnologice, este prezentată în figura 2.9, determinată prin încercarea la presiune interioară variabilă a vaselor de presiune executate din țevile experimentale.

În figură sunt reprezentate domeniile de valori ale rezistenței la solicitări variabile pentru țevile laminate, sudate longitudinal automat sub flux, sudate electric sub presiune și sudate elicoidal. Se observă că țevile sudate elicoidal și cele rectilinii cât și cele curbate la rece se comportă la fel ca țevile laminate și ca cele sudate electric prin presiune.

2.1.4 Factorii metalurgici și tehnologici care trebuie să asigure caracteristicile impuse țevilor pentru conducte

Ansamblul de caracteristici mecanice și de exploatare impuse țevilor pentru conducte se realizează ținând seama de o serie de factori metalurgici și tehnologici dintre care cei mai importanți sunt compoziția chimică și tratamentele termice, condițiile de elaborare a oțelului și controlul formei și cantității incluziunilor nemetalice.

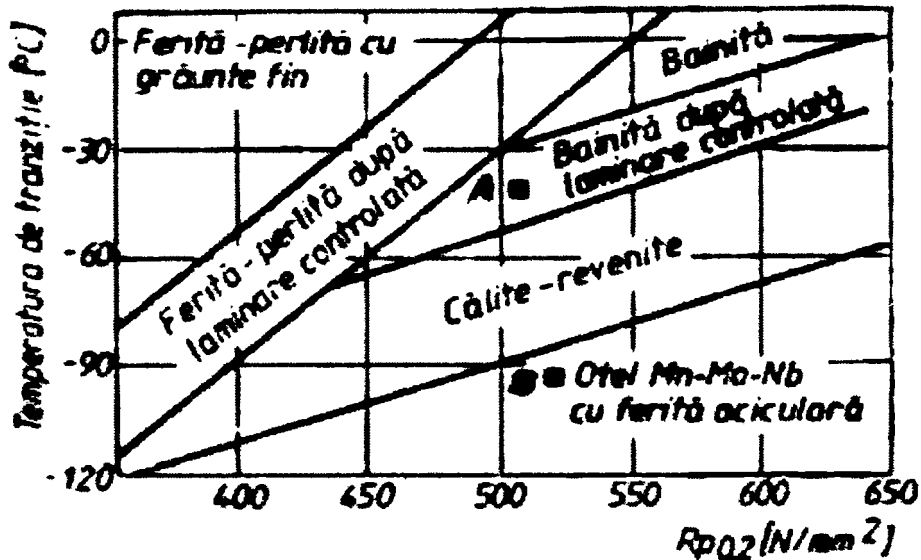


Fig. 2.10 Caracteristicile oțelurilor de conducte

În figura 2.10 sunt prezentate cuplurile de proprietăți limită de curgere – temperatura de tranziție corespunzătoare unei suprafețe de rupere cu 50% ruptură fibroasă (ductilă) realizate la diferite clase de oțeluri pentru conducte. Se observă că oțelurile cu structura ferito-perlitică prezintă cele mai scăzute caracteristici, în timp ce oțelurile tratate termic prin îmbunătățire și cele cu structură bainitică (punctul A) sau de ferită aciculară (punctul B) prezintă valorile maxime ale proprietăților.

2.1.4.1 Compoziția chimică și tratamentele termice

La fabricarea țevilor pentru conducte petroliere se folosesc următoarele clase de oțeluri: oțeluri carbon-mangan, oțeluri slab aliate cu granulație fină; oțeluri durificate prin precipitare dispersă, PD (oțeluri cu procent redus de carbon, microaliate de tipul Mo-Nb, Mo-Nb-V și Mn-Mo-Nb).

Oțelurile carbon și oțelurile slab aliate cu mangan, utilizate în starea structurală obținută după laminare sau în stare normalizată, au structura ferito-perlitică conform figurii 2.10 aceste oțeluri au și limita de curgere redusă, fiind utilizate cu precădere la fabricarea conductelor pentru presiune relativ joasă, fără garantarea siguranței în exploatare la temperaturi scăzute.

Din această categorie de oțeluri normele românești prevăd pentru conducte utilizarea următoarelor oțeluri:

Țevile de conducte fără sudură (laminare) cu capetele netede, conform STAS 715/2-88 se execută din mărcile de oțel OLT35, OLT45 și OLT65, conform STAS 8183-80 și STAS 8185-88, în gradele de rezistență A sau B. Caracteristicile mecanice și compoziția lor chimică sunt prezentate în tabelul 6.16 din [81] p.424. Aceste prescripții corespund specificațiilor normei API [112] pentru gradele A și B

Țevile sudate longitudinal cu capetele netede, conform standardului de ramură STR-MIN 331/86 se execută din mărcile de oțel OL32, OL34, OL37, OL42 și

OL44, conform STAS 500/2-80, ale căror compoziții chimice și caracteristici mecanice sunt prezentate în tabelul 6.17 din [81] la p.425.

Țevile din oțel sudate elicoidal se execută conform prescripțiilor următoarelor două standarde:

- conform STAS 11082-80, țevile pentru conducte petroliere se execută în clasele de rezistență X42, X46, X52 și X60 cu compozițiile chimice prezentate în tabelele 2.3 și 6.18 din [81], care coincid cu prescripțiile normelor APL [112];

- conform STAS 6898/2-90, țevile elicoidale cu o destinație mai largă decât pentru conducte petroliere se execută din bandă de oțel OL44.2 și OL52.2

Tabelul 2.3 Oțeluri pentru conducte

1	2	3	Compoziția chimică pe oțel lichid [%]								
			C	M _m		P		S	N _b min.	V min	T _i min.
				max	min.	max	min.				
4	5	6	7	8	9	10	11	12			
Deformare plastică	Neexpandate sau expandate la rece	A25 Cl. I	0,21	0,30	0,60	-	0,045	0,06	-	-	-
		A25 Cl. II ¹⁾	0,21	0,30	0,60	0,045	0,080	0,06	-	-	-
		A	0,22	-	0,9	-	0,040	0,05	-	-	-
		B	0,27	-	1,15	-	0,040	0,05	-	-	-
	Neexpandate	X42	0,9	-	1,25	-	0,040	0,05	-	-	-
		X40, X52	0,31	-	1,35	-	0,040	0,05	-	-	-
	Expandate la rece	X42, X46 X52	0,29	-	1,25	-	0,040	0,05	-	-	-
	Neexpandate sau expandate la rece	X56, X60 X65, X70	0,26	-	1,35	-	0,040	0,05	0,005	0,02	0,03
			Prin înțelegere între părți								

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Sudate	Prin presiune	A25 Cl. I	0,21	0,30	0,60	-	0,045	0,06	-	-	-
		A25 Cl. II	0,21	0,30	0,60	0,045	0,080	0,06	-	-	-
	Neexpandate sau expandate la rece	A	0,21	-	0,90	-	0,04	0,05	-	-	-
		B	0,26	-	1,15	-	0,04	0,05	-	-	-
		X42	0,28	-	1,25	-	0,04	0,05	-	-	-
	Neexpandate	X46, X52	0,30	-	1,35	-	0,04	0,05	-	-	-
	Expand. la rece	X46, X52	0,28	-	1,25	-	0,04	0,05	-	-	-
	Neexpandate sau expandate la rece	X56, X60	0,26	-	0,35	-	0,04	0,05	0,005	0,02	0,03
		X65	0,26	-	1,40	-	0,05	0,05	0,005	0,02	-
		X70	0,28	-	1,60	-	0,04	0,05	-	-	-

În tabelul 2.3 sunt reprezentate compozițiile chimice (pe oțel lichid) ale oțelurilor folosite la fabricarea țevilor pentru conducte, conform normelor API [112]. Standardul permite, ca pe baza înțelegerii între producător și beneficiar să se fabrice compoziția oțelului în privința elementelor N_b, T_i și V.

Oțelul carbon se recomandă pentru gradele A25, Cl I și Cl II, oțeluri carbon-mangan pentru gradele A și B și oțeluri slab aliate pentru gradele de rezistență superioare.

La realizarea gradelor de rezistență superioare X42 ... X80, simultan cu menținerea tenacității și sudabilității oțelului se utilizează următoarele metode:

a) Alierea cu elemente care se dizolvă în ferită, mărindu-i rezistența. Creșterea rezistenței feritei se poate realiza prin aliere cu M_n și S_i dar se obține numai o creștere relativ mică deoarece un conținut mai mare conduce la limitarea sudabilității și tenacității oțelului.

b) Finisarea granulației care are ca efect creșterea atât a limitei de curgere cât și a tenacității oțelului este soluția uzuală pentru oțelurile de conducte de înaltă rezistență. Finisarea granulației se realizează prin două metode:

- Alierea cu elemente care precipită la limita dintre cristale sub formă de nitruri, carburi sau carbonitruri, care limitează creșterea cristalelor de austenită.
- Laminarea "controlată" privind temperatura, viteza de deformare, gradul de deformare și viteza de răcire, conducând la obținerea unei granulații fine înaintea transformării austenită-ferită ($\gamma=\alpha$), procedeu cunoscut și sub denumirea de tratament termomecanic.

c) Microalierea cu elemente care conduc la precipitarea unor particule fine de carbonitruri conduce la o creștere apreciabilă a rezistenței fără afectarea substanțială a tenacității (oțeluri PD). Pe această bază au fost elaborate oțeluri slab aliate de înaltă rezistență cu structură ferito-perlitică de tipul C – Mn – Nb sau C – Mn – V, recomandate pentru gradele de rezistență X42 ...X80. [81], [112]

Aceste oțeluri au și următoarele limitări:

- Oțelurile ferito-perlitice nu se ecrusează suficient în procesul de deformare plastică (de îndoire pentru formarea conductei)
- Oțelurile ferito-perlitice nu asigură o tenacitate suficientă la temperaturi scăzute;
- Aceste oțeluri prezintă un procent de carbon echivalent relativ ridicat care creează probleme la sudarea conductelor în condiții de șantier, în regiuni cu temperaturi scăzute.

În prezent soluția tehnică pentru realizarea oțelurilor de conducte cu limită de curgere ridicată, tenacitate la temperaturi scăzute și cu sudabilitate bună o reprezintă reducerea accentuată a procentului de carbon (la unele oțeluri sub 0,06%) asociată cu finisarea granulației și obținerea unei structuri cu densitate maximă de dislocații prin tratamente termomecanice și durificare prin precipitare [5], [81].

Din această categorie fac parte oțelurile:

- Oțeluri cu conținut redus de perlită;
- Oțeluri cu structură de ferită aciculară;

Ambele categorii sunt oțeluri slab aliate cu granulație fină de tipul Mn – Mo – Nb, cu foarte puțin carbon, având caracteristicile mecanice reprezentate de punctele A și B în figura 2.10.

Oțeluri de conducte tratate termic prin îmbunătățire

După cum rezultă din figura 2.10 oțelurile îmbunătățite prezintă o combinație optimă între caracteristicile limită de curgere – temperatură de tranziție. La țevile pentru conducte aplicarea acestui tratament este dificilă. Se folosesc două variante tehnologice: 1) tratarea platbandei înaintea sudării; 2) tratarea țevii după formare și sudare. Majoritatea producătorilor folosesc prima variantă, recomandată pentru gradele X80 și X100 ($R_{p0,2}=550$ și respectiv 685 N/mm²). Se practică următoarele variante de tratament termic:

a) Călirea direct de la temperatura de laminare, urmată de revenire. Procedeu este economic, se asigură o călibilitate mai mare a oțelului și obținerea unor durități mai mari după revenire decât la alte procedee.

b) Călirea întreruptă, constând în răcirea până la temperatura la care începe precipitarea carbonitrurilor de Nb și/sau V, conferind o combinație foarte bună de caracteristici rezistență – tenacitate fără aplicarea revenirii.

c) Călirea fără revenire, aplicabilă la oțelurile cu puțin carbon fără prescripții speciale privind tenacitatea.

d) Aplicarea unui tratament intercritic; după călire în domeniul austenitic se aplică o nouă călire la temperatură cuprinsă între A_{C1} și A_{C3} , urmată de revenire. Tratamentul este aplicat uzual la oțelurile Mn – Ni – Mo.

Tratamentul termic de îmbunătățire se aplică țevelor folosind încălzirea în cuptor sau prin inducție și răcire cu dușuri de apă la exterior și interior.

2.1.4.2 Condiții de elaborare

În mod normal oțelurile pentru conducte sunt calmate, putându-se utiliza și oțeluri semicalmate pentru țevile cu limita de curgere sub 295 N/mm^2 . De asemenea oțelurile pentru țevi trebuie să fie elaborate numai în cuptoare Siemens – Martin, în convertizoare cu insuflante de oxigen sau printr-o combinație a acestor procedee.

2.1.4.3 Controlul formei și cantității incluziunilor nemetalice.

Asigurarea unei tenacități ridicate în direcție transversală față de direcția de laminare a țevelor și a platbandelor destinate țevelor impune evitarea alungirii incluziunilor nemetalice în direcția de laminare, cu formarea fibrajului caracteristic. În acest scop, la oțelurile pentru conducte de înaltă rezistență s-au elaborat următoarele soluții:

- Reducerea procentului de sulf în, oțelurile calmate sub valoarea 0,01%
- Tratarea oțelului calmat cu elemente din grupa pământurilor rare (în principal cu ceriu) Ca, Ti sau Zr, având ca efect alierea sulfurilor, făcându-le astfel mai puțin ductile și evitând alungirea lor în direcția de laminare. Raportul Ce/S de 2:1 asigură uzual globulizarea sulfurilor, conducând la îmbunătățirea tenacității [17]

2.2. Cerințele de bază ale proiectării conductelor utilizate pentru transportul produselor petroliere.

2.2.1 Generalități

Proiectarea, construcția și exploatarea conductelor trebuie să asigure funcționarea fără defecțiuni majore a sistemului acestora pe toată durata de utilizare prevăzută.

Proiectarea conductelor impune calculul hidraulic, calculul de rezistență și calculul de stabilitate al acestora.

Ținând seama de proprietățile fizice ale fluidului și parametrii hidrodinamici ai mișcării fluidului în conductă, calculul hidraulic urmărește determinarea diametrului conductei, determinarea presiunii necesare pentru pompare, a numărului și amplasamentul stațiilor de pompare, determinarea debitului ș.a.

Calculul mecanic al conductelor urmărește, în primul rând determinarea grosimii pereților conductelor pentru asigurarea unei comportări corespunzătoare a acestora la solicitările din exploatare. Ele nu trebuie să ajungă în situația de a nu-și mai putea îndeplini funcțiunea pentru care au fost destinate cum ar fi de exemplu în cazul apariției unei deformații plastice excesive (curgere), deformații elastice excesive (pierderea stabilității), ruperea (fragilă sau prin oboseală).

La calculul grosimii peretelui conductei trebuie să se țină seama și de caracterul terenului, de condițiile de lucru și de cerințele de securitate, pe baza cărora diferite sectoare din traseul unei conducte pentru transportul hidrocarburilor lichide sub presiune se grupează conform STAS 10741 - 80 [110] în următoarele trei categorii.

- Categoria 1. - cuprinde: sectoare care traversează zone populate sau industriale; sectoare care trec în apropierea surselor de apă de suprafață și subterane; sectoare care traversează cursuri de apă principale; traversări subterane și traversări aeriene portante ale râurilor și canalelor navigabile.

- Categoria 2. - cuprinde: sectoare care traversează subteran căi ferate; sectoare care traversează subteran drumuri naționale, județene sau comunale; sectoare care traversează aerian portant căi ferate și drumuri; sectoare care traversează mlaștini.

- Categoria 3. - cuprinde traseul conductelor pentru transportul hidrocarburilor lichide necuprinse în categoriile 1 și 2, traversări aeriene și subterane ale canalelor de irigație.

Traseele conductelor de gaze se încadrează și ele în două clase distincte, conform STAS 8281-84 : clasa I cuprinde porțiunile de teren greu accesibile și porțiunile situate la distanțele minime de siguranță față de construcțiile existente sau proiectate, iar clasa II cuprinde porțiunile de traseu situate la distanțele de siguranță ce depășesc zona clasei I.

2.2.2 Solicitățile principale ale conductelor cu pereți subțiri

Solicitățile mecanice ale conductelor cu pereți subțiri pot avea caracter permanent sau temporar.

Solicitățile permanente sunt datorate greutateii proprii a conductei, a izolației acesteia și a altor elemente constructive solidare cu conducta, a greutateilor pământului de umplutură la conductele îngropate, a pretensionării conductei (încovoierea elastică) și a presiunii hidrostatice a apei la conductele subacvatice sau în terenuri mlăștinoase. Solicitățile temporare pot fi de lungă durată sau de scurtă durată. Cele de lungă durată sunt datorate presiunii fluidului transportat, greutateii produsului, dilatației termice a țevilor, a tasărilor de teren ș.a. Solicitățile de scurtă durată sunt cauzate de zăpadă, gheață, presiunea de probă, operații de curățare a conductei precum și de solicitările dinamice produse de acțiunea vântului, a cutremurelor, vibrațiilor, loviturilor de berbec și a valurilor la conductele subacvatice ș.a.

Principala solicitare a conductelor este cea produsă de presiunea interioară, pe baza căreia se determină atât grosimea peretelui cât și întregul consum de metal. În afară de aceasta pe parcursul execuției și lansării conductei, precum și în exploatare, intervin solicitări suplimentare datorate factorilor climatici, de al căror efect trebuie să se țină seama la proiectarea conductelor.

Solicitățile individuale sau combinate pot conduce în anumite cazuri la depășirea rezistenței materialului sau la pierderea stabilității conductei.

Sub acțiunea presiunii interioare în conductă se dezvoltă tensiuni circumferențiale σ_t , care se determină fie considerând conducta un înveliș cilindric cu perete subțire (când se neglijează variația tensiunii radiale σ_r pe grosimea peretelui), fie mai rar considerând conducta un înveliș cilindric cu peretele gros.

Tensiunea circumferențială (tangențială) la conductele cu perete subțire are expresia

$$\sigma_1 = \frac{p_i \cdot D}{2t} \quad (2.1)$$

în care D este diametrul exterior nominal, iar t , grosimea de perete nominală.

Din relația (2-1) se deduce valoarea presiunii interioare ce conduce la atingerea limitei de curgere în țevă

$$p_i = 0,875 \frac{2 \cdot R_{p0,2\min} t}{D} \quad (2.2)$$

în care factorul 0,875 are rolul de a lua în considerare grosimea minimă de perete conform toleranței standardizate. Aceeași valoare a presiunii este luată în considerație și pentru atingerea limitei de curgere în zona filetată și prevăzută cu mufă. Valorile presiunii interioare ce conduc la atingerea limitei de curgere în țevă, calculate cu relația (2-2) recomandată și de API [112 cap.4] sunt date și în tabelul 4.18 (p.314 – 325 din Vlad Ulmanu [81] pentru toate tipodimensiunile și gradele de rezistență.

În unele situații starea limită pentru conducte nu o reprezintă curgerea sau ruperea ci valoarea deformațiilor (sau tensiunilor) admisibile. Acesta este cazul conductelor care transportă fluide cu H_2S (uzual gaze), la care intervin fenomene de fisurare corosivă sub tensiune în mediu H_2S , care sunt cu atât mai intense cu cât tensiunile și presiunea parțială a H_2S au valori mai ridicate. Tensiunea maximă admisibilă se determină ca o fracțiune din valoarea limitei de curgere a materialului conductei.

Presiunea interioară determină totodată și tensiuni axiale de întindere uniform distribuite pe secțiune date de expresia

$$\sigma_x = \frac{D_i^2}{D_e^2 - D_i^2} P \quad (2.3)$$

în care D_i este diametrul interior al conductei, iar D_e – diametrul exterior.

Valoarea tensiunilor axiale este influențată și de configurația (traseul) conductei și de interacțiunea cu mediul înconjurător. La conductele îngropate, în mod obișnuit tensiunile radiale se neglijează.

Pentru calculele de proiectare al conductelor la presiune interioară Normativul departamental ND 1000/3813 – 81 definește următoarele valori ale presiunii :

a. - presiunea de lucru sau de regim, în bar este presiunea necesară asigurării vehiculării prin conductă a debitului masic impus, luându-se în considerare diferențele de nivel de pe traseul conductei, vâscozitatea, greutatea specifică a lichidului și contrapresiunea menținută în punctul terminal al conductei sau al tronsonului considerat;

b. - presiunea maximă de lucru sau de regim, în bar, este suma dintre presiunea statică, presiunea necesară învingerii pierderilor prin frecare și contrapresiunea impusă în punctul terminus al conductei. Creșterile de presiune peste presiunea maximă a regimului de exploatare, datorită unor variații ale condițiilor normale de exploatare, nu trebuie să depășească în nici un punct al sistemului de conducte valoarea de 10% din presiunea menționată ;

c. - presiunea de proiectare este presiunea folosită în calculul de dimensionare a tuturor elementelor conductei, pentru funcționarea în condiții de siguranță în toate punctele acesteia. Pentru calculul de verificare, această presiune reprezintă presiunea la care poate fi supus elementul de conductă fără depășirea

solicitării admisibile la temperatura de calcul. Presiunea de proiectare nu va fi mai mică decât presiunea maximă de lucru sau de regim. În cazul în care conducta poate fi supusă la presiune exterioară, respectiv la diferențele mari dintre presiunea exterioară și cea interioară, se va face și verificarea stabilității secțiunii conductei ;

d. - presiunea nominală este o presiune convențională care constituie un criteriu pentru clasificarea, proiectarea și alegerea elementelor conductelor. Presiunea nominală reprezintă presiunea maximă a fluidului, cu o temperatură de 20°C, la care poate fi folosit în cursul duratei de exploatare elementul de conductă executat dintr-un anumit material. Notarea unei presiuni nominale de 100 bar : Pn 100.

e. - presiunea exterioară. Solicitarea la presiune exterioară este importantă numai în cazul conductelor submarine de transport al produselor petroliere datorită presiunii hidrostatice. Aceasta poate conduce la pierderea stabilității conductei pe anumite porțiuni.

Efectul temperaturii. Temperatura conductei este în general variabilă în timp. În perioada construcției conducta are temperatura mediului ambiant, iar în timpul exploatării temperatura apropiată de cea a fluidului transportat. Temperatura de proiectare este în general cea a corpului metalic al conductei în condiții de funcționare prevăzute. În domeniul temperaturii – 30°C 120°C în general nu se ia în calcul efectul temperaturii asupra tensiunilor considerate în calculul de proiectare pentru componentele de conducte fabricate din oțelurile pentru țevi și fittinguri prevăzute în STAS 8183 – 80.

Variațiile de temperatură au două efecte: modifică presiunea fluidului vehiculat și determină dilatări sau contracții ale conductei.

Astfel la proiectarea conductei trebuie să se țină seama de creșterea presiunii interioare datorită creșterii temperaturii în condiții statice.

Tensiunile axiale datorate gradientului de temperatură se determină luând în considerare forma conductei și interacțiunea ei cu mediul înconjurător. Ca urmare a creșterii temperaturii, în conducta cu dilatări împiedicate se dezvoltă tensiuni de compresiune σ_{compr} de care trebuie să se țină seamă atât la determinarea grosimii peretelui conductei, cât și la analiza stabilității longitudinale (flambajul) conductei.

$$\sigma_{compr} = F_t / A = \alpha \cdot E \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

în care α este coeficientul de dilatație liniară ($12,4 \times 10^{-6}$) A – aria secțiunii țevii.

Pentru micșorarea gradientului de temperatură care poate avea valori importante la conductele de gaze de diametru mare, se practică răcirea gazelor la ieșirea din stațiile de compresoare.

2.2.3 Determinarea grosimii peretelui conductei

Grosimea minimă de perete se determină pe baza tensiunii circumferențiale maxime cu relația (după STAS 10741- 80)

$$t = \frac{pD}{2\sigma_a} + a_1 + a_2 \quad (2.5)$$

în care t este grosimea peretelui conductei, în mm ; p – presiunea maximă de regim de exploatare în bar; D – diametrul exterior al conductei în mm ; σ_a – tensiunea admisibilă în N/mm² ; a₁ – adaos pentru coroziune și uzură în mm; a₂ – adaos pentru compensarea abaterii limită inferioare de la grosimea peretelui ($\cong 0,125 t$).

Adaosul pentru coroziune se referă la coroziunea exterioară și se ia în considerație numai pentru conductele care nu au prevăzute instalații de protecție catodică.

Tensiunea admisibilă folosită în calculul de dimensionare a conductelor are expresia (tot după STAS 10741-80)

$$\sigma_a = \varphi R_{p0,2} / c \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (2.6)$$

în care $R_{p0,2}$ este valoarea minimă a limitei de curgere în N/mm²
 φ - coeficientul de calitate al sudurii țevii (dat în [81] la p.401 Tabelul 6.2) ;
 c - coeficientul de siguranță adoptat în funcție de categoria de traseu stabilită pentru conductă. La conductele pentru transportul hidrocarburilor lichide $c = 1,8$ pentru traseu categoria 1 ; $c = 1,7$ pentru traseu categoria 2 și $c = 1,5$ pentru traseu categoria 3. La conductele pentru gaze, $c=2$ pentru clasa de locație I și $c = 1,67$ pentru clasa de locație II.

În concluzie, calculul de proiectare al unei conducte va cuprinde : a) determinarea diametrului interior pe baza calculului hidraulic ; b) alegerea materialului conform considerațiilor tehnico-economice ; c) calculul rezistenței admisibile; d) calculul grosimii de perete; e) determinarea tensiunilor din exploatare și a tensiunilor echivalente pentru comparare cu tensiunile admisibile, în special la coturi, curbe și în punctele de fixare ale conductelor.

2.2.4 Calculul de verificare

Prin acest calcul se determină tensiunile echivalente solicitărilor din exploatare și se compară cu tensiunea admisibilă.

În absența tensiunilor axiale, condiția de rezistență numai pentru tensiunile circumferențiale va fi

$$\sigma_t \leq \sigma_a \quad (2.7)$$

Condiția de rezistență pentru tensiunea axială datorită solicitării axiale produse de dilatația termică împiedicată și solicitării la presiune interioară, pe baza teoriei a III-a de rezistență se scrie sub forma

$$\sigma_{ax} = \alpha \cdot E \cdot \Delta t - \mu \sigma_t \leq \sigma_a \quad (2-8)$$

din care μ este coeficientul lui Poisson.

În cazul apariției și a tensiunilor de încovoiere, acestea se însumează cu tensiunea axială dată de relația (2-8) și condiția de rezistență se pune pentru suma acestor tensiuni.

Calculul de verificare, luând în considerație tensiunile circumferențiale datorate presiunii interioare și tensiunile axiale datorate ansamblului solicitărilor, impune determinarea tensiunii echivalente și scrierea condiției de rezistență sub forma

$$\sigma_{ech} = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_{ax}^2 - \sigma_t \cdot \sigma_{ax}} \leq \sigma_a \quad (2.9)$$

Calculul solicitărilor ia în considerație intensificarea locală a acestora la componentele cu formă neregulată (coturi, curbe, teuri, ș.a.) prin intermediul factorilor de intensificare a solicitării (vârfuri de tensiune). Tensiunea echivalentă solicitărilor axiale și tangențiale se determină cu relația $\sigma = \sqrt{\sigma_i^2 + 4\tau^2}$ (2 - 10) în

care $\sigma_i = \sqrt{(iM_i)^2 + (i_0M_0)^2} / W$ este tensiunea datorită încovoierii; unde :

M_1 – momentul încovoietor, în planul componentului având o orientare determinată (cot, teu)

M_0 – momentul încovoietor, în afara planului sau transversal în raport cu planul componentului.

i_i, i_0 -factori de concentrare a tensiunilor la încovoiere (numiți și factori de intensificare a tensiunilor) în planul componentului, respectiv în afara planului acestuia; $\tau = M_t/2W$ - tensiunea tangențială.

W – modulul de rezistență axial

Condiția de rezistență este satisfăcută dacă $\sigma \leq \sigma_a$


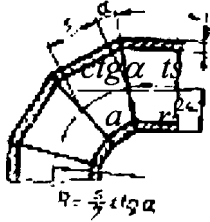
Factorii de intensificare a tensiunilor la coturi au expresiile date în [81] la pag. 449 ;

$i_1 = 0,9/h^{2/3}$ (2-29) ; $i_0 = 0,75/h^{2/3}$ (2-30) în care $h = tR/r^2$ este caracteristica flexibilității ;


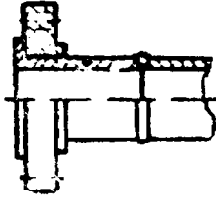
t – grosimea peretelui conductei ; R – raza de îndoire ; r – raza medie a secțiunii transversale a conductei.

În tabelul 6.26 de la pag. 450-51 din [81] sunt prezentați factorii de intensificare a tensiunilor și factorii de flexibilitate, pentru câteva elemente reprezentative :

Tabelul 2 – 4 Factorii de intensificare a tensiunilor și factorii de flexibilitate

Denumirea	Factorul de flexibilitate	Factorul de intensificare	Caracteristici ca flexibilității	Schița
Curbă realizată prin îndoire sau sudare	$\frac{1,65}{h}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	$\frac{tR}{r^2}$	
Curbă din segmente de conducte scurte sudate $s < r(1 + \operatorname{tg} \alpha)$	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$		

Curbă din segmente de țeavă lungi sudate	$\frac{1,52}{h^{5/6}}$	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	
$s \geq r(1 + \text{tg } \alpha)$			
Teu	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	
Teu consolidat cu inel plat sau inel de tip șa	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	
Teu în construcție sudată	1	$\frac{0,9}{h^{2/3}}$	
Îmbinare sudată cap la cap, flanșă cu gât sudată, reducție	1	1,0	
Flanșă sudată pe țeavă cu două suduri	1	1,2	

Îmbinare prin suprapunere cu o sudură de colț	1	1,6	-	
Flanșă pe țevă răsfrântă (flanșă liberă)	1	1,6	-	
Îmbinare de conductă prin înfiletare sau cu flanșă înfiletată	1	2,3	-	
Compensator lenticular sau curbă cu gușă	5	2,5	-	

În afara calculelor de verificare menționate, la proiectarea unei conducte se face și analiza flexibilității. Aceasta reprezintă capacitatea acesteia de a prelua prin deformare elastică deplasările proprii și ale echipamentului la care este legată astfel încât să se evite dezvoltarea unor tensiuni în materialul conductei ce depășesc valoarea admisibilă, deformarea excesivă sau dezvoltarea unor forțe și momente excesive în îmbinări. Flexibilitatea unei conducte rezultă din însumarea flexibilității elementelor componente și este asigurată prin utilizarea compensatoarelor de dilatare, curbelor, pretensionărilor la montaj etc.

Observație: Proiectarea conductelor submarine impune luarea în considerație a unor solicitări suplimentare specifice datorat condițiilor de mediu, acțiunii valurilor, turbioanelor și curenților marini. Proiectarea cuprinde acordarea unei atenții sporite următoarelor condiții de rezistență și stabilitate: curgerea materialului, pierderea stabilității, ruperea la oboseală, stabilitatea pe fundul mării și deteriorarea acoperirii pentru testare.

2.2.5 Încercarea la presiune interioară a conductelor

Înainte de intrarea în exploatare, conductele se încearcă la presiune interioară pentru verificarea rezistenței și etanșeității, precum și al evidențierii unor eventuale defecte ce nu au putut fi observate la verificările anterioare. Conductele se supun încercărilor la presiunile interioare prevăzute de norme sau standarde (STAS 10741 – 80) care prevăd:

- a. - încercarea preliminară a etanșeității care se efectuează pneumatic la 5 bar, pe tronsoane, durata probei fiind de cel puțin o oră și cel mult 24 ore.
- b. - încercarea la rezistență pe tronsoane se execută hidraulic sau pneumatic. Valoarea presiunii de încercare este:
 - pe traseul de conducte de categoria 1, 1,4 x presiunea de lucru.

- pe traseul de conducte de categoria 2 și 3, 1,3 x presiunea de lucru.

Tensiunea dezvoltată la încercarea de rezistență trebuie să fie cu 10 % mai mică decât tensiunea rezultată la încercarea hidraulică în uzină. Tensiunea nu va depăși 90 % din limita de curgere a materialului. Durata încercării de rezistență este de o oră. La conductele submarine se practică încercarea la o presiune de 1,5 x presiunea de lucru tensiunea nedeășind 85% din limita de curgere a materialului.

c. - încercarea de rezistență pe întreaga conductă, cu toate armăturile montate, se efectuează la 1,3 x presiunea de lucru, o durată de 3 ore de la egalizarea presiunii. În cazul în care materialul este supus la solicitări în domeniul elasto-plastic, această încercare se poate elimina.

d. - încercarea la presiunea de lucru se efectuează pe o durată de 24 ore, reprezentând proba generală a întregii conducte cu armăturile montate.

Pe toată durata încercărilor la presiune nu se admit pierderi de presiune în conductă, fiind admise numai variațiile de presiune cauzate de variațiile de temperatură ale fluidului. În C.S.I. presiunea de probă se determină cu relația

$$p_p = \frac{2R_{p0,2}(t - a_2)}{D - 2t} \quad (2.10)$$

semnificația notațiilor fiind cea de la relația (2-5). În zonele cu climat rece (inclusiv în țara noastră) apar particularități privind efectuarea încercărilor la presiune.

Proba hidraulică cu apă se aplică numai conductelor îngropate, a căror temperatură este superioară temperaturii de înghețare a apei. În celelalte cazuri, încercarea se efectuează cu circulație de apă caldă, cu apă și antigel sau aer.

CAP. 3 NOȚIUNI DE MECANICA RUPERII

[16][28][48][64][76]

3.1 Tenacitatea la rupere a materialelor

Proprietatea materialelor metalice reale și proprietatea elementelor de rezistență, a componentelor, sistemelor și structurilor tehnice reale, adică structural imperfecte, care pot ceda la acțiuni mecanice, termice etc. și care tind să le accentueze starea dată de imperfecțiunile structurale de tip fisură se numește fracturare sau mai simplu mecanica ruperii.

Mecanica ruperii urmărește să fundamenteze teoretic și să confirme experimental metodele de evaluare cantitativă a disponibilității de capacitate portantă mecanică și deci, a intensificării nivelului de solicitare, aceasta în condițiile considerării atât a discontinuităților ca atare, cât și a modului specific de comportare sub sarcină a materialelor tehnice utilizate, în dependența de caracteristicile dimensionale proprii și de cele ale regimurilor de exploatare.

Formulându-și obiectivul principal în stabilirea unor corelații între tensiunile mecanice pe de o parte și factorii constructivi - geometrici pe de altă parte, Mecanica ruperii înlocuiește unele caracteristici mecanice ale proiectării tradiționale (rezistența de rupere, duritatea etc.) prin concepte și mărimi fizice noi, care definesc univoc caracteristici noi.

Una dintre caracteristicile pe baza cărora se apreciază comportarea mecanică a oțelurilor este tenacitatea. Nu există o definiție unică a tenacității. Una dintre cele mai bune se consideră: Tenacitatea este însușirea unui material de a suferi până la rupere sub acțiunea unui nivel de solicitare ridicat, deformări plastice mari. Se mai definește prin "acea proprietate a unui material de a se supune inițierii sau propagării (dezvoltării) fisurilor".

Elementele de rezistență constituie în majoritatea cazurilor componente ale unui ansamblu (mașină, instalație etc.)

Avarierea sau distrugerea unei singure componente conduce la compromiterea funcționării instalației întregi în funcție de prezența sau absența deformărilor plastice până la rupere, ruperea materialelor poate fi ductilă sau fragilă. Ruperea ductilă fiind precedată de deformații plastice mari, are o energie de rupere apreciabilă, pe când la ruperea fragilă această energie este mult mai mică.

Ruperea fragilă a elementelor de rezistență este deosebit de periculoasă, deoarece ea se produce în timp relativ scurt și pe lungimi mari și nu mai permite luarea unor măsuri de protecție eficiente.

Din acest motiv și altele, rezultă că este foarte important să se cunoască comportarea materialelor din care sunt realizate elementele de rezistență în toate sau în cât mai multe condiții de solicitare. Numai pe baza unor astfel de cunoștințe se pot lua decizii corespunzătoare cu privire la înlocuirea totală a elementului de rezistență supus observației sau eventual prelungirea duratei de funcționare a acestuia, sub o permanentă supraveghere a evoluției defectului existent.

Tenacitatea materialelor, nu este o caracteristică mecanică absolută, ea depinde de mai mulți factori: temperatură, viteza de solicitare, etc.

În ultimele decenii au fost întreprinse ample cercetări asupra elementelor de rezistență care prezintă diferite defecte, în special fisuri. Ca urmare în literatura de specialitate a apărut o nouă noțiune: tenacitatea la rupere. Aceasta la fel nu are o

definiție precisă. Cea mai potrivită se pare a fi: "acea proprietate a unui material de a se opune inițierii sau propagării (dezvoltării) fisurilor".

Tenacitatea la rupere este o caracteristică a fiecărui material și ea poate fi exprimată prin una din caracteristicile de tenacitate definite de Mecanica Ruperii. Aceste caracteristici se determină experimental după metode standardizate.

În literatura de specialitate se utilizează două noțiuni aparent asemănătoare dar cu domenii de aplicabilitate diferite și anume:

- tenacitatea materialelor apreciată în general pe baza ariei suprafeței de sub curba caracteristică la tracțiune: ea este specifică materialelor fără discontinuități fizice.

- tenacitatea la rupere a materialelor, dezvoltată pe baza conceptelor Mecanicii Ruperii și este specifică materialelor (elementelor de rezistență) care prezintă discontinuități fizice (goluri, fisuri, etc.)

3.2 Aprecierea comportării mecanice a oțelurilor

3.2.1 Aprecierea comportării mecanice a oțelurilor prin încercări bazate pe absența fisurilor

Aceste aprecieri se fac pe baza rezultatelor obținute în urma unor încercări experimentale în ideea absenței fisurilor. Prin caracteristicile mecanice determinate se evidențiază caracterul ductil sau fragil al ruperii respectiv tenacitatea materialelor.

Principalele caracteristici pe baza cărora se poate aprecia comportarea mecanică a oțelurilor sunt:

Forma diagramelor caracteristice la tracțiune

În Fig. 3-1 se prezintă câteva forme posibile ale diagramelor.

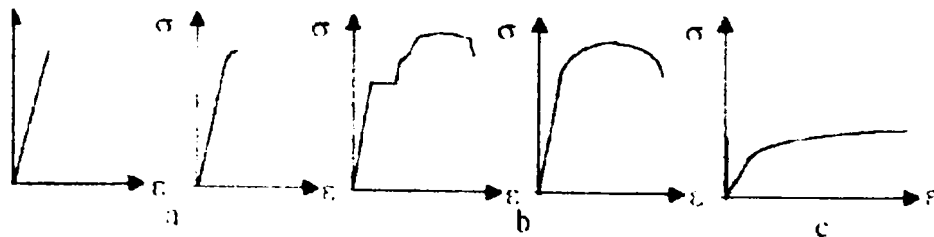


Fig. 3-1 Forma diagramelor caracteristice pentru materialele:

- a) fragile
- b) ductile
- c) maleabile

Caracteristici:

3.2-1 a Alungirea și gătuirea la rupere A_n și Z . Oțelurile ductile prezintă valori ridicate pentru alungirea și gătuirea la rupere, iar cele fragile prezintă valori scăzute

3.2-1 b Limita de curgere și rezistența la rupere, (σ_c sau $R_{p0.2}$) și (σ_r sau R). Aceste mărimi sunt caracteristici mecanice de bază. Dacă raportul σ_c / σ_r , sau $R_{p0.2} / R$ tinde spre unu, oțelul are tendința spre rupere fragilă.

3.2-1 c Aspectul suprafeței de rupere. La oțelurile ductile, maleabile, întreaga suprafață de separație este înclinată la aproximativ 45° față de direcția de solicitare, iar la oțelurile ductile tenace, suprafața de separație (rupere) prezintă un aspect mixt prin forfecare și prin separație transversală (clivaj) La materialele fragile suprafața de separație este normală la direcția de solicitare.

Încercările dinamice oferă, prin caracteristicile mecanice care se determină, posibilitatea unor aprecieri mai corecte asupra comportării ductile sau fragile în procesul de rupere al oțelurilor. Încercările dinamice se efectuează sau pe epruvete fără creștătură sau cu creștătură

3.2-1 d Încercarea la tracțiune dinamică. Principalele caracteristici mecanice care se determină prin această încercare sunt: limita de proporționalitate, limita de curgere și limita de rupere. La aceste încercări influența principală o are viteza de deformare sau viteza de solicitare.

Viteza de deformare $d\varepsilon/dt$ se definește ca fiind variația lungimii în unitatea de timp, raportată la lungimea inițială a epruvetei în domeniul elastic de solicitare, în locul vitezei de deformare se poate considera viteza de solicitare a tensiunii $d\sigma/dt$.

$$\frac{d\sigma}{dt} = E \frac{d\delta}{dt} \quad (3.1)$$

3.2-1e Rezistența, energia de rupere, cristalinitatea, fibrozitatea și contracția transversală specifică

Încercarea clasică de încovoiere prin șoc pe epruvete crestate (tip Charpy) este cea mai răspândită metodă de apreciere a tendinței de rupere a oțelurilor. Ea se utilizează pentru aprecierea tenacității oțelurilor STAS 7511-81 și STAS 6833-79.

În cazul utilizării epruvetelor cu creștătură, după ruperea acestora se determină cristalinitatea (C_r) fibrozitatea (F_r) precum și contracția transversală specifică (T)

Comportarea la rupere a oțelurilor se apreciază pe baza valorilor obținute pentru rezilientă, energia la rupere, cristalinitatea, fibrozitatea și contracția transversală specifică.

Oțelurile care prezintă o rezilientă sau energie la rupere scăzută sunt predispușe ruperilor fragile.

3.2.2 Aprecierea tenacității oțelurilor prin încercări în prezenta fisurilor

La controalele nedistructive periodice efectuate pe piese sau elemente de rezistență după o perioadă de funcționare adesea sunt detectate diferite defecte: goluri, fisuri, incluziuni, pori, etc. Din acest motiv, caracteristicile mecanice determinate prin măsurile enumerate la punctul 3.2 - 1 nu pot răspunde la întrebarea menținem sau nu în funcțiune a elementului de rezistență respectiv

În prezent rezolvarea se face pe baza cercetărilor efectuate pe baza conceptelor Mecanicii Ruperii.

Metodele Mecanicii Ruperii tratează fiabilitatea elementelor de rezistență pe baza analizei complexe privind mărimea și caracterul solicitărilor prezența defectelor și măsurile geometrice ale elementului de rezistență.

Caracteristicile de tenacitate stabilite pe baza conceptelor Mecanicii Ruperii, sunt caracteristici care au o bază teoretică bine fundamentată, motiv pentru care sunt astăzi utilizate pe scară largă pentru aprecierea tenacității oțelurilor.

Pentru ca în prezența unui defect fizic să nu se producă distrugerea (ruperea) unui element de rezistență, este necesar ca valoarea caracteristicii de tenacitate determinată analitic pentru acel defect să fie mai mică decât o valoare critica a caracteristicii de tenacitate, numită tenacitate la rupere.

Tenacitatea la rupere este o caracteristică mecanică care se determină experimental, în prezent sunt cunoscute mai multe caracteristici de tenacitate la rupere stabilite pe baza conceptelor Mecanicii Ruperii și toate sunt fundamentate teoretic.

Cele mai utilizate caracteristici critice de tenacitate la rupere care cuprind metodele experimentale de determinare a caracteristicilor critice de tenacitate la rupere sunt următoarele:

- a) factorul critic de intensitate al tenacității K_{Ic} ;
- b) deschiderea critică la vârful fisurii δ_c (COD, CTOD, CTOA, CMOD);
- c) integrala critică de contur J_c .

Mecanica Ruperii se bazează pe unele ipoteze specifice fenomenului ruperii ca de exemplu:

- ruperea materialului este inițiată în zona defectelor de continuitate, aceste defecte (discontinuități) pot preexista sau sunt generate prin mecanisme care au loc la nivelul structural primar;

- ruperea macroscopică este concepută ca o extindere a defectelor de continuitate, în esență a fisurilor, extinderea acestora se declanșează atunci când local în zona discontinuității se depășește o mărime critică care poate fi de natura unei energii interne specifice, tensiuni sau deformații.

Din punct de vedere al mecanicii ruperii, procesul ruperii materialelor tehnice este caracterizat de trei faze:

- inițierea fisurării; - propagarea (dezvoltarea) fisurii; - oprirea (inhibarea) propagării fisurii.

La materialele tenace se pot întâlni toate cele trei faze, pe când la cele fragile, inhibarea propagării fisurii nu este posibilă. La aceste materiale, în condițiile date, propagarea fisurii odată începută nu mai poate fi oprită, și continuă până la ruperea (separarea) finală.

Cunoașterea condițiilor în care o fisură existentă începe să-și mărească dimensiunea, adică începe să se propage este foarte importantă. Propagarea fisurii poate avea loc încet sub o supraveghere atentă, sau poate avea loc brusc, în timp foarte scurt, pe lungimi mari. Acest ultim mod de propagare este foarte periculos pentru elementele de rezistență. Se spune în acest caz că fisura s-a propagat instabil. Atingerea condițiilor pentru care o fisură se poate propaga instabil nu trebuie să aibă loc. Nu trebuie ajuns nici la condițiile care să permită inițierea propagării fisurii. Din acest motiv caracteristicile de tenacitate care interesează sunt cele care urmăresc determinarea acelor condiții care permit evidențierea inițierii propagării fisurilor.

În consecință încercările de mecanica ruperii se împart în:

- încercări pentru evidențierea caracteristicilor la inițierea extinderii fisurii;
- încercări pentru evidențiere capacității de inhibare a propagării fisurii.

Încercările de mecanica ruperii se pot efectua în condiții statice sau dinamice, pe epruvete mici, mari sau în mărime naturală.

3.3 Starea de tensiune și deformație în vecinătatea frontului fisurii în domeniul elastic

Fisura este o discontinuitate plată, limitată, care constă din două suprafețe opuse (flancurile fisurii) care se intersectează și formează frontul fisurii.

Intersecția acestuia cu un plan normal, definește vârful fisurii. Sub acțiunea forțelor exterioare, flancurile fisurii au o deplasare relativă. Vectorul care definește separarea este denumit deplasarea fisurii.

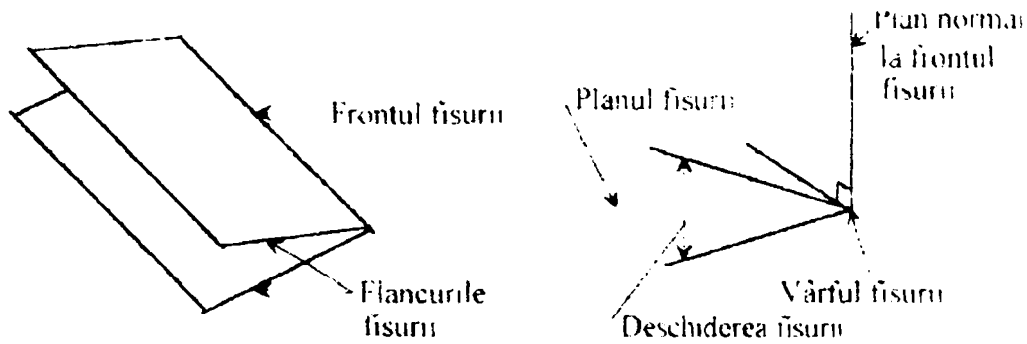
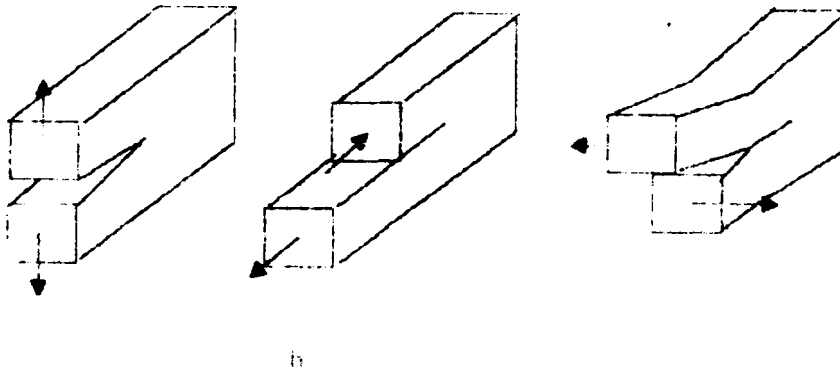


Fig.3-2 Elementele unei fisuri

Orientarea vectorului deplasare a fisurii față de planul fisurii, determină trei moduri fundamentale de rupere (separație)



(Fig.3-3), moduri fundamentale de rupere: a – Modul I, b – Modul II, c – Modul III

Modul I: vectorul deplasare este normal pe planul fisurii și are ca efect deschiderea fisurii. Este modul cel mai des întâlnit și constituie modul de referință în Mecanica Ruperii.

Modul II: vectorul deplasare este cuprins în planul fisurii, normal pe pe frontul fisurii și produce o alunecare plană.

Modul III: vectorul deplasare este cuprins în planul fisurii și paralel cu frontul acesteia; produce o alunecare antiplană.

Toate alte cazuri posibile de rupere, pot fi descrise prin combinarea celor trei moduri prezentate anterior, motiv pentru care se numesc moduri fundamentale de rupere.

Diversitatea aspectelor fenomenologice ale proceselor de rupere este mare ceea ce face destul de dificilă o clasificare a proceselor de rupere.

Deplasarea sau deschiderea la vârful fisurii (Fig.3-4) care reprezintă distanța dintre flancurile unei fisurii. În literatura de specialitate sunt cunoscute mai multe tipuri de "deschideri" ale fisurii (în paranteză se prezintă și notațiile anglo saxone a acestora).

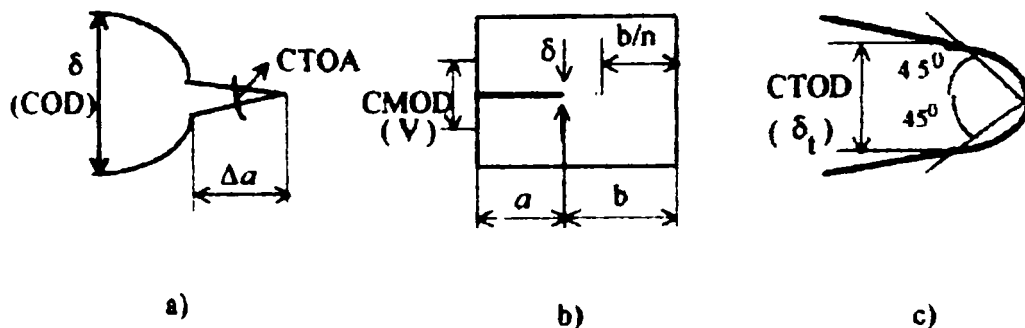


Fig. 3-4 Semnificația deschiderilor fisurii

- deplasarea la deschiderea fisurii δ (COD) (Fig.3 - 4 a,b)
- deschiderea la vârful fisurii δ_t (CTOD) (Fig.3 - 4 c) și reprezintă deschiderea la o distanță de la vârful fisurii stabilite prin convenție.
- deschiderea unghiulară la vârful fisurii (CTOA) (Fig 3 - 4 a)
- deschiderea la "buză" (terminarea) fisurii (CMOD) (Fig.3 - 4 b)

Extinderea sau propagarea fisurii reprezintă creșterea dimensiunii fisurii sub acțiunea solicitărilor. Ea poate fi centrală sau de margine.

Fisurile care traversează întreaga grosime a elementului de rezistență sunt fisuri străpunse, iar cele care nu au traversat grosimea sunt fisuri de suprafață.

Noțiuni despre starea de tensiune și deformație în vecinătatea frontului fisurii în domeniul elastic Acestea sunt prezentate detaliat în manualele de Mecanica Ruperii [28] [64] [76].

Se consideră un element paralelipipedic infinit mic situat în vecinătatea frontului unei fisuri, element aflat într-o stare de deformație. Tensiunile pe fețele acestui element sunt cele notate în Fig. 3-5

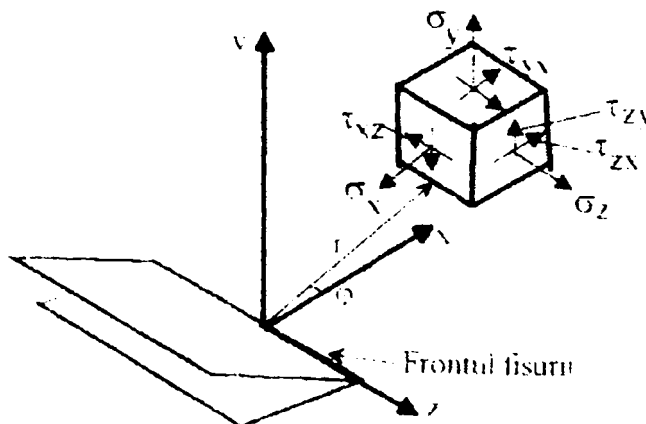


Fig. 3-5 Starea de tensiune în vecinătatea frontului (vârfului) fisurii.

După Modul I de rupere tensiunile și deplasările în vecinătatea frontului fisurii sunt date de următoarele relații:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3\varphi}{2} \right)$$

$$\sigma_z = 0 \quad (3.2)$$

$$\sigma_z = \mu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{pentru starea plană de deformare}$$

$$\tau_{xz} = \tau_{yz} = 0 \quad \tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\varphi}{2} \cos \frac{3\varphi}{2}$$

$$\mu = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\varphi}{2} \left(k - 1 + 2 \sin 2 \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$v = \frac{K_I}{2G} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\varphi}{2} (k + 1)$$

$$w = 0$$

unde K_I este factorul de intensitate al tensiunii după modul I fundamental de rupere

u, v, w - deplasările în direcția axei x, y și z

μ - coeficientul lui Poisson, pentru materialul piesei

$k = (3 - \mu) / (1 + \mu)$ pentru starea plană de tensiune

Pentru modurile fundamentale II și III relațiile tensiunilor și deplasărilor diferă de cele ale modului I. Ele sunt date [76] la pag. 30 și 31

La materialele ductile, în procesul de inițiere și propagare a fisurii, în vecinătatea frontului acesteia se formează o zonă deformată plastic, numită enclavă plastică. Aceasta are un efect de frânare a inițierii propagării fisurii. La materialele cu comportare elastică până la rupere, considerate fragile enclava plastică de la vârful fisurii lipsește sau are o dimensiune foarte mică.

3.4 Caracteristici de apreciere a tenacității și tenacității la rupere

O primă prezentare a caracteristicilor de apreciere a tenacității la rupere a fost făcută în paragraful 3.2.2. În funcție de starea de solicitare și comportarea materialului elementului de rezistență se utilizează una sau alta dintre caracteristicile de tenacitate cunoscute.

În Fig. 3-6 se prezintă domeniile de utilizare a principalelor caracteristici de tenacitate

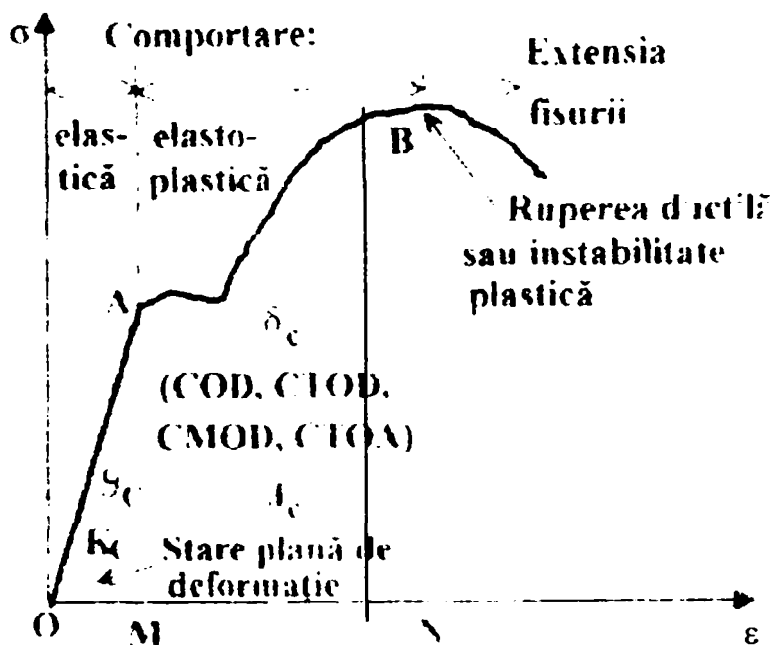


Fig. 3-6. Domeniile de valabilitate ale caracteristicilor de tenacitate

Dacă starea de solicitare se află sub limita de elasticitate (domeniul OAM al diagramei) tenacitatea de rupere se poate exprima cu ajutorul factorului critic de intensitate al tensiunii K_c , forța critică de extensie a fisurii G_c și integrala critică de contur J_c , în domeniul MABN, tenacitatea la rupere se exprimă prin una din valorile critice ale deschiderilor și deplasărilor la vârful fisurii δ_n (COD, CTOD, CMOD, CTOA) sau prin integrala critică de contur J_c . În domeniul MABN, când se produc deformații plastice semnificative factorul critic de intensitate al tensiunii K_c nu mai are semnificație, deci el nu mai poate fi aplicat.

3.4.1 Factorul de intensitate al tensiunii K și tenacitatea la rupere K_c

Acesta poate fi considerat ca o măsură a creșterii tensiunii în prezența unei fisuri, în raport cu tensiunea existentă în aceeași piesă în absența fisurii:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \cdot f(g) \quad (3.3)$$

unde : σ - tensiunea aplicată, l - semilungimea fisurii, $f(g)$ - o funcție care depinde de forma și mărimea piesei, de forma și dimensiunile fisurii etc

La simbolul K al factorului de intensitate al tensiunii, se adaugă ca indice simbolul modului fundamental de rupere după caz: K_I , K_{II} , K_{III} .

Datorită modului de solicitare (Fig.3-7) în majoritatea cazurilor, deschiderea fisurilor are loc după Modul I, motiv pentru care se va insista mai mult asupra lui K_I .

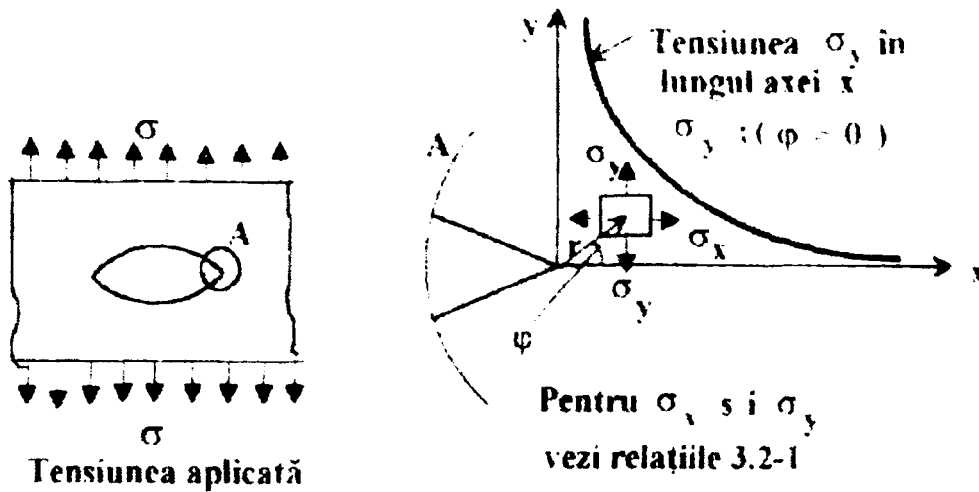


Fig.3-7 Deschiderea fisurii după Modul I și repartiția tensiunilor

Pentru Modul I de rupere tensiunea σ , care deschide fisura, are valoarea maximă pentru unghiul $\varphi=0$

Din relațiile 3-2, pentru $\varphi=0$ rezultă:

$$\sigma = \frac{K_1}{\sqrt{2\pi r}} \quad (3.4)$$

unde,

$$K_1 = \sigma_y \sqrt{2\pi r} \quad (3.5)$$

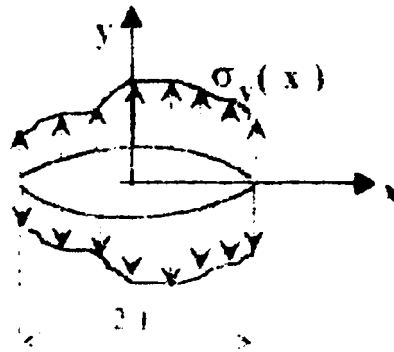


Fig. 3-8 Fisură sollicitată

Dacă se consideră o fisură de lungime $2l$ supusă unei stări de tensiune caracterizată de tensiunea normală $\sigma_v(x)$ pentru $\varphi=0$ (Fig.3-8) care deschide fisura după Modul I de rupere, factorul de intensitate al tensiunii K_1 , poate fi exprimat și prin relația :

$$K_I = \lim_{x \rightarrow l} \sqrt{2(x-1)\sigma_y(x)} = \frac{2\sqrt{l}}{\pi} \int_0^l \frac{\sigma(x)}{\sqrt{l^2 - x^2}} dx \quad (3.6)$$

Starea critică definită de extinderea fisurii este dată de factorul critic de intensitate al tensiunii K_{Ic} , numit și tenacitate la rupere. La noi în țară determinarea tenacității la rupere după Modul I, K_{Ic} , respectiv în condițiile stării plane de deformare este standardizată (STAS 9760-84).

După acest standard încercările se fac pe epruvete sollicitate la tracțiune (Fig. 3-9) sau la încovoiere (Fig. 3-10)

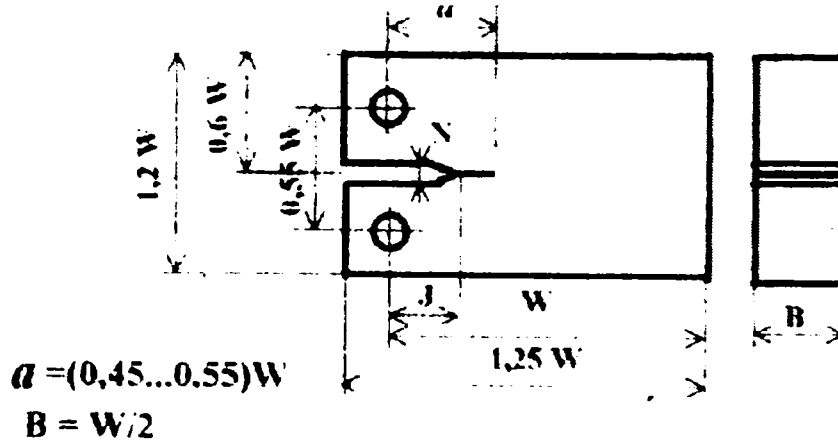


Fig. 3-9 Epruvetă compact de tracțiune

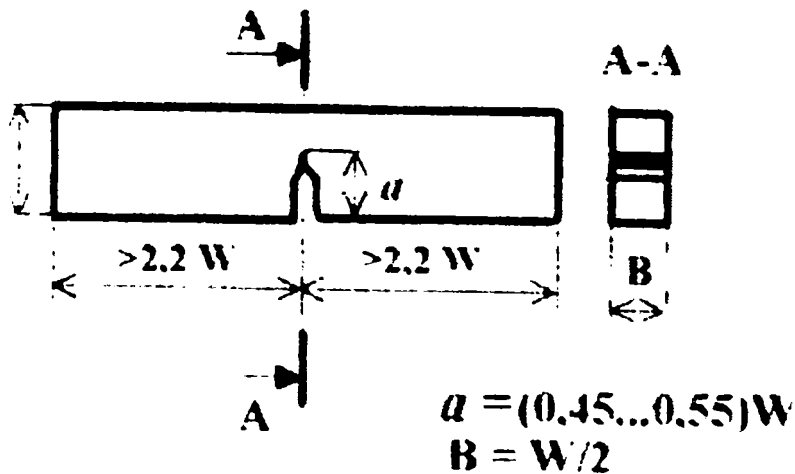


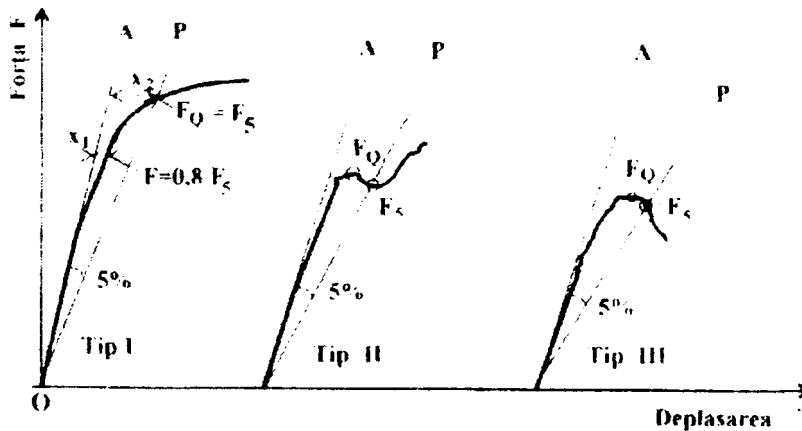
Fig. 3-10 Epruvetă compact de încovoiere

Dimensiunile reale standardizate pentru cele două tipuri de epruvete sunt prezentate în Tabelul 3-1, după STAS 9760-84

Tabelul 3-1 Dimensiuni pentru epruvete compact

Tipul Epruvetei	B [mm]	W [mm]	A [mm]	N [mm]	J [mm]
10	10	20	11	1.3	9
25	25	50	27.5	3.1	22.5
50	50	100	55	6.3	45
75	75	150	82.5	9.4	67.5
100	100	200	110	12.5	90

Conform standardului tenacitatea la rupere reprezintă valoarea factorului de intensitate al tensiunii K_I sarcinii la care are loc extensia fisurii. Stabilirea momentului inițierii ruperii sau propagării instabile a fisurii, se face convențional și acest moment trebuie să se găsească în intervalul corespunzător unei devieri de la liniaritate de 5% a curbei forță - deplasarea de deschidere a fisurii (F- Δ) (Fig.3-11).

Fig.3-11 Forme posibile ale diagramei F- Δ

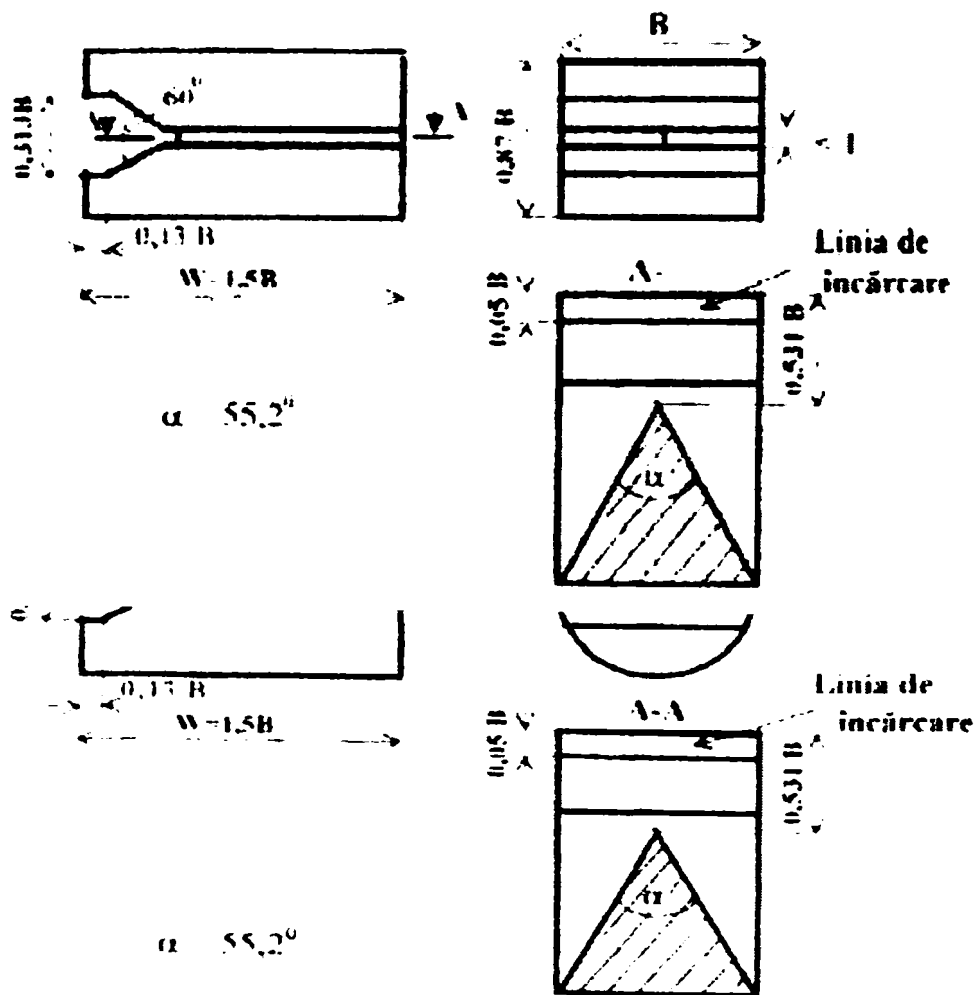
Această deschidere corespunde unei creșteri a lungimii fisurii cu 2 %. În principal se disting trei tipuri posibile de curbe F- Δ , (Fig. 3-11). Aceste forme ale diagramelor apar în cazul utilizării unor epruvete de grosime corespunzătoare și oțelul are o comportare ideală (este omogen și izotrop). Datorită enclavei plastice de la vârful fisurii, care deși suficient de mică există totuși la materialele reale, extinderea reală a fisurii este mai mică de 2%, extindere pentru care a fost trasată secanta OP. În acest caz, experimentul s-a dovedit că viteza de extindere a fisurii este mare comparativ cu viteza de extindere a enclavei plastice de la vârful fisurii. În acest caz se întrunesc condițiile pentru o valoare validă a lui K_{Ic} . Practic această condiție se verifică prin trasarea unor linii orizontale pe curba F- Δ la nivelul valorii F_5 și apoi la nivelul $0,8 F_5$, unde se măsoară pe cele două orizontale distanțele X_2 , respectiv X_1 . Tot experimental s-a constatat că dacă se îndeplinește condiția $X_1 < 0,25 X_2$, atunci sunt îndeplinite condițiile de validare pentru K_{Ic} .

În cazul nevalidării condițiilor impuse, pentru determinarea tenacității la rupere trebuie utilizate epruvete de dimensiuni mai mari. Nu pentru toate elementele de rezistență această condiție poate fi satisfăcută. De exemplu unele conducte de abur

din centralele termoelectrice, atunci când nu s-au îndeplinit condițiile de validare grosimea peretelui conductei nu a permis realizarea unor epruvete mai mari, de dimensiunile celor prevăzute în standard. [76]

3.4.2 Determinarea tenacității la rupere pe epruvete tip Chevron

Influența dimensiunii epruvetei asupra tenacității la rupere K_{IC} poate fi eliminată dacă se utilizează epruvete de tip Chevron dreptunghiulare (Fig. 3-12) sau circulare (Fig. 3-13)



(Fig.3-13) Epruvete tip Chevron circulare

Tenacitatea la rupere utilizând epruvete tip Chevron se notează K_v și se poate determina cu relația:

$$K_v = \frac{AF_{\max}}{B^{3/2}} \quad (3.7)$$

unde: A - este un coeficient cuprins între 19 - 22 Normele americane consideră A-22 la un unghi $\alpha = 55^\circ$, iar cele rusești A=19 pentru $\alpha = 57^\circ$; F_{max} - forța maximă înregistrată în timpul încercării. B - grosimea epruvetei

Cercetările experimentale au condus la concluzia că K_V nu este egal cu K_{Ic} , diferența dintre ele fiind foarte mică Pentru echivalarea tenacității la rupere K_V cu K_{Ic} , se poate utiliza pentru oțeluri diagrama de echivalență în Fig. 3-14

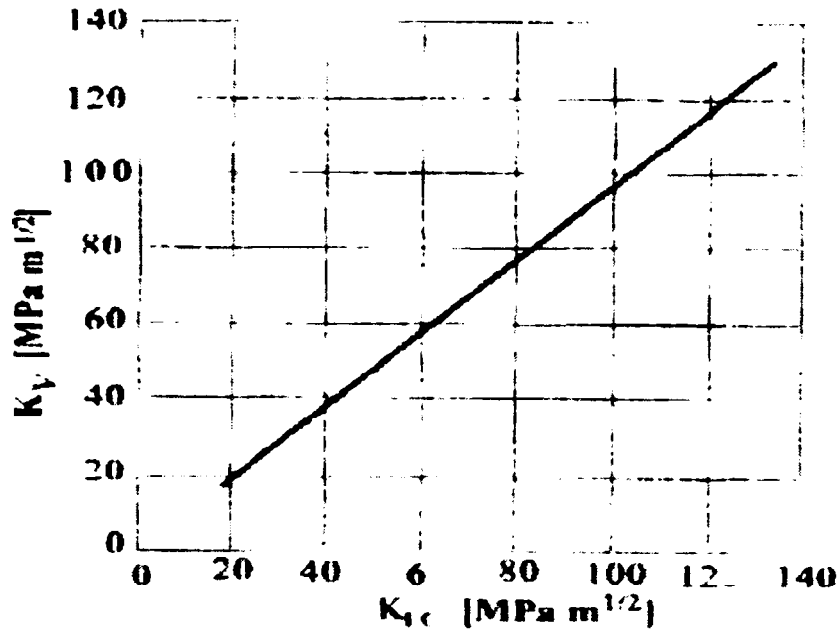


Fig. 3-14 Diagrama de echivalență $K_{Ic} - K_V$

Condiția ca o fisură existentă într-un element de rezistență să nu se propage instabil este:

$$K_I < K_{Ic}$$

Oțelurile cu tendință spre rupere fragilă, prezintă valori scăzute pentru tenacitatea la rupere K_{Ic}

Cu toate neajunsurile sale factorul critic de intensitate al tensiunii K_{Ic} , se consideră caracteristica de bază pentru aprecierea tenacității la rupere a oțelurilor.

În cazul oțelurilor ductile, la vârful fisurii se formează o enclavă plastică a cărei formă se consideră de cele mai multe ori ca fiind circulară.

În cazul considerării formei circulare a enclavei plastice de la vârful fisurii, mărimea razei acestei enclave plastice r_p , se determină prin intermediul factorului de intensitate al tensiunii cu ajutorul relației:

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_c} \right)^2 \quad (3.8)$$

3.4.2 Determinarea tenacității la rupere pe baza energiei echivalente

Metoda energiei echivalente este recomandată atunci când rezultatele obținute pentru determinarea lui K_{IC} , nu sunt valide.

Determinarea tenacității la rupere KEE după această metodă este reglementată de către normele americane. Epruvetele utilizate sunt identice cu cele de la metoda KIC, iar încercarea prevede trasarea aceleiași curbe F- Δ (forță - deplasare de deschidere) până la valoarea maximă a încărcării.

Caracteristica KEE este tenacitatea la rupere determinată cu ajutorul așa numitei echivalențe, obținută din diagrama F- Δ . Diagrama F- Δ înregistrată în timpul încercării, poate avea în general, una din formele prezentate în Fig. 3-15

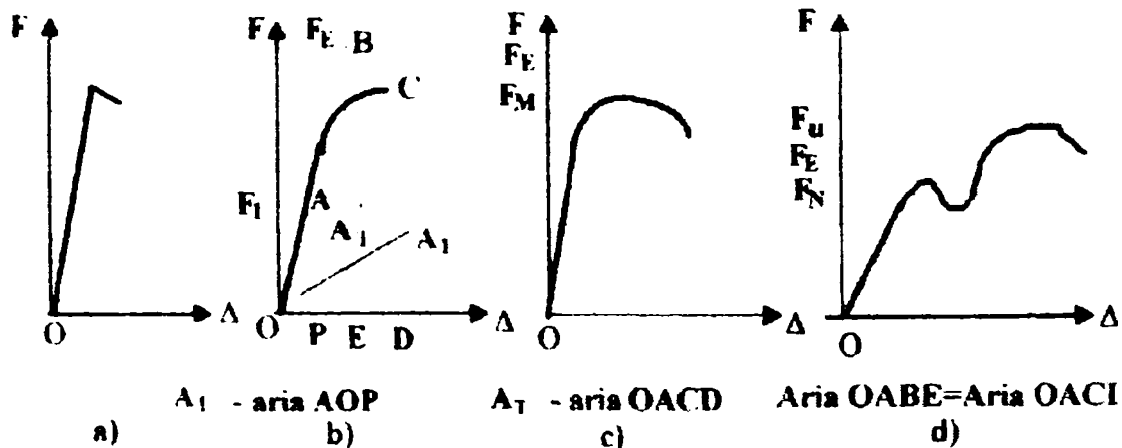


Fig. 3-15 Forme ale diagramelor F- Δ pentru determinarea energiei echivalente

Caracteristica K_{EE} determinată pe baza energiei echivalente, se calculează cu ajutorul forței F_E , care reprezintă valoarea forței obținută prin extinderea porțiunii liniare a curbei F- Δ până când aria de sub porțiunea limită este egală cu aria corespunzătoare încărcării maxime (Fig. 3-15). În cazul diagramelor de forma celor din Fig. 3-15 b,c, o forță oarecare F_E se determină astfel: se alege o forță oarecare F_1 pe porțiunea liniară a înregistrării F- Δ . Se măsoară apoi aria corespunzătoare încărcării A_T și pe baza asemănării triunghiurilor formate se determină forța F_E cu relația:

$$F_E = F_1 \sqrt{\frac{A_T}{A_1}} \quad (3.9)$$

În cazul materialelor cu ecrusare (Fig. 3-15 d) aria echivalentă se determină pentru punctul corespunzător primei apariții a curgerii (F_N), iar procedeul de determinare a forței de calcul, este identic cu cel prezentat anterior.

Tenacitatea la rupere K_{EE} se determină atunci cu ajutorul forței de calcul F_E cu următoarele relații:

- pentru epruvete de tracțiune:

$$K_{EE} = \frac{F_E}{B\sqrt{W}} f_1(a/W) \quad [Nmm^{3/2}] \quad (3.10a)$$

unde:

F_E - forța de calcul, în [N],

a - lungimea creștăturii epruvetei, împreună cu fisura de oboseală în [mm],

B - grosimea epruvetei, în [mm],

W - lățimea epruvetei în [mm],

$F_1(a/W)$ - o funcție care ține seama de mărimea fisurii, având

expresia : 3.3.2-3 din lucrare [76], la p. 46

- pentru epruvete de încovoiere:

$$K_{EE} = F_E \frac{S}{BM^{3/2}} f_2(a/W) \quad (3.10 \text{ b})$$

unde:

S - deschiderea între punctele de rezemare ale epruvetei în [mm],

$F_2(a/W)$ - tot o funcție ca și $F_1(a/W)$ având expresia 3.3.2-5 din lucrarea [76],

la p.46

3.4.3 Deplasarea și deschiderea la vârful fisurii

Când la vârful fisurii se formează o enclavă plastică criteriul de rupere bazat pe factorul critic de intensitate al tensiunii Kic, nu mai poate fi utilizat. În acest caz caracteristica de tenacitate la rupere, este deplasarea sau deschiderea la vârful fisurii. Legea de distribuție a tensiunilor și deformațiilor în enclava plastică nu este cunoscută, motiv pentru care între deplasarea și deschiderea la vârful fisurii și nivelul solicitărilor exterioare, nu se poate stabili o relație corespunzătoare. Din această cauză se recurge la relații empirice care de cele mai multe ori nu se verifică experimental pe elemente cu configurații geometrice diferite de cele pentru care s-au stabilit.

Deplasarea la vârful unei fisuri de lungime $2l$ și tensiunea aplicată σ , pentru o placă poate fi determinată cu relația:

$$\delta = 8 \frac{\sigma_c}{\pi E} l \cdot \ln \sec \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \right) \quad (3.11)$$

Dezvoltând în serie această relație și luând în considerare numai primul termen se obține:

$$\delta = \frac{\pi}{E} \cdot \frac{\sigma^2}{\sigma_c} \cdot l \quad (3.12)$$

Raza zonei plastice de la vârful fisurii r_p , care se consideră de formă circulară este:

$$\frac{r_p}{E} = \frac{E}{2\pi} \cdot \frac{\delta}{l\sigma_c} \quad (3.13)$$

Pentru o conductă fisurată, valoarea deplasării la vârful fisurii este dată de relația:

$$\delta = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{l\sigma_c}{E} \left[\ln \sec \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_c} \right) \right] \left(1 + 1,6 \frac{l^2}{Rh} \right) \quad (3.14)$$

Dacă fisura este longitudinală, în relația (3.14) tensiunea σ se înlocuiește cu tensiunea normală circumferențială σ_1 tensiune care deschide fisura longitudinală după Modelul I de rupere.

Deplasarea la vârful fisurii δ , este cea mai utilizată caracteristică de tenacitate pentru materialele ductile.

Pentru ca în prezența unei fisuri, să nu se producă ruperea, este necesar ca valoarea deplasării la vârful fisurii δ să fie mai mică decât valoarea acestei caracteristici pentru care se produce propagarea instabilă a fisurii, caracteristică proprie materialului și numită deplasare critică la vârful fisurii, δ_c .

Determinarea experimentală a deplasării critice la vârful fisurii se face conform STAS 10052-82. Încercările metalelor. Determinarea tenacității la rupere după metoda δ_c . Deplasarea critică la vârful fisurii se poate determina și prin metode indirecte.

3.4.4 Integrala de contur

Caracteristicile de tenacitate K_c și δ_c au domenii distincte de aplicare: K_c pentru materialele la care este dominantă starea de tensiune elastică până la rupere, iar δ_c pentru materialele la care ruperea este precedată de formarea unei enclave plastice la vârful fisurii. În practică, separarea celor două domenii de aplicare este destul de dificilă. Aceasta a impus găsirea unor caracteristici de apreciere a tenacității la rupere care să poată cuprinde toate circumstanțele în care este posibilă extinderea fisurii. Una dintre aceste caracteristici este integrala de contur J.

Integrala de contur J sau pe scurt integrala J, este definită ca integrala energiei de deformare în vecinătatea fisurii. Ea este aplicată oricăror corpuri omogene cu comportare liniară sau neliniară până la rupere.

Pentru a defini integrala J, se consideră un corp plan, omogen și izotrop cu o caracteristică la tracțiune liniară sau neliniară solicitată de un sistem de sarcini exterioare care produce tensiunile σ_x , σ_y , σ_z . Dacă acest corp are o fisură orientată în direcția axei x, a sistemului din Fig. 3-16, atunci se definește integrala de contur J pentru un contur închis situat în interiorul corpului, având traseul abc'b'a'Ca care include contururile C' și C și două porțiuni ab și b'a' din flancurile fisurii, definită de mărimea:

$$J = \oint \left(U dy - \bar{p} \frac{\partial \bar{D}}{\partial x} ds \right) \quad (3.15)$$

unde U - energia specifică de deformare care are expresia :

$$U = \int (\sigma_x dx + \sigma_y d\epsilon_y + \tau_{xy} d\gamma_{xy}) \quad (3.16)$$

$\bar{p} = p_{nx} \bar{i} + p_{ny} \bar{j}$ vectorul tensiune totală, raportat la normala într-un punct de pe conturul C.

$\bar{D} = u \bar{i} + v \bar{j}$ vectorul deplasare raportat la normală, într-un punct de pe conturul C.

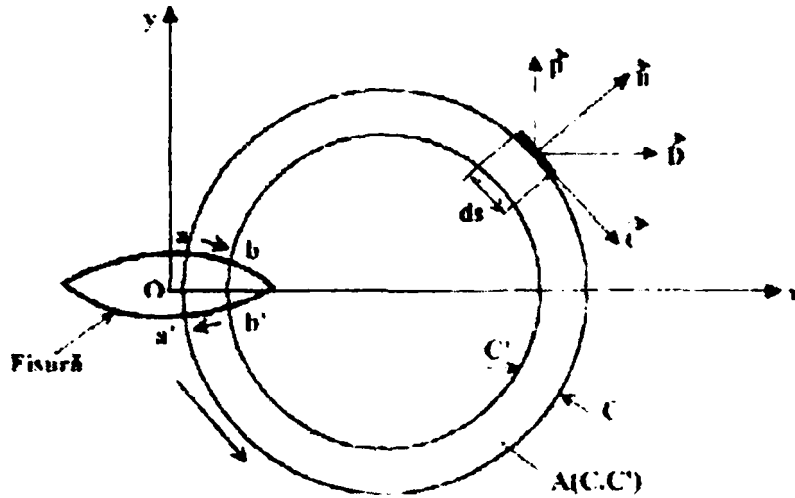


Fig. 3-16 Domeniul de definiere al integralei de contur J

În coordonate carteziene

$$U = \int_0^{\epsilon_x} \sigma_x d\epsilon'_x + \int_0^{\epsilon_y} \sigma_y d\epsilon'_y + \int_0^{\gamma_{xy}} \tau_{xy} d\gamma'_{xy} \quad (3.17)$$

iar pentru materialele cu comportare elastică până la rupere:

$$U = \frac{1}{2} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - 2\mu\sigma_x\sigma_y + 2(1+\mu)\sigma_x^2] \quad (3.18)$$

În acest caz integrala de contur J este

$$J = \int \left(U - \sigma_x \frac{\partial u}{\partial x} - \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial x} \right) dy + \left(\tau_{xy} \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_y \frac{\partial v}{\partial x} \right) dx \quad (3.19)$$

Având o fisură de dimensiune a , care sub acțiunea încărcărilor exterioare se extinde pe distanța Δa (Fig.3 - 17), integrala de contur J este egală cu rata de descreștere a energiei de deformație eliberată pe unitatea de grosime a corpului.

$$J = \lim_{\Delta a \rightarrow 0} \frac{U_e(a + \Delta a) - U_e a}{\Delta a} = \frac{\partial U_e}{\partial a} \quad (3.20)$$

unde U_e - energia de deformație eliberată pe unitatea de grosime de corp, prin extensia fisurii cu Δa

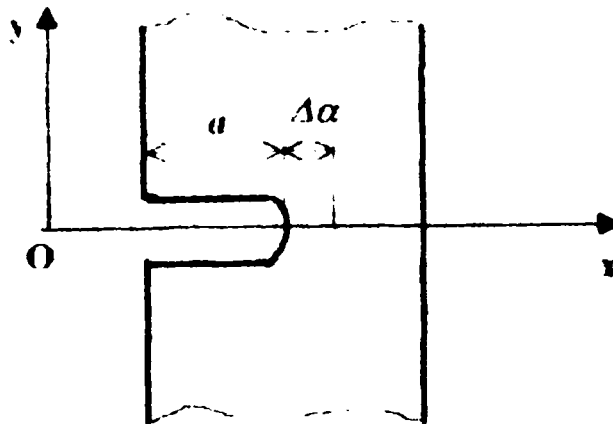


Fig. 3-17 Extensia fisurii

Integrala J , are proprietatea că este independentă de conturul de integrare. În cazul deformațiilor plastice mari, valoarea integralei de contur J , poate fi calculată cu aproximație, cu relația

$$J = A(n)K_{\sigma}^{2(n+1)} \quad (3.21)$$

unde:

$K_{\sigma} = c(n)K_{eI}^{2(n+1)}$; $A(n)$, $c(n)$ constante dependente de exponentul de ecrusare al diagramei caracteristice, K_{σ} - factorul de intensitate al tensiunii, corespunzător domeniului plastic.

K_{eI} - factorul de intensitate al tensiunii, corespunzător domeniului elastic.

Pentru ca propagarea instabilă a fisurii să aibă loc este necesar ca valoarea integralei J să fie mai mică decât valoarea unei caracteristici critice, numită integrala critică de contur J_c , proprie materialului:

$$J < J_c \quad (3.22)$$

Integrala critică de contur J_c , reprezintă tenacitatea la rupere a materialului și ea se determină pe cale experimentală. Pentru determinarea tenacității la rupere J_c , se utilizează același tip de epruvete ca pentru determinarea tenacității la rupere K_{IC} .

Metodologia determinării integralei critice de contur J_c este destul de complicată, iar pentru validarea valorilor obținute, se impune îndeplinirea anumitor condiții. Din acest motiv în practica experimentală de multe ori integrală critică de contur J_c , se determină pe baza valorilor lui K_{IC} , cu ajutorul relațiilor care există între cele două caracteristici de tenacitate.

Integrala de contur J_c definește și ea comportarea față de propagarea instabilă a fisurii a unui material. Materialele cu tendință spre rupere fragilă, prezintă valori scăzute pentru integrală critică de contur J_c iar materialele tenace valori ridicate.

3.4.5 Forța critică de extensie a fisurii

Pe baza efectuării bilanțului energetic în timpul procesului de rupere a unui material cu comportare elastică, Griffith a introdus un parametru energetic, numit forță de extensie a fisurii și notat cu ζ , și care reprezintă raportul dintre variația energiei elastice de deformație și creșterea ariei fisurii sau altfel, energia eliberată pe unitatea de suprafață de rupere:

$$\zeta = \left(\frac{\partial U_e}{\partial A} \right) = \frac{\pi \sigma^2 l}{E} \quad (3.23)$$

unde: U_e - energia elastică eliberată până la rupere:

A - aria fisurii;

I - semilungimea fisurii

σ - tensiunea normală aplicată

E - modulul de elasticitate longitudinal al materialului

Pentru un material dat, în aceleași condiții de temperatură, mediu, valoarea forței de extensie a fisurii în momentul producerii ruperii instabile, este o constantă notată cu ζ_{c1} și numită forță critică de extensie a fisurii și care constituie tenacitatea la rupere a materialului respectiv.

Pentru ca ruperea instabilă să nu se producă trebuie satisfăcută condiția

$$\zeta < \zeta_{c1} \quad (3.24)$$

Forța critică de extensie a fisurii, se poate utiliza numai în cazul materialelor cu o comportare elastică până la rupere, materiale la care în vârful fisurii nu apar enclave plastice. Determinarea experimentală a lui ζ este dificilă. De cele mai multe ori ea se determină cu ajutorul factorului critic de intensitate al tensiunii K_{IC} pe baza relațiilor care există între cele două caracteristici de tenacitate.

3.4.6 Corelații între caracteristicile de apreciere a tenacității la rupere ale materialelor

Tenacitatea la rupere a materialelor, exprimată prin diferite caracteristici de tenacitate, se obține în urma unor încercări experimentale. Unele din aceste încercări sunt destul de dificil de efectuat sau necesită o aparatură destul de performantă, lucru de care de multe ori nu se dispune, iar alte încercări se desfășoară în condiții ușoare fără a necesita aparatura complicată.

Din acest motiv deseori tenacitatea la rupere a unui material se exprimă printr-o caracteristică de tenacitate care însă nu a fost determinată direct, ci pe baza altei caracteristici care a putut fi determinată mai ușor. Astfel s-a ajuns la stabilirea unor relații, între caracteristicile de apreciere a tenacității la rupere, sau între acestea și alte caracteristici mecanice ale materialelor, în majoritate stabilite empiric în urma unor cercetări experimentale.

Între principalele caracteristici de tenacitate la rupere, există relații de dependență unanim acceptate, de forma:

- pentru starea plană de deformație:

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{EJ_c}{1-\mu^2}} = \frac{E}{1-\mu^2} \zeta_c \quad (3.25)$$

- pentru starea plană de tensiune:

$$K_{IC} = \sqrt{EJ_c} = E\zeta_c \quad (3.26,a)$$

$$K_{IC} = \sqrt{E\sigma_c\delta_c} \quad (3.26,b)$$

Relația (3.26,b) este recomandată atunci când raportul $\sigma/\sigma_c < 0,6$ ceea ce presupune că enclava plastică la vârful fisurii este mică. Deoarece K_{IC} este caracteristic domeniului elastic iar δ_c domeniului elasto - plastic Wang. Z. Q. recomandă introducerea în relația (3.26,b) a unui coeficient m_1 și înlocuirea limitei de curgere cu o tensiune medie $\sigma_m = (\sigma_c + \sigma_r)/2$. Cu această corectură relația (3.26,b) devine:

$$K_{IC} = \sqrt{m_1 E \sigma_m \delta_c} \quad (3.27)$$

De asemenea se recomandă atât pentru starea plană de deformație cât și pentru starea plană de tensiune, valoarea $m_1 = 1,4$. Rezultă atunci:

$$K_{IC} = \sqrt{1,4E\sigma_m\delta_C} \quad (3.28)$$

Ținând seama de relația (3.26,a) și (3.28) se obține relația dintre J_c și δ_C

$$J_c = 1,4\sigma_m\delta_C = 0,7(\sigma_c + \sigma_r)\delta_C \quad (3.29)$$

Au fost stabilite prin cercetări experimentale și alte relații între caracteristicile de tenacitate la rupere. Cele mai multe astfel de relații s-au stabilit între factorul de intensitate al tensiunii K_{IC} și energia la rupere KV ([4] [67]).

Relațiile empirice stabilite pe baza unor cercetări experimentale între caracteristicile de tenacitate la rupere și unele caracteristici mecanice ale materialelor nu pot fi utilizate ca general valabile ci numai pentru cazurile concrete pentru care au fost determinate.

Observații Tenacitatea la rupere a materialului pieselor sau elementelor de rezistență este influențată în principal de mai mulți factori: temperatura de încercare, viteza de încărcare (solicitare) sau cea de deformare și de grosimea epruvetei. În cazul conductelor, pe lângă factorii prezentați anterior pot fi luați în calcul și durate de funcționare a conductei precum și acțiunea corosivă a mediului din interiorul conductei sau din exteriorul ei.

3.4.7 Factorii care influențează tenacitatea la rupere

Tenacitatea la rupere a materialului pieselor sau elementelor de rezistență care funcționează în condiții normale de mediu, este influențată în principal de : temperatura de exploatare, viteza de încărcare și grosimea peretelui. În cazul conductelor, pe lângă factorii amintiți, mai trebuie considerați și durata de funcționare a conductei și acțiunea corozivă a mediului din interiorul conductei. De asemenea în cazul solicitărilor în regim dinamic, caracteristicile de tenacitate sunt în general mai mici decât cele determinate în regim static de solicitare.

Temperatura de funcționare are o mare influență asupra tenacității la rupere. În cazul oțelurilor, în domeniul temperaturilor negative și a celor nu mult peste valoarea de $0^\circ C$, tenacitatea la rupere este mică și crește relativ puțin peste $0^\circ C$. La temperaturi ridicate, în general pentru oțeluri, tenacitatea la rupere are o tendință de scădere importantă.

Grosimea piesei influențează și ea negativ asupra tenacității la rupere.

În cazul solicitărilor în regim dinamic al elementelor de rezistență caracteristicile de tenacitate sunt în general mai mici decât a celor determinate pe piesele din același oțel în regim static de solicitare.

3.4.8. Determinarea tenacității la rupere a unor oțeluri utilizate la confecționarea conductelor de abur

După cum se știe tenacitatea la rupere poate fi exprimată prin mai multe caracteristici: factorul critic de intensitate al tensiunii K_{IC} , deplasarea critică la vârful fisurii δ_I (sau CTOD, CMOD, CTOA), integrala de contur J_c , caracteristica K_V obținută pe epruvete tip Chevron, etc.

Datorită unei metodologii mai simple de determinare, pentru majoritatea conductelor de abur cercetate de un colectiv din cadrul Catedrei de Rezistența Materialelor, s-a adoptat pentru determinarea tenacității la rupere în bună parte determinarea factorului K_V care ca valoare este foarte apropiat de K_{IC} , conform diagramei de echivalență $K_{IC} - K_V$ cunoscute.

În acest sens în conformitate cu [75], sunt prezentate diagramele din: Fig.3-18; Fig.3-19; Fig.3-20 și Fig.3-21.

Toate aceste figuri ilustrează foarte clar efectul temperaturii și al duratei de funcționare asupra tenacității la rupere al celor trei oțeluri termorezistente încercate de colectivul menționat.

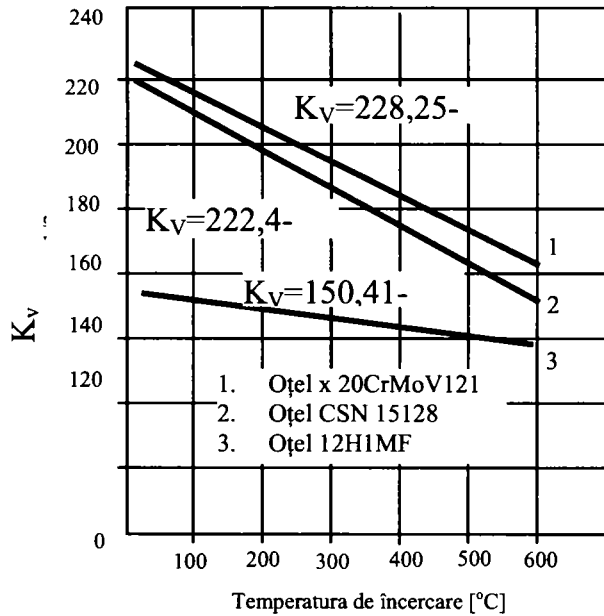


Fig.3-18 Tenacitatea la rupere K_v oțeluri neutilizate

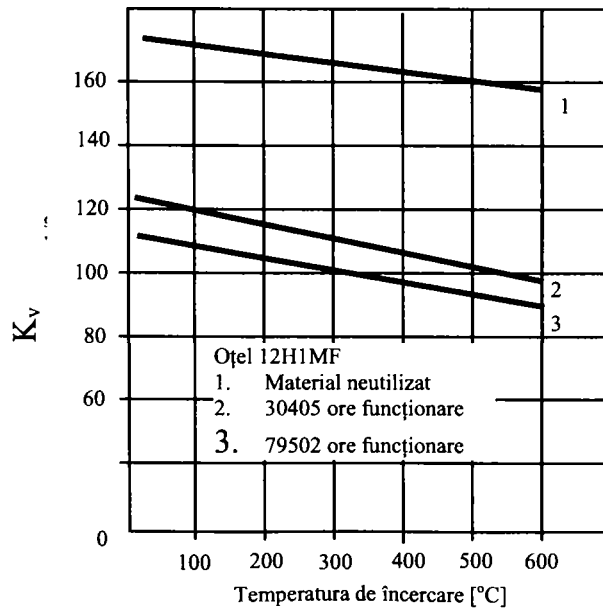
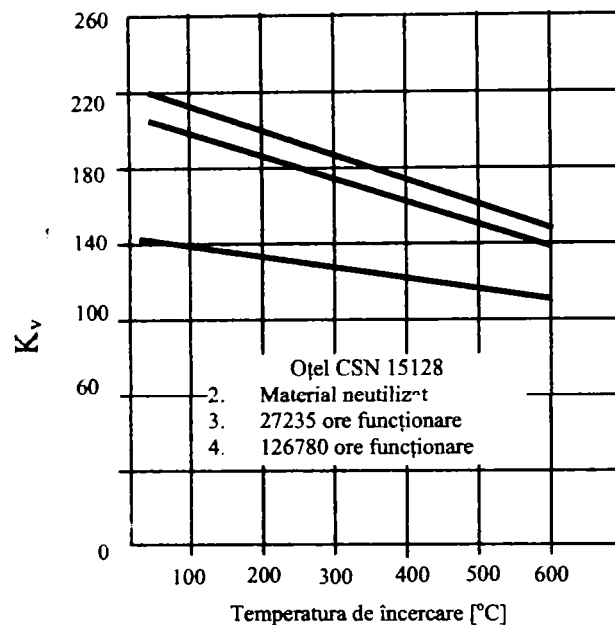
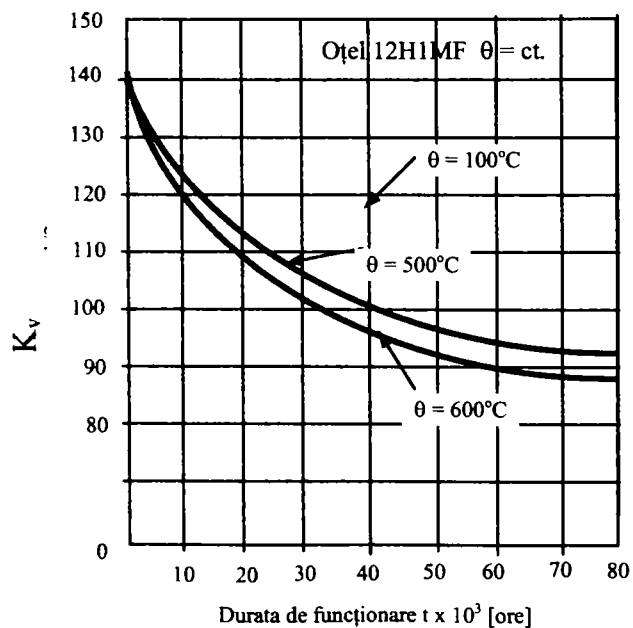
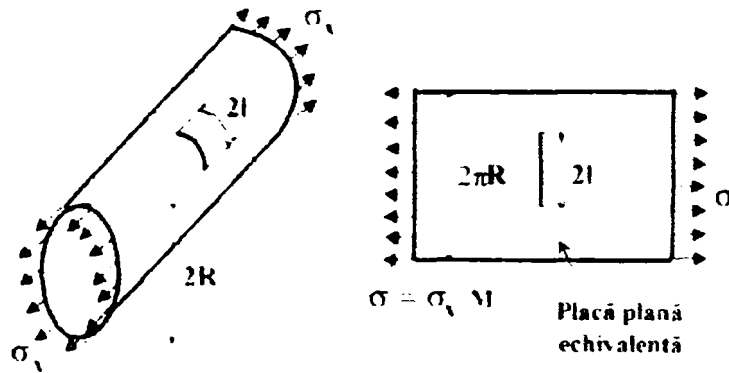


Fig.3-19. Variația lui K_v cu durata de funcționare oțel 12H1MF

Fig.3-20. Variația K_v cu durata de funcționareFig.3-21. Variația lui K_v cu durata de funcționare la temperatura constantă



b)

Fig. 3-22. Echivalența dintre conductă și placă
 a) conductă cu fisură longitudinală
 b) conductă cu fisură circumferențială

Factorul de multiplicare al tensiunii M (Fig 3-18) are expresia:

$$M = \sqrt{1 + 1,6 \frac{l^2}{Rh}} \quad (3.30)$$

unde

h - grosimea peretelui conductei

R - raza conductei considerată de la grosimea medie a acesteia. Oțelurile din care sunt confecționate conductele de abur și prin asimilare și conductele de transport petrolier prezintă în general o curbă caracteristică la tracțiune apropiată de forma celei prezentate în (Fig. 3 -23).

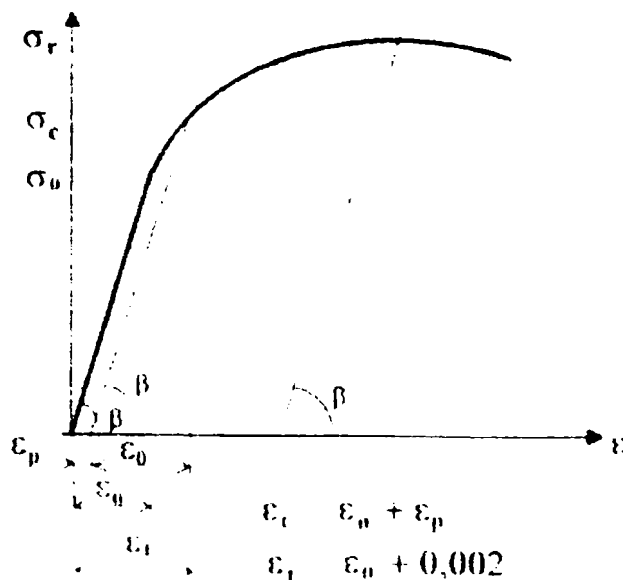


Fig. 3-23. Forma curbei caracteristice a unui oțel de conductă

Curba caracteristică la tracțiune prezentată în Fig. 3 - 23 poate fi definită de relația Ramberg - Osgood:

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{\sigma}{\sigma_0} + \alpha \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^n \quad (3.31)$$

unde: ε , σ - alungirea, respectiv tensiunea unui punct curent al curbei; ε_0 , σ_0 - alungirea, respectiv tensiunea la limită comportării elasto - plastice; α - factor de amplificare; n - exponent de ecruisare; E - modulul de elasticitate longitudinal al materialului conductei; $E = \tan \beta$

Pentru calcule inginerești se poate considera:

$$\sigma_0 = \sigma_c \text{ și } \sigma_0 = \sigma_c / E \quad (3.32)$$

Factorul de amplificare α (factorul lui Ramberg-Osgood), se determină cunoscând că la $\sigma = \sigma_c$, alungirea totală ε_t este:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_c + \varepsilon_p \quad (3.33,a)$$

sau

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_0 = 1 + \varepsilon_p / \varepsilon_0 \quad (3.33,b)$$

unde:

$\varepsilon_p = 0,20\%$ - alungirea remanentă (la limita de curgere).

Raportul $\varepsilon_t / \varepsilon_0$ reprezintă tocmai factorul de amplificare α , iar relația (3.33,b)

devine:

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_0 = 1 + \alpha \quad (3.34)$$

Factorul de amplificare α , poate fi scris și sub forma:

$$\alpha = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_0} = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_0 / E} = \frac{\varepsilon_p E}{\sigma_0} = \frac{0,002E}{\sigma_1} \quad (3.35)$$

În consecință rezultă că factorul de amplificare este o constantă de material.

Dacă se pune și condiția ca diagrama caracteristică la tracțiune să treacă și prin punctul care definește rezistența la rupere a materialului a_r (sau R_m) se obține relația:

$$\frac{1}{1,002 + \frac{\sigma_0}{E}} \left[ne \ln \left(1,002 + \frac{\sigma_0}{E} \right) \right]^{\frac{1}{n}} = \frac{\sigma_0}{\sigma_1} \quad (3.36)$$

Rezolvarea prin încercări iterative a relației (3.36), conduce la determinarea exponentului de ecruisare n . cunoașterea factorului de amplificare și a exponentului de ecruisare, este necesară în aplicarea conceptelor Mecanicii Ruperii la conducte.

3.5.2 Încărcări și tensiuni

Conductele din transportul produselor petroliere, sunt supuse în principal la următoarele solicitări: presiune interioară, solicitare axială, solicitare de încovoiere, solicitarea de răsucire (la rețelele spațiale).

Solicitarea de bază a conductelor menționate este cea rezultată din acțiunea presiunii interioare. La aceste conducte având raportul $R/h > 10$, presiunea interioară produce în peretele conductei (Fig. 3 - 20):

- tensiune normală axială:

$$\sigma_x = \frac{R}{2h} p \quad (3.37)$$

- tensiune normală circumferențială:

$$\sigma_1 = \frac{R}{h} p \quad (3.38)$$

unde: p - presiunea interioară din conductă

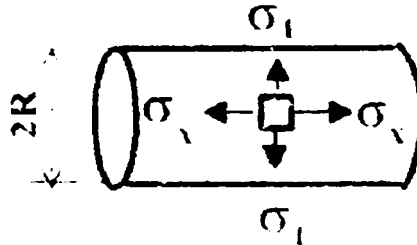


Fig. 3-24. Tensiuni într-o conductă de transport petrolier

La conductele cu $R/h \geq 10$, atât tensiunea normală axială cât și cea normală circumferențială, se consideră constante pe grosimea peretelui conductei. Aceasta datorită dimensiunilor, încărcărilor și deformațiilor pe care le suferă se consideră într-o stare plană de tensiune.

La conductele de abur viu raportul $R/h < 10$, astfel presiunea interioară produce în peretele conductei tensiuni care *variază* pe grosime. Datorită grosimii mari a peretelui acesta se consideră într-o stare plană de deformăție.

Solicitarea axială și de încovoiere la conductele menționate, apar în primul rând datorită greutateii, dilatărilor termice împiedecate și a modului de rezemare. Aceste tensiuni normale axiale σ_x , se suprapun peste cele produse de presiunea interioară.

3.5.3. Tipuri de fisuri

În peretele conductelor pot exista o serie de defecte: creștături, fisuri, goluri incluziuni, etc. Acestea provin fie din procesul tehnologic de elaborare a conductelor, fie au apărut în timpul funcționării acestora.

În zonele adiacente defectelor, au loc concentrări de tensiuni care constituie surse de inițiere și dezvoltare a proceselor de rupere. Atât incluziunile cât și golurile, constituie puncte de unde se inițiază și apoi în anumite condiții, se dezvoltă fisurile.

În cazul conductelor de transport petrolier deschiderea fisurilor după Modul I, este deosebit de periculoasă, deoarece fisura se deschide și produce pe lângă pierderi considerabile de fluid, un posibil incendiu sau o poluare de mediu a cărei înlăturare este foarte costisitoare.

Ținând seama de modul de solicitare al conductelor, cele mai frecvente tipuri de fisuri care apar, sunt cele longitudinale și circumferențiale, ambele de suprafață. Fisurile longitudinale sunt orientate după o direcție paralelă cu axa longitudinală a conductelor (Fig. 3 - 22a), iar cele circumferențiale sunt cuprinse într-un plan normal la axa longitudinală a conductei (Fig. 3 - 22b). Fisurile care nu au străbătut întreaga grosime a peretelui conductei, sunt fisuri de suprafață, iar cele care au străbătut grosimea peretelui, sunt fisuri străpunse.

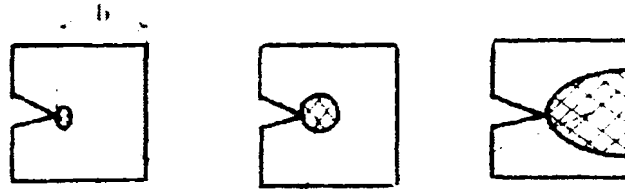
Fisurile longitudinale sunt deschise după modul I de rupere de către tensiunile normale circumferențiale σ_t , iar fisurile circumferențiale de către tensiunea normală axială σ_x .

3.6 Conductă cu fisură longitudinală de suprafață supusă la presiune interioară

Comportarea unui material este apreciată în funcție de mărimea enclavei plastice care se formează la vârful fisurii. Astfel se delimitează trei domenii de solicitare

- Domeniul elastic (Fig. 3 - 21,a). În acest domeniu enclava plastică la vârful fisurii lipsește sau are o dimensiune mică.
- Domeniul elasto - plastic (Fig. 3 - 21 ,b), când enclava plastică la vârful fisurii are o dimensiune apreciabilă, dar nu a cuprins întreaga porțiune nefisurată b (ligamentul).

Domeniul plastic (Fig. 3 - 21 c) în acest caz enclava plastică la vârful fisurii, are o dimensiune mare și a cuprins întregul ligament.



Enclave plastice

a)

b)

c)

Fig. 3-25. Domenii de solicitare, funcție de mărimea enclavei plastice:

- a) elastic;
- b) elasto - plastic;
- c) plastic.

3.6.1 Soluțiile în domeniul elastic ale caracteristicilor de tenacitate

În Fig. 3 -26 se prezintă o secțiune transversală într-o conductă care conține o fisură interioară longitudinală de suprafață. Pe direcția radială, fisura are dimensiunea (adâncimea) a . Dimensiunea $b=h-a$ poartă numele de ligament și reprezintă dimensiunea nefisurată a conductei.

Presiunea interioară p , acționează în interiorul conductei și pe fetele fisurii.

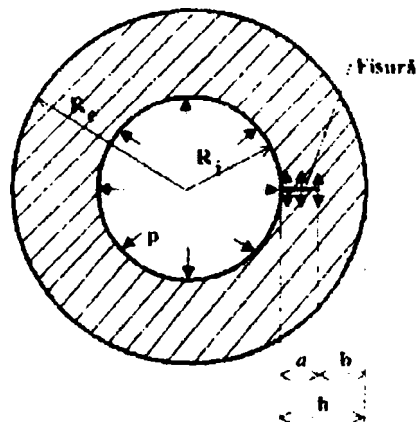


Fig. 3 - 26. Secțiune transversală într-o conductă cu fisură longitudinală de suprafață

Considerând conducta cu peretele gros în domeniul elastic de solicitare principalele caracteristici de tenacitate au următoarele expresii:

$$K_1 = p \frac{2R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} \sqrt{\pi a} F(a/h; R_i/R_e) \quad (3.39)$$

$$J = \frac{K_1^2}{E'} \quad (3.40)$$

$$\delta = p \frac{8R_i^2}{(R_e^2 - R_i^2)E'} V_1(a/h; R_i/R_e) \quad (3.41)$$

unde:

$E'=E$ pentru starea plană de tensiune

$E'=E/(1-\mu^2)$ pentru starea plană de deformăție.

Funcțiile F și V_1 depind de rapoartele a/h și R_i/R_e . Valorile acestor funcții, determinate prin metode numerice sunt prezentate în Anexa 4.2.1-1 din [76].

3.6.2 Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

În domeniul plastic de solicitare caracteristica K_1 nu are semnificație. Soluțiile în domeniul plastic de solicitare pentru principalele caracteristici de tenacitate, au expresiile:

$$J = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{P}{P_0} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(a/h; R_i/R_e) \quad (3.42)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 a \left(\frac{P}{P_0} \right) h_2(a/h; n; R_i/R_e) \quad (3.43)$$

unde: p_0 - presiunea interioară limită pentru configurația conductei. Pentru un material perfect plastic, $n=\infty$

o valoare limită inferioară pentru p_0 se poate calcula cu relația:

$$p_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\sigma_0}{R_e} b \quad (3.44)$$

unde: p_0 - presiunea interioară limită pentru configurația conductei. Pentru un material perfect plastic, $n=\infty$

o valoare limită inferioară pentru p_0 se poate calcula cu relația:

unde: $R_c=R_i+a$ și reprezintă distanța radială de la centrul conductei până la vârful fisurii.

Funcțiile h_1 și h_2 din relațiile (3.42) și (3.43) depind de rapoartele a/h , R_i/R_e și exponentul de ecruisare n , iar valorile lor sunt reprezentate în Anexa 4.2.2-1 din [76].

Aceste funcții pot fi reprezentate grafic ceea ce permite determinarea valorilor prin interpolare pentru alte valori ale rapoartelor decât cele precizate în anexă.

3.6.3 Soluțiile în domeniul elasto-plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

Soluțiile în domeniul elastic și cel plastic de solicitare, pot fi utilizate pentru domeniul elasto - plastic. Și în domeniul elasto - plastic de solicitare caracteristică de tenacitate K_I , nu are semnificație.

Pentru materialele a căror curbă caracteristică la tracțiune este supusă relației Ramberg - Osgood, caracteristicile de tenacitate specifice acestui domeniu sunt date de relațiile:

$$J = \frac{P}{E} f_1(a_e, R_i / R_e) + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{a}{h} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.45)$$

$$\delta = \frac{P}{E} f_2(a_2; R_i / R_e) + \alpha \varepsilon_0 a \left(\frac{P}{P_0} \right)^n h_2(a/h; R_i / R_e) \quad (3.46)$$

unde: a_e - dimensiunea efectivă a fisurii, determinată cu relația:

$$a_e = a + \phi r_p \quad (3.47)$$

cu

$$r_p = \frac{1}{\pi \beta} \left(\frac{n-1}{n+1} \right) \left(\frac{K_I}{\sigma_0} \right)^2 \quad (3.48)$$

și

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{P_0} \right)^2} \quad (3.49)$$

în care:

$\beta=2$ pentru stare plană de tensiune
 $\beta=6$ pentru stare plană de deformăție

Funcțiile f_1 și f_2 sunt date de relațiile:

$$f_1 = (a_e; R_i / R_e) = 4\pi a_e \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} F^2(a/h; R_i / R_e) \quad (3.50)$$

$$f_2 = (a_e; R_i / R_e) = 8a_e \frac{R_e^2}{R_e^2 - R_i^2} V_1(a/h; R_i / R_e) \quad (3.51)$$

Valorile funcțiilor F și V_1 sunt reprezentate în Anexa 4.2.1-1 [76]

3.7 Conductă cu fisură interioară circumferențiară de suprafață solicitată la întindere

Se consideră o conductă care conține o fisură circumferențiară de suprafață totală, la interiorul conductei (Fig. 3 - 27). Fisura are adâncimea a .

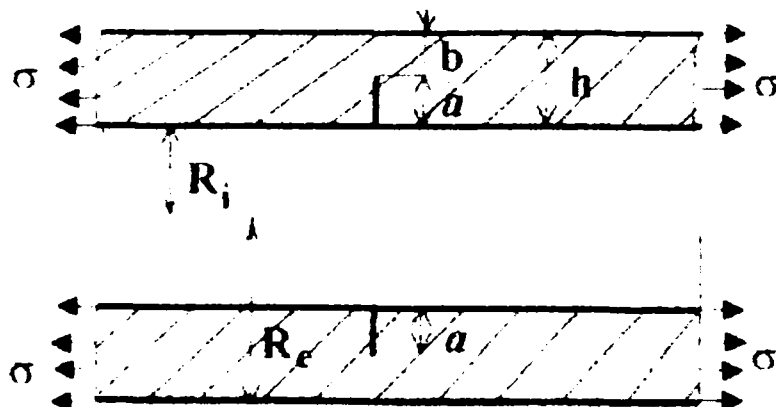


Fig. 3-27. Conductă cu fisură circumferențiară de suprafață.

Conducta este supusă la o tensiune uniformă de întindere dată de relația:

$$\sigma = \frac{P}{\pi(R_e^2 - R_i^2)} \quad (3.52)$$

unde: P - Încărcarea totală de tracțiune, care acționează asupra conductei, în cazul în care conducta este supusă la presiune interioară p , tensiunea σ este egală cu cea produsă de presiunea (σ_x).

3.7.1 Soluțiile în domeniul elastic de solicitare, ale caracteristicilor de tenacitate

Acestea au următoarele expresii:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/h; R_i/R_e) \quad (3.53)$$

$$\delta = \frac{4a\sigma}{E} V'(a/h; R_i/R_e) \quad (3.54)$$

În cazul acestei conducte, câmpul de tensiune și deformație în vecinătatea vârfului fisurii circumferențiare, corespunde unei stări plane de deformație.

În această situație, caracteristica de tenacitate J , are expresia:

$$J = \frac{1-\mu^2}{E} K_1^2 \quad (3.55)$$

Valorile funcțiilor F și V din relațiile (3.53) și (3.54) sunt prezentate în Anexa 4.3.1-1 din [76].

3.7.2 Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

Expresiile cele mai des folosite sunt:

$$J = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{a}{h} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.56)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 a \left(\frac{P}{P_0} \right)^n h_2(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.57)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 b \frac{a}{h} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_3(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.58)$$

unde: P_0 = încărcarea limită pentru materialul conductei, considerat perfect elastic,

δ_t - deschiderea la vârful fisurii (CTOD)

Valoarea maximă pentru P_0 se poate determina cu relația:

$$P_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi \sigma_0 (R_e^2 - R_c^2) \quad (3.59)$$

unde:

$R_c = R_i + a$ și reprezintă distanța de la centrul conductei la vârful real al fisurii. Valorile funcțiilor h_1 , h_2 , h_3 din relațiile (3.56), (3.57), și (3.58) sunt prezentate în Anexa 4.3.2-1 din [76].

3.7.3 Soluțiile în domeniul elasto - plastic ale caracteristicilor de tenacitate

În domeniul elasto - plastic de solicitare relațiile de calcul sunt:

$$J = \frac{P^2}{E'} f_1(a_e; R_i / R_e) + \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{a}{h} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.60)$$

$$\delta = \frac{P}{E'} f_2(a_e; R_i / R_e) + \alpha \varepsilon_0 a \left(\frac{P}{P_0} \right)^n h_2(a/h; n; R_i / R_e) \quad (3.61)$$

unde: a_e - dimensiunea efectivă (reală) a fisurii, definită de relațiile (3.47); (3.48); (3.49), iar funcțiile f_1 și f_2 , au expresiile:

$$f_1(a_e; R_i / R_e) = \frac{a}{\pi(R_e^2 - R_i^2)} F^2(a/h; R_i / R_e) \quad (3.62)$$

$$f_2(a_e; R_i / R_e) = \frac{4a_e}{\pi(R_e^2 - R_i^2)} V_1(a/h; R_i / R_e) \quad (3.63)$$

Valorile funcțiilor F și V_1 sunt prezentate în Anexa 4.3.1-1 din [76].

3.8 Conductă cu fisură circumferențială străpunsă, solicitată la întindere

În Fig. 3 - 28. se prezintă o conductă solicitată la întindere de către sarcina P și care prezintă o fisură circumferențială străpunsă.

Sarcina P , produce în peretele conductei o tensiune uniformă axială medie σ :

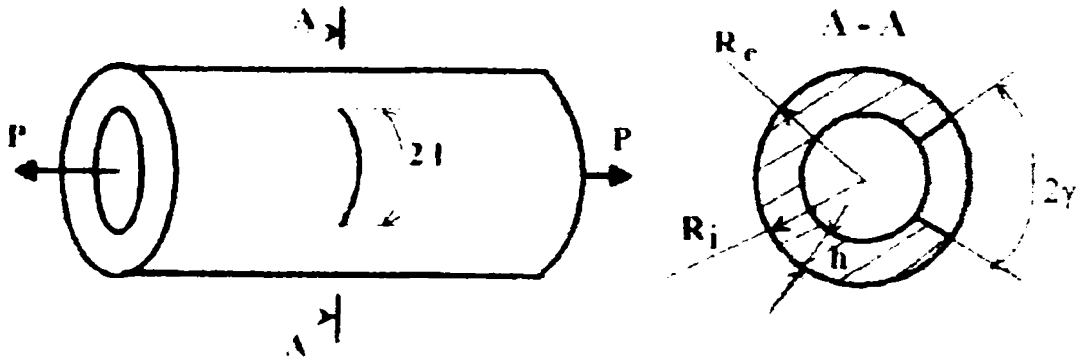


Fig. 3-28. Conductă cu fisură circumferențială străpunsă

$$\sigma = \frac{P}{2\pi R h} \quad (3.64)$$

unde:

R - raza medie a conductei, $R = (R_i + R_e)/2$

h - grosimea peretelui conductei

Între unghiul la centru 2γ și lungimea fisurii, există relația:

$$2l = 2\gamma R_e \quad (3.65a)$$

iar lungimea mediană a circumferinței conductei ($2l_m$) se poate determina cu relația

$$2l_m = 2\pi R \quad (3.65b)$$

3.8.1 Soluțiile în domeniul elastic, ale caracteristicilor de tenacitate

În domeniul elastic de solicitare, caracteristicile de tenacitate sunt exprimate prin relațiile:

$$K_1 = \sigma \sqrt{\pi l} F(l/l_m; R/h) \quad (3.66)$$

$$J = \frac{K_1^2}{E'} \quad (3.67)$$

$$\delta = \frac{4\sigma l}{E} V(l/l_m; R/h) \quad (3.68)$$

F și V din relațiile (3.66) și (3.68), sunt funcții de rapoarte l/l_m și R/h . valorile acestor funcții sunt prezentate în Anexa 4.4.1-1 din [76].

3.8.2 Soluțiile în domeniul plastic ale caracteristicilor de tenacitate

În condiții plastice de solicitare, caracteristicile de tenacitate sunt exprimate de următoarele relații:

$$J = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{l}{l_m} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(l/l_m; n; R/h) \quad (3.69)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 \left(\frac{P}{P_0} \right)^n h_2(l/l_m; n; R/h) \quad (3.70)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 b \frac{l}{l_m} \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_3(l/l_m; n; R/h) \quad (3.71)$$

unde:

$b = R_h(\pi - \gamma)$ este ligamentul (partea nefisurată).

P_0 – încărcarea limită pentru materialul conductei considerat perfect plastic și care se poate determina cu relația:

$$P_0 = 2\sigma_0 R h \left[\pi - \gamma - 2 \arcsin \left(\frac{1}{2} \sin \gamma \right) \right] \quad (3.72)$$

Valorile funcțiilor dimensionale h_1 , h_2 , h_3 din relațiile (3.69) ... (3.71), sunt prezentate în Anexa 4.4.2-1 din [76].

3.8.3 Soluțiile în domeniul elasto - plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

Pentru materialele a căror curbă caracteristică la tracțiune, satisface relația Ramberg - Osgood, relațiile de estimare în domeniul elasto plastic ale caracteristicilor de tenacitate, se obțin prin suprapunerea relațiilor din domeniile elastic și plastic de solicitare.

În domeniul elasto - plastic de solicitare, caracteristicile de tenacitate, se determină cu relațiile:

$$J = \frac{P^2}{E} f_1(l_e; R_i / R_e) + a \sigma_0 \varepsilon_0 b \left(\frac{P}{P_0} \right)^{n+1} h_1(l/l_{\min}; n; R/h) \quad (3.73)$$

$$\delta = \frac{P}{E} f_2(l_e; R/h) + a \varepsilon_0 b \left(\frac{P}{P_0} \right)^n h_2(l/l_m; n; R/h) \quad (3.74)$$

unde

$$f_1(l_e; R/h) = \frac{l_e}{4\pi R^2 h^2} F^2(l/l_m; R/h) \quad (3.75)$$

$$f_2(l_e; R/h) = \frac{2l_e}{\pi R h} V_1(l/l_m; R/h) \quad (3.76)$$

Funcțiile F și V_1 au semnificația dată la punctul (3.81) cu valorile prezentate în Anexa 4.4.1-1 din [76].

l_e - se determină cu relațiile (3.47) ... (3.49) unde se înlocuiește a_e cu l_e , și a cu l .

3.9 Conductă cu fisură circumferențială străpunsă solicitată la încovoiere

Același tip de conductă (Fig.3 - 28) este de data aceasta solicitată la încovoiere pură de către momentul încovoiător M_i , care deschide fisura circumferențială după Modul I. Fisura este situată în zona întinsă a conductei, aflată sub acțiunea momentului încovoiător.

Mărimile I , h , R , b , γ au semnificația de la punctul 3.8. În zona fisurată momentul încovoiător M_i , creiază o tensiune normală σ , care se calculează cu relația:

$$\sigma = \frac{M_i R}{I} \quad (3.77)$$

unde $I = \frac{\pi}{4}(R_e^4 - R_i^4)$ - momentul de inerție al secțiunii transversale nefisurate al conductei, calculat față de axa neutră.

3.9.1 Soluțiile în domeniul elastic, ale caracteristicilor de tenacitate

În domeniul elastic de solicitare, caracteristicile de tenacitate pot fi calculate cu relațiile:

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} F(l/l_m; R/h) \quad (3.78)$$

$$J = \frac{K_1^2}{E'} \quad (3.79)$$

$$\delta = \frac{4\sigma l}{E'} V(l/l_m; R/h) \quad (3.80)$$

Valorile funcțiilor F și V sunt prezentate în Anexa 4.5.1-1 din [76].

3.9.2 Soluțiile în domeniul plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

În domeniul plastic de solicitare, caracteristicile de tenacitate, se determină cu relațiile:

$$J = \alpha \sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{l}{l_m} \left(\frac{M_i}{M_p} \right)^{n+1} h_1(l/l_m; n; R/h) \quad (3.81)$$

$$\delta = \alpha \varepsilon_0 l \left(\frac{M_i}{M_p} \right)^{n+1} h_2(l/l_m; n; R/h) \quad (3.82)$$

$$\delta_i = \alpha \varepsilon_0 b \frac{l}{l_m} \left(\frac{M_i}{M_p} \right)^{n+1} h_3(l/l_m; n; R/h) \quad (3.83)$$

unde :

M_p - momentul încovoiător limită pentru conducta fisurată aflată sub solicitarea de încovoiere pură, materialul având o comportare perfect plastică. Momentul încovoiător limită M_p se determină cu relația :

$$M_p = M_p' \left(\cos \frac{\gamma}{2} - \frac{1}{2} \sin \gamma \right) \quad (3.84)$$

$$M_p^2 = 4\sigma_0 h R^2 \quad (3.84)$$

și reprezintă momentul încovoietor limită, corespunzător conducerii nefisurate.

Valorile funcțiilor h_1 , h_2 , și h_3 , din relațiile (3.81) ... (3.83) sunt prezentate în Anexa 4.5.2-1 din [76].

3.9.3 Soluțiile în domeniul elasto - plastic, ale caracteristicilor de tenacitate

Combinând soluțiile din domeniul elastic și plastic, pentru materialele a căror curbă caracteristică la tracțiune se supune ecuației Ramberg - Osgood, caracteristicile de tenacitate în domeniul elasto - plastic de solicitare, prezintă următoarele relații:

$$J = \frac{M_i^2}{E'} f_1(l_e; R/h) + a\sigma_0 \varepsilon_0 b \frac{l}{l_m} \left(\frac{M_i}{M_p} \right)^{n+1} h_1(l/l_m; n, R/h) \quad (3.86)$$

$$\delta = \frac{M_i}{l} f_2(l_e; R/h) + a\varepsilon_0 l \left(\frac{M_i}{M_p} \right)^n h_2(l/l_m; n, R/h) \quad (3.87)$$

unde:

$$f_1 = (l_e; R/h) = \pi d_e \left(\frac{R}{l} \right)^2 F^2(l/l_m; R/h) \quad (3.88)$$

$$f_2 = (l_e; R/h) = 4l_e \frac{R}{l} V_1(l/l_m; R/h) \quad (3.89)$$

Funcțiile F , V_1 , h_1 , h_2 au semnificația de la punctul (3.91) și (3.92) iar l_e se determină ca la punctul 3.8-3.

3.10 Conductă supusă la presiune interioară, având o fisură longitudinală străpunsă

Cel mai periculos mod de propagare a fisurii la conducte, este Modul I, deoarece în acest caz de rupere, flancurile fisurii se depărtează, permițând ieșirea fluidului tehnologic din interiorul conducerii. Din acest motiv, studierea conductelor fisurate se face cu ajutorul caracteristicilor de tenacitate, pe baza Modulului I de rupere. Cea mai utilizată caracteristică de tenacitate în acest caz este factorul de intensitate al tensiunii K_I .

În literatura de specialitate, se întâlnesc mai multe relații pentru determinarea factorului de intensitate al tensiunii K_I , în cazul conductelor supuse la presiune interioară și care prezintă o fisură longitudinală străpunsă.

Factorul de intensitate al tensiunii pentru o fisură longitudinală străpunsă de lungime 2ℓ (Fig. 3-29) este dat de relațiile:

$$a) \text{ După [T1] din [76]: } K_I = \sigma_i \sqrt{\pi d} F(\lambda) \quad (3.90)$$

unde: $\lambda = l\sqrt{Rh}$; R - raza medie a peretelui conductei; h - grosimea peretelui conductei; σ_t - tensiunea normală circumferențiară, care deschide fisura după Modul I; F(λ) un factor geometric.

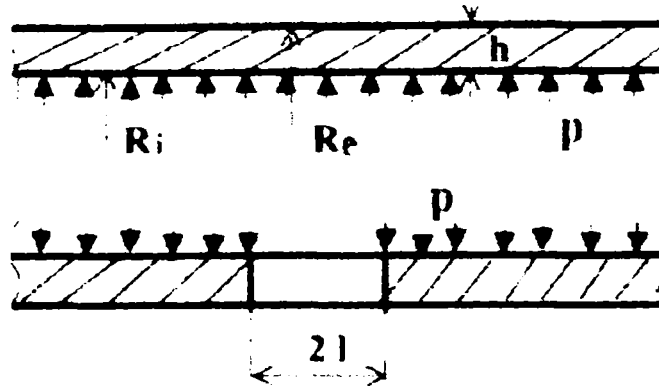


Fig. 3-29. Conductă cu fisură longitudinală străpunsă

Dacă $h \ll R$, tensiunea normală circumferențiară se determină cu relația (3.38)

Factorul geometric F(λ), din relația 3 - 90, se exprimă prin:

$$F(\lambda) = \sqrt{1 + 1,25\lambda^2} \quad ; \text{ pentru } 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (3.91)$$

$$F(\lambda) = 0,6 + 0,9\lambda \quad ; \text{ pentru } 1 < \lambda \leq 5 \quad (3.92)$$

Relația (3.90) este cea mai utilizată relația pentru determinarea factorului de intensitate al tensiunii K_I pentru o conductă supusă la presiune interioară și având o fisură longitudinală străpunsă.

$$\text{b) După [F5] din [76]} \quad K_I = \sigma^* \sqrt{\frac{8l}{\pi} \ln \sec\left(\frac{\pi\sigma_1}{2\sigma} M\right)} \quad (3.93)$$

$$\text{unde } \sigma^* = 1,04 \sigma_c + 68,94 \quad (3.94a)$$

$$M = \sqrt{1 + 1,255\left(\frac{l^2}{Rh}\right) + 0,0135\left(\frac{l^2}{Rh}\right)^2} \quad (3.94b)$$

$$\text{c) După [L2] din [76]: } K_I = \sigma_t \sqrt{\pi l_c} \left[1 + \left(0,29 - 0,09 \ln \frac{l_c^2}{Rh} \right) \right] \quad (3.95)$$

unde : l_c - semilungimea de calcul a fisurii, incluzând și mărimea enclavei plastice de la vârful fisurii și care se poate determina cu relația:

$$l_c = \frac{l}{\cos\left(\frac{\pi \sigma_t}{2 \sigma_c}\right)} \quad (3.96)$$

unde l - semilungimea măsurată a fisurii.

$$d) \text{ După [R8] din [76]: } K_I = \sigma_i \sqrt{\frac{\pi d}{\cos\left(\frac{\pi \sigma_i}{2 \sigma_c}\right)} \left(1 + 0,4 \frac{l^2}{Rh}\right)} \quad (3.97)$$

$$e) \text{ După [D7] din [76]: } K_I = \sigma_i M \sqrt{\frac{l}{\cos\left(\frac{\pi \sigma_i}{2 \sigma_c}\right)} \cdot \frac{\pi}{2} (4 - k)} \quad (3.98)$$

$$\text{unde } M = \sqrt{1 + 1,161 \frac{l^2}{Rh}}; \quad k = 3 - 4\mu, \quad \text{pentru starea de deformație} \quad (3.99)$$

$$k = \frac{3 - \mu}{1 + \mu} \quad \text{pentru starea de deformație} \quad (3.100)$$

Valorile determinate pentru K_I depind de relația utilizată. Din acest motiv, la determinarea lui K , trebuie utilizată relația care prezintă valori acoperitoare și acestea sunt cele care conduc la cele mai mari valori pentru K_I . Astfel se recomandă utilizarea relațiilor (3.90) sau (3.93). Pe plan mondial se utilizează mai mult relația (3.90).

3.11 Conductă supusă la presiune interioară, având o fisură longitudinală la suprafața interioară de formă semieliptică

Pentru o fisură longitudinală la suprafața interioară (fisură de suprafață ca cea din Fig. 3-30) supusă la presiune interioară, se prezintă următoarele relații pentru determinarea factorului de intensitate al tensiunii.

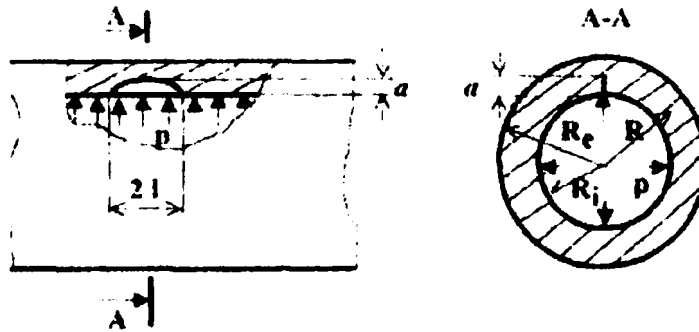


Fig. 3 - 30. Conductă cu fisură longitudinală la suprafața interioară a conductei

$$a) \text{ După [B7] din [76]: } K_I = 1,12 \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \sigma_i M_k \quad (3.101)$$

unde : Q - un parametru ce ține seama de forma fisurii;

M_k – un factor de amplificare, ce ține seama de adâncimea fisurii.
Factorul de amplificare M_k se determină cu relația:

$$M_k = 1 \text{ pentru } 0 \leq a/h \leq 0,5 \quad (3.102)$$

$$M_k = 1 + 1,2 \left(\frac{a}{h} - 0,5 \right) \text{ pentru } 0,5 \leq a/h \leq 1 \quad (3.103)$$

Parametrul Q se calculează cu relația:

$$Q = \phi^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)^2 \quad (3.104)$$

unde ϕ reprezintă valoarea integralei eliptice de forma:

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{l^2 - a}{l^2} \sin^2 \varphi} d\varphi \quad \text{iar } l \text{ semilungimea fisurii} \quad (3.105)$$

În cazul prezentat, se consideră că fisura are o formă semieliptică pentru care este satisfăcută relația :

$$l = \frac{ha}{2(1,05h - a)} \quad (3.106)$$

Relația (3.100), este cea mai utilizată relație pentru determinarea lui M_k pentru cazul de conductă prezentat. În această relație, prin intermediul parametrului Q , intervine și limita de curgere al materialului conductei, ceea ce nu se întâlnește la alte relații. De asemenea parametrul Q poate fi reprezentat grafic pentru diferite rapoarte σ_t / σ_c , ceea ce permite o mai rapidă determinare a lui K_I . O astfel de reprezentare grafică a parametrului Q este prezentată în Anexa 5.2-1 din [76],

b) Pentru același caz de conductă în [W4] din [76], se propune următoarea relație pentru factorul de intensitate al tensiunii K_I

$$K_I = \sigma_t \sqrt{\pi a} F(a/h) \quad (3.107)$$

unde:

$$\sigma_t = \frac{2R_c^2}{R_c^2 - R_i^2} p \quad (3.108)$$

iar $F(a/h)$ este un factor ce ține seama de geometria fisurii și a conductei și are următoarea formă:

$$F(a/h) = 1,1 + \left(0,125 \frac{R_i}{h} - 0,125 \right)^{1/4} \cdot \left[4,951 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + 1,092 \left(\frac{a}{h} \right)^4 \right] \quad (3.109)$$

Observație

În manualele [76] [4], pe lângă caracteristicile de tenacitate ale unor conducte cu diferite fisuri, prezentate în acest capitol al tezei sunt date caracteristicile de tenacitate și pentru alte cazuri de conducte cu alte tipuri de fisuri.

3.12 Uniformizarea metodologiei de determinare a tenacității la rupere

În lucrările [48] [76] se comunică tendința actuală de uniformizare a metodologiei determinării experimentale a tenacității la rupere. Această tendință a fost inițiată încă din anul 1986 de Milner, Aisworth și Dowling. Ei au propus într-o lucrare modificarea metodologiei pentru determinarea următorilor parametri din Mecanica Ruperii: factorul critic de intensitate al tensiunii K_{IC} , deplasarea critică la deschidere a fisurii δ_c și integrala de contur critică J_{IC} .

Această unificare constă în tipul epruvetelor și în metodologia efectuării încercării, diferind doar modul de interpretare al rezultatelor pe baza înregistrărilor diagramei forță – deplasare a punctului de aplicare al forței (F - D).

Conform schemei de aplicare a încercării, se poate alege ca parametrul de apreciere a tenacității la rupere a factorului critic de intensitate a tensiunii K_{IC} , iar dacă această valoare nu respectă condițiile stării plane de deformare rezultatele încercării se apreciază fie prin deplasarea critică la deschiderea fisurii δ_c fie prin integrala de contur critică J_{IC} .

Această metodologie elimină practic posibilitatea nevalidării rezultatelor încercării care apare la metoda K_{IC} (datorită comportării neliniare a materialului sau datorită nerespectării condiției stării plane de deformare), acesta fiind principalul avantaj.

Această tendință de unificare a metodologiei de determinare a parametrilor de rupere K_{IC} , δ_c și J_{IC} este preluată de standardul englez BS 7448-1991 [107] și cel american ASTM 1820-01 [116], precum și de standardul rusesc de Mecanica Ruperii, GOST -25506-85.

3.13. Influența vitezei de încărcare și a orientării suprafețelor de rupere raportate la direcțiile de laminare asupra tenacității de rupere a oțelului pentru vasele sub presiune.

3.13.1. Considerații generale

Este cunoscut că piesele realizate din oțel sunt realizate din materiale care conțin multe fisuri microscopice inevitabile care prin propagare diminuează capacitatea lor de rezistență. Se pune întrebarea dacă această diminuare a rezistenței este importantă cu orientarea direcției de laminare sau direcția de laminare are o influență nesemnificativă.

În cazul plăcilor din oțel este important de a cunoaște dacă în comparație o direcție oarecare, de exemplu direcția de laminare, anumite caracteristici mecanice ale plăcii pe o direcție dată sunt aceleași sau diferă cu direcțiilor lor de laminare.

Pentru studiul acestei probleme ca material de cercetare s-a ales o placă groasă care a fost laminată la cald pentru vase sub presiune la temperaturi ambientale scăzute (STAS 2883/2-91), marca R 360, având compoziția chimică în procente [%], C=0.09; Mn=0.50; Si=0.22; P=0.0226; S=0.0170; Cr=0.012; Mo=0.011; Ni=0.003; Al=0.053.

Pentru a cunoaște materialul plăcii, în prealabil s-au realizat următoarele probe obișnuite de rezistență: trei probe de rezistență la rupere cu epruvete cu (diametrul) $d=10\text{mm}$ and (lungimea) $l=100\text{mm}$. Am obținut valorile medii: $R_e=256,2\text{ MPa}$; $R_m=381,2\text{ MPa}$, $A_{10}(\sigma_{10})=26,6\%$; $Z=65,9\%$, încercarea de încovoiere dinamică cu probe crestate, conform STAS 7511-81: $KV=13,3\text{[J]}$.

Pentru a aprecia diminuarea capacității rezistenței mecanice a plăcii de oțel luate în considerare s-a ales ca criteriu valoarea rezilienței la rupere determinată de testele de mecanica ruperii pe diferite direcții din planul median al plăcii.

3.13.2. Alegerea epruvetelor pentru testele de mecanică a ruperii

Deoarece pentru metalul studiat grosimea minimă a epruvetei impusă de STAS 9760-84 este mai mare decât grosimea reală a plăcii disponibile (22mm), pentru a determina tenacitatea la rupere s-a adoptat metoda Chevron. În timpul testului epruvetele pentru încercare Chevron sunt supuse unei probe la tracțiune aplicată relativ lent și continuu progresiv și fără impact, înregistrând de asemenea în caz de nevoie curba forță-deplasare $\{1\}, \{2\}$.

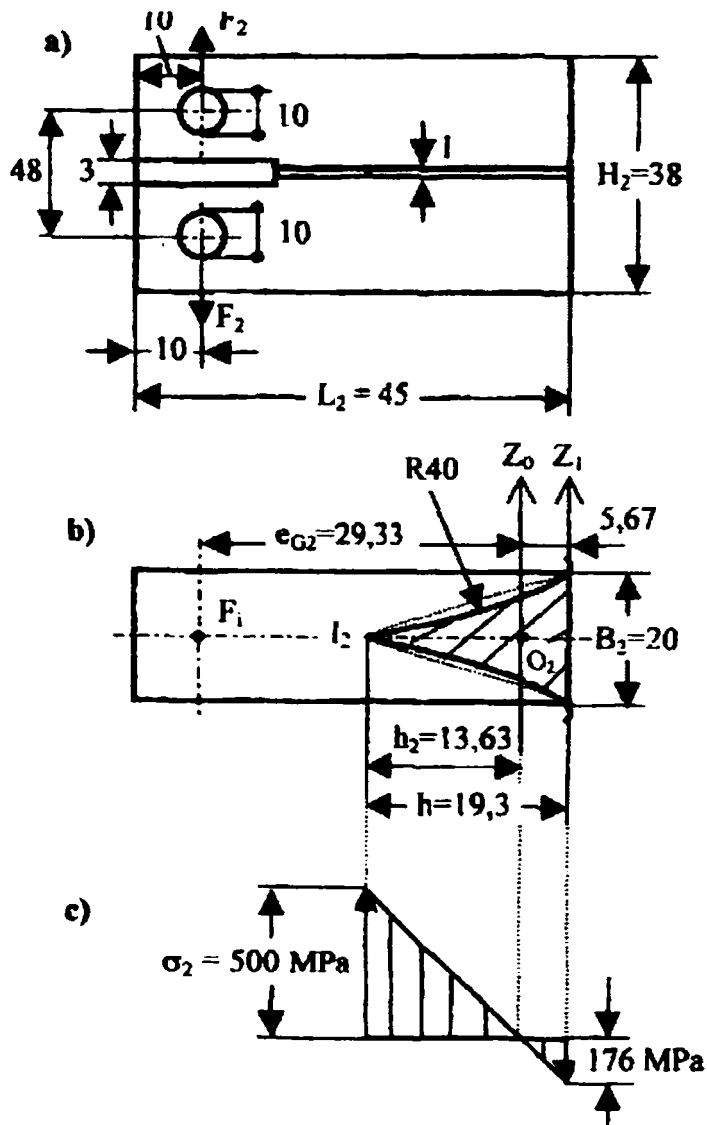


Fig. 3. 31. Utilizarea epruvetei Chevron

În Fig. 3.31 se prezintă tipul de bară crestată de tip Chevron cu secțiune dreptunghiulară folosită în această lucrare. Secțiunea de rupere este triunghiulară cu muchii laterale simetrice, făcute prin tăiere. Inițierea fisurii se produce la vârful I_2 a creștăturii și partea din față a fisurii este continuu mărită până la valoarea critică a lungimii fisurii, la care bara crestată se rupe instantaneu pe o porțiune importantă. Forța de rupere este forța maximă care se înregistrează pe parcursul încercării, care se folosește pentru calcularea rezilienței la rupere. Luând în considerare dimensiunile secțiunii de rupere a barei crestate de tip Chevron (Fig. 3.31b), tensiunea nominală σ_T din vârful h al secțiunii triunghiulare de rupere, cu muchile laterale simetrice curbate și $R=40\text{mm}$, se produce de către forța de tracțiune F_2 conform relației:

$$\sigma_2 = \frac{F_2}{A_2} + \frac{F_2 e_2 h_2}{I_{x0}} = F_2 \left(\frac{1}{A_2} + \frac{e_2 h_2}{I_{x2}} \right) = F_2 U_2 = \frac{F_2}{Q_2} \quad (3.110)$$

unde prin calcul grafic parțial, în a doua parte a acestui paragraf s-au determinat mai multe caracteristici geometrice ale secțiunii de rupere, incluzând de asemenea: $A_2 = 51.2 \text{ mm}^2$ și $I_{x2} = 2826.71 \text{ mm}^4$.

Astfel:

$$\sigma_2 = F_2 \left(\frac{1}{151.2} + \frac{29.33 \cdot 13.63}{2826.71} \right) = 0.14804 \cdot F_2 \quad [\text{N/mm}^2] \quad (3.111)$$

din (5.9) rezultă de asemenea:

$$F_2 = \sigma_2 / 0.14804 = 6.755 \cdot \sigma_2 \quad (3.112)$$

Pentru $\sigma_2 = 500 \text{ MPa}$, $F_2 = 3377.5 \text{ N}$, (Fig. 5.13c), iar tensiunea la bază este:

$$\sigma_b = \left(\frac{1}{151.2} + \frac{29.33 \cdot (-5.67)}{2826.71} \right) 3377.5 = -176.5 = -176.4 [\text{N/mm}^2] \quad (3.113)$$

Fig. 3.31, reprezintă planul de debitare al barelor crestate Chevron luate din placa de oțel considerată. Barele crestate au fost făcute prin tăiere după o schițare și numerotare prealabilă, după care ele au fost executate prin așchiere la dimensiunile date în Fig.3.31.

3.13.3. Instalarea de probă a barelor crestate de tip Chevron cu viteză de încărcare constantă a diferitelor valori $\{3\}$

Fig. 3.33 reprezintă schema principală a instalației de testare a epruvetelor. Ea constă dintr-o mașină care realizează o viteză constantă de încărcare și care este conectată la o mașină de testare la curgere. Epruveta e , inițial de tip tracțiune și apoi de tip Chevron este montată pe axa unui cuptor electric C și este fixată la capetele ei între tija filetată S_1 ghidată în cadrul F și tija T fixată prin articulații de pârgă orizontală D_1 a mașini de fluaj. Legătura dintre capătul pârgă D_1 și șina orizontală D_2 a dispozitivului de încărcare se face prin intermediul unei bare verticale T și brațele laterale ale șinei D_2 . Încărcarea epruvetei e , proporțională cu deplasarea x a sarcinii mobile (greutate) G_3 pe șina D_2 se realizează cu o anumită viteză de încărcare constantă de către motorul electric M prin intermediul unui reductor R , arbore tubular și șurub de tracțiune, S_2 și furca f , în care este ghidată rola de suspendare a încărcării mobile (greutate) G_3 .

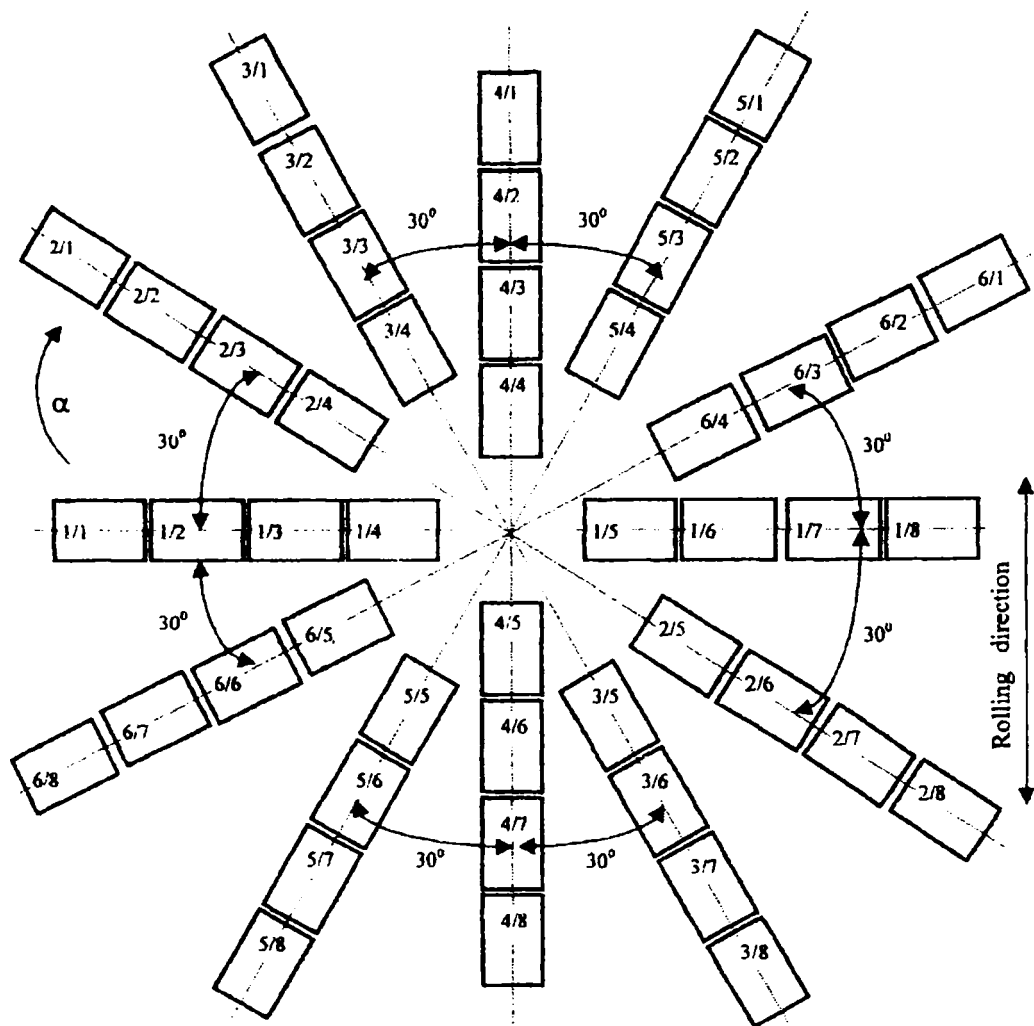


Fig. 3.31. Planul de realizare a epruvetelor Chevron din placă de oțel

Mărima încărcării mobile G_3 a fost stabilită cu condiția ca la deplasarea ei cu 2mm tensiunea nominală în punctul cel mai încărcat h să crească cu $5N/mm^2$.

Pentru a elimina supravegherea continuă a instalației în funcționare, sub extremitatea liberă a șinei D_2 s-a montat un contact I_2 care la ruperea epruvetei Chevron respectiv la atingerea forței maxime de rupere acesta oprește motorul M și deplasarea sarcinii mobile G_3 .

Prin intermediul roților de rezervă ale reductorului R în patru trepte, vitezele de încărcare pot varia în limitele $v_0 = 5 \cdot 10^{-4} \dots 5$ MPa/s și prin cuplarea directă a motorului M la ultima treaptă a reductorului se obține viteza maximă de încărcare $v_0 = 50$ MPa/s.

Distanța dintre reazemul articulat O și punctul de reazem al brațelor laterale ale șinei D_2 de la furca tijei verticale T este $c = 501$ mm, și coeficientul de amplificare al pârghiei orizontale D_1 al mașinii de fluaș este :

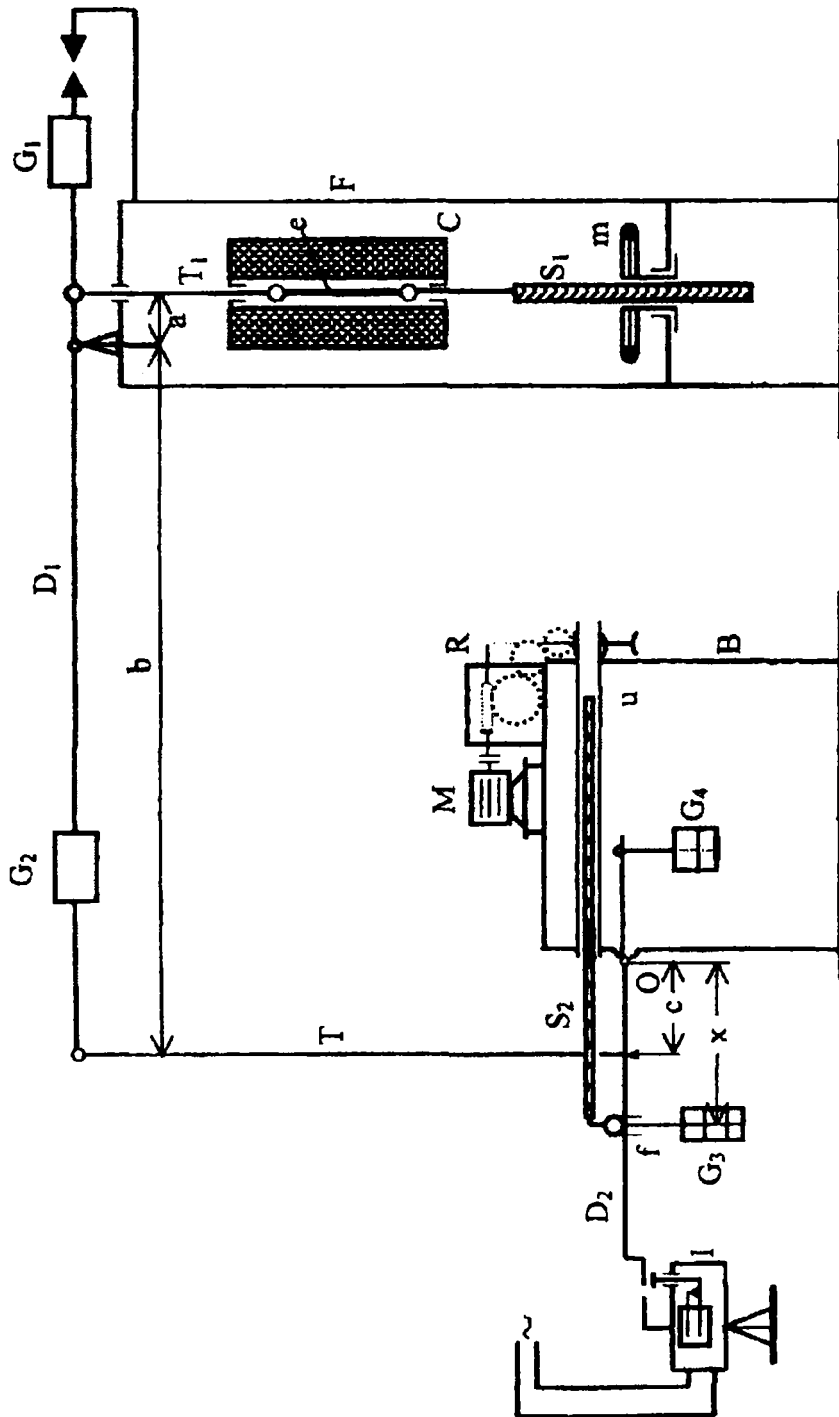


Fig. 3.32. Schema de principiu a sistemului de încărcare a epruvetei

$$i = \frac{\Delta F_2}{\Delta P} = \frac{b}{a} = 29,5 \quad (3.114)$$

Poziția contragreutăților G_1 , G_2 și G_4 este reglată astfel încât poziția de echilibru a pârgheii D_1 și a șinei D_2 să corespundă poziției sarcinii mobile (greutății) G_3 din fața diviziunii de 50 mm a riglei gradate.

În Figura 3.32, pe arborele mașinii de încercat la fluaj este montată o epruvetă Chevron și $T_1 = F_2$, reprezintă forța din bara tensionată a epruvetei, putem scrie următoarea relație conform notațiilor diagramei:

$$\frac{F_2}{T} = \frac{a}{b} = i; \quad G_1 \cdot x = T \cdot c; \quad \frac{F_2}{G_3 \cdot x} = i; \quad F_2 = \frac{G_1 \cdot x}{c} \cdot i = G_1 \cdot \frac{i}{c} \cdot x \quad (3.115)$$

Astfel, la o deplasare Δx a greutății mobile G_3 pe șina D_2 corespunde o creștere ΔF_2 a forței de tracțiune a epruvetei Chevron.

$$\Delta F_2 = G_3 \cdot \frac{i}{c} \cdot \Delta x \quad (3.116)$$

De aici rezultă

$$G_3 = \frac{\Delta F_2}{\Delta x} \cdot \frac{c}{i} = 6.755 \cdot \frac{\Delta \sigma_2}{\Delta x} \cdot \frac{c}{i} \quad (3.117)$$

Astfel, deoarece la o creștere $\Delta x = 2$ mm a deplasării greutății mobile G_3 tensiunea nominală σ_2 din vârful I_2 al secțiunii de rupere a epruvetei Chevron se consideră a crește cu $\Delta \sigma_2 = 5$ MPa, greutatea mobilă G_3 rezultă:

$$G_3 = 6.755 \frac{5 \text{ MPa}}{2 \text{ mm}} \cdot \frac{501}{29.5} = 269.60591 \text{ kgf} \quad (3.117a)$$

3.13.4. Încercarea epruvetelor Chevron cu viteze de încărcare constantă de diferite valori

Reductorul R din Figura 3.32 constă din patru trepte de reducere. Prima, care este acționată direct de la motorul electric M cu viteza $n = 2950$ rotații pe minut, constă dintr-un angrenaj cu melc, o roată dințată elicoidală (cu melc), cu raportul de transmisie $i_1 = 100$.

A doua treaptă s-a realizat prin intermediul unor roți cilindrice dințate la un raport de transmisie $i_2 = 25$, care poate fi de asemenea deconectat, în care caz $i_2 = 1$.

A treia treaptă de reducere este dată de roțile de rezervă z_1 , z_2 , z_3 and z_4 prin intermediul cărora se pot realize diferite raporturi de transmisie.

A patra treaptă de reducere constă ca și prima dintr-un angrenaj cu melc, o roată cu melc, cu raportul de transmisie $i_4 = 20$.

Roata cu melc a ultimei trepte de reducere este fixată pe un arbore tubular U în care prin intermediul unei mufe filetate este ghidat un fus filetat S_2 .

Viteza maximă de deplasare a greutății mobile, $v_x = 20$ mm/s se realizează prin eliminarea treptei de reducere R_1 și montarea motorului M pentru a acționa direct ultima treaptă de reducere.

În Tabelul 1, s-au dat mărimile raporturilor de transmisie și ale roților de rezervă care au fost folosite la reductorul R al dispozitivului de încărcare progresivă de la mașina de încercare la tracțiune a epruvetelor Chevron examinate în această lucrare.

Valorile raporturilor de transmisie ale treptelor de reducere din reductorul R al mașinii de încărcare progresivă. The values of the transmission ratios of the reduction steps from the reduction gear R of the progressive charging machine.

3.13.5. Determinarea forței de rupere și a tenacității la rupere pentru epruvetele Chevron destinate probelor la temperatura mediului ambiant

La instalația de probă din Fig. 3.32, inițierea forței maxime de rupere a epruvetelor de probă Chevron este precedată de inițierea și propagarea fisurii epruvetei, urmată de decuplarea motorului electric pentru acționarea greutății mobile G_3 . Poziția de oprire x_{max} a greutății mobile G_3 se citește pe rigla gradată a șinei de reazem a G_3 de unde rezultă că $x_{effective} = x_{max} - 50$ mm. Astfel valoarea forței maxime de rupere a epruvetei se calculează (5).

Tabelul 1

Viteza de deplasare a greutății mobile $G_3=269.6N$ v_x [mm/s]	Viteza de încărcare a epruvetei în vârful I2 v_σ [N/mm ² /s]	Montarea conform diagramei din Fig. nr.	Raportul de transmisie			Roțile de rezervă			
			i_1	i_2	i_3	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
$2 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	3	100	25	20	25	140	25	110
$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	3	100	25	20	60	85	60	105
$2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	3	100	1	20	45	70	30	120
$2 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-1}$	3	100	1	20	105	65	60	60
2	5	3	100	1	20	110	30	110	25
20	50	-	-	-	20	36	22	-	-

Rezultatele calculului se dau în Tabelul 2 coloana 5 (partea a doua) .

Tenacitatea la rupere a oțelului testat pe epruveta Chevron K_{IV} se determină cu relația (3.117).

$$K_{IV} = A \cdot \frac{F_{max}}{B^{3/2}} \quad [N/mm^{3/2}] \quad (3.117)$$

unde:

A – este un coeficient în funcție de tipul epruvetei.

Pentru cel utilizat se adoptă $A=22$;

F_{max} – este forța maximă de rupere determinată;

B – este grosimea epruvetei .

Pentru a obține mărimea K_{IV} în $MPa\sqrt{m}$, valoarea în $[N/mm^{3/2}]$ se înmulțește cu coeficientul c , $c = \sqrt{0,001} \cdot \sqrt{m} = 0,031622\sqrt{m}$.

3.13.6. Modificarea rezultatelor primare ale epruvetelor Chevron încercate

După efectuarea calculelor cu relația (8) rezultatele s-au introdus în Tabelul 2, coloana 6.

Din Tabelul 2, coloana 6 se pune în evidență o împrăștiere exagerată a valorilor tenacității la rupere la epruvetele Chevron testate. Pentru a stabili cauza împrăștierii lor și pentru a corecta rezultatele primare, toate epruvetele încercate au fost complet rupte în două bucăți și apoi prin intermediul unui calibru reglabil au fost măsurate dimensiunile reale ale secțiunilor de rupere: înălțimea h ; și lățimea de bază, Fig. 1; a fiecărei epruvete rupte. Rezultatele sunt prezentate în coloanele 7 și 8 din Tabelul 2. S-a pus în evidență că dimensiunile principale ale epruvetelor Chevron încercate au variat în limitele: $16,8 \leq h_i \leq 21,8$ mm și $17,6 \leq B \leq 20,0$ mm.

Pentru că înălțimea h a epruvetelor încercate a fost total diferită de cea a epruvetelor normale (standard), cu $h_2=19,3$ mm, s-au corectat rezultatele primare prin înlocuirea forței maxime efective de rupere în așa fel încât aceasta să corespundă cu o epruvetă considerată ca normală.

Tensiunea normală maximă σ_{2i} , din vârful secțiunii de rupere este dată de relația (1)

$$\sigma_{2i} = \frac{F_b}{A_i} + \frac{F_b \cdot e_{20} \cdot h_{2i}}{I_{z0,i}} = F_b \left(\frac{1}{A_i} + \frac{e_{20} \cdot h_{2i}}{I_{z0,i}} \right) = F_i \cdot U_i = \frac{F_b}{Q_i} \quad (3.118)$$

unde:

$$U_i = \left(\frac{1}{A_i} + \frac{e_{20} \cdot h_{2i}}{I_{z0,i}} \right) \quad (3.119)$$

și

$$Q_i = \frac{1}{U_i} = \left(\frac{A_i I_{z0,i}}{I_{z0,i} + A_i \cdot e_{20} \cdot h_{2i}} \right) \quad (3.120)$$

sunt caracteristicile geometrice compuse.

Se iau în considerare, de exemplu două epruvete Chevron similare din același material, dar având diferite secțiuni de rupere $A_3 > A_2$ și $h_3 > h_2$.

Tabelul 2. Determinarea tenacității de rupere primare și cea corectată a unei plăci de oțel în funcție de poziția axei longitudinale și viteza de încărcare a epruvetelor tip Chevron

Numarul epruvetei	V_x [mm/s]	v_o [MPa/s]	Xrup effective [mm]	F_{max} [N]	$K_{IV} = \frac{A \cdot F_{max} \cdot C}{B^{3/2}}$ [MPa·m ^{1/2}]	h_{ef} [mm]	B_{ef} [mm]	$q_c = \frac{U(A_2)}{U(A_1)}$	F_{max}/q_1 [N]	$K_{IV} = \frac{A \cdot F_{max}}{B^{3/2}}$ N/mm ^{3/2}	$K_{IV} = \frac{A \cdot F_{max} \cdot C}{B^{3/2}}$ MPa·m ^{1/2}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1/5	20	50	49 4,5	7847,7	71,49	20,7	18	1,1086	7078,8	2046,00	64,49
1/6	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	42 7,5	6784,4	61,29	20,4	18,5	1,087	6241,6	1725,70	54,57
1/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	52 7	8361,0	68,60	20,8	20,0	1,117	748,1	1840,59	58,20
2/6	20	50	53 5,5	8498,4	75,52	19,3	18,3	1,0	8493,4	2388,27	75,52
2/7	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	49 2	7808,0	64,02	20,0	20,0	1,058	7378,6	1814,9	57,39
2/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	43 8,5	6962,5	66,17	19,2	17,6	0,990	7032,1	2095,27	66,26
3/5	2	5	63 0	10001,2	79,57	21,8	20	1,163	8601,1	2115,58	66,9
3/6	20	50	61 7	9791,8	82,25	21,5	19,0	1,145	8551,8	2271,69	71,84
3/7	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	49 7	7887,4	64,22	21,3	19	1,145	6901,5	1833,3	57,97
3/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	49 2,5	7816,3	62,19	20,5	19,0	1,087	7191,0	1910,21	60,41
4/4	2	5	53 2,5	9247,2	72,68	21,8	20,0	1,163	7952,6	1985,79	52,80
4/5	20	50	62 6,5	9945,47	77,36	21,8	20,0	1,160	8573,68	2108,84	66,68
4/6	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	51 0,5	8101,6	66,48	21,8	19,8	1,163	6967,4	1739,75	55,02
4/7	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	52 6,5	8361,0	67,03	21,4	19,6	1,142	7321,33	1856,22	58,70
4/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	52 9,5	8405,2	69,51	21,1	20,0	1,117	7522,6	1850,27	58,51
5/6	20	50	49 5,5	7863,6	64,52	19,0	18,4	0,975	8065,2	2248,08	71,09
5/7	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	51 3	8141,3	68,39	21,4	19,0	1,140	7141,5	1897,06	59,99
5/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	49 8	7919,4	67,59	19,5	19,5	1,020	7761,0	1982,84	62,70
6/5	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	55 1,5	8755,1	73,54	20,0	19,9	1,050	8338,2	2066,39	65,34
6/6	20	50	54 8,5	8707,2	78,1	20,9	18,2	1,112	7828,1	2218,05	70,14
6/7	2·10 ⁻³	5·10 ⁻³	48 7	7728,7	67,57	19,8	18,8	1,042	7419,5	202,45	63,32
6/8	2·10 ⁻¹	5·10 ⁻¹	59 1	9385,0	76,41	21,7	19,8	1,156	8118,0	2027,09	64,13

A_2 fiind considerat ca standard, tensiunea nominală din vârful I_2 al secțiunii de rupere va fi:

$$\sigma_{3 \max} = \frac{F_{3 \max}}{Q_3}; \text{ and } \sigma_{3 \max} = \frac{F_{2 \max}}{Q_2}$$

În cazul unui material omogen, valorile σ_{\max} vor fi aproape sau chiar egale. În acest caz acest lucru poate fi scris:

$$\frac{F_{3 \max}}{Q_3} \approx \frac{F_{2 \max}}{Q_2}$$

și

$$\frac{F_{3,\max}}{Q_3/Q_2} = \frac{F_{3,\max}}{U_2/U_3} = \frac{F_{3,\max}}{q_3} \approx F_2 \quad (3.121)$$

Astfel împărțind forța F_3 , cu raportul maxim

$$q_3 = \frac{Q_3}{Q_2} = \frac{U_3}{U_2}.$$

Se obține o forță echivalentă cu $F_{2,\max}$, astfel comparabilă cu aceasta.

Este evident că cele două rezultate ale tenacității la rupere obținute cu lățimea

B a epruvetelor considerate $\frac{F_{3,\max}/q_3}{B_3^{3/2}}$ și $\frac{F_{2,\max}}{B_3^{3/2}}$ vor avea valori mai apropiate și comparabile.

Realizarea corecțiilor necesită cunoașterea raportului q_i a secțiunii de rupere diferită de cea a epruvetei standard (notată cu A_2). Aceasta este cea mai ușoară

utilizare a unei diagrame $q_i(h_i) = \frac{Q_i}{Q_2} = \frac{U_2(A_2)}{U_i(A_i)}$ care ar permite simpla determinare

a factorului $q_i(h_i)$ pentru toate valorile lui h_i în limitele h_{\min} și h_{\max} ale epruvetelor Chevron încercate.

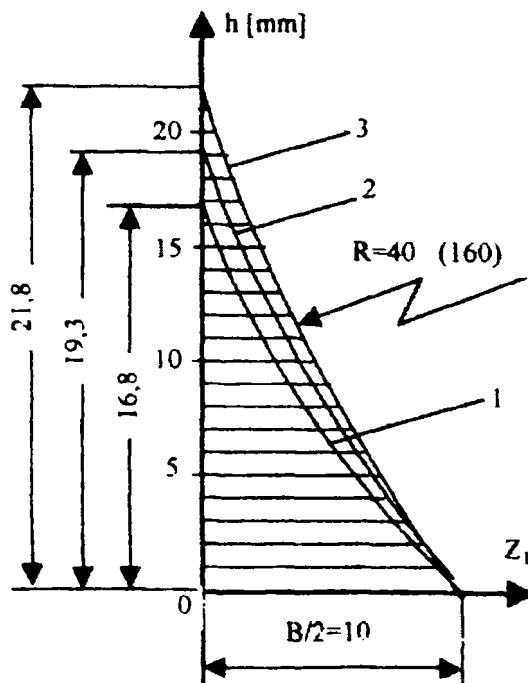


Fig. 3.33. Semi-secțiunile de rupere ale unor epruvete Chevron încercate

În acest scop, s-au trasat suprafețele laterale curbate ale epruvetelor Chevron (Fig.5.16) la scara 4:1, pentru 3 semi-secțiuni de rupere cu înălțimea minimă $h_1=16.8$ mm; înălțimea standard $h_2=19.3$ mm și înălțimea maximă $h_3=21.8$ mm. Toate cele trei suprafețe curbate au avut raza cde curbură $R=4 \times 40=160$. Semi secțiunile au fost împărțite în benzi înguste de 4 mm lățime, corespunzând cu 1 mm lățime în realitate, pentru obținerea calculului grafo-analitice.

Apoi, am determinat grafic următoarele caracteristici geometrice care intră în expresia caracteristicilor geometrice compuse U ; conform relației (10), respective suprafețelor totale A_1 , A_2 și A_3 , corespunzând semi secțiunilor și distanțelor centrelor lor de greutate la baza lor în Tabelul 3 și momentele cde inerție din Tabelul 4.

În continuare, s-au determinat distanțele e_{G_i} dela axa forței de tracțiune a epruvetelor până la centrul de greutate a secțiunii de rupere (Fig. 5.13b) și h_{2i} distanța centrului de greutate a acelorași secțiuni până la vârful I_{2i} secțiunii, care în timpul încercării a fost punctul cel mai încărcat. Cu dimensiunile determinate s-au calculat apoi caracteristicile geometrice compuse U_1, U_2 and U_3

$$\text{și factorii: } q_1 = \frac{U_2}{U_1}; q_2 = \frac{U_2}{U_1}; q_1 = \frac{U_2}{U_2} \text{ and } q_3 = \frac{U_2}{U_3}.$$

Distanța centrelor de greutate ale zonelor suprafețelor de rupere la axa O_{z_i} :

- a) Momentele de inerție ale secțiunilor de rupere alese în raport cu axa O_{z_i}

$$2 \sum_{i=1}^n I_{z_i}(A_i) = 2 \sum_{i=1}^n \frac{1}{12} b_{med} \cdot h^3 + 2 \sum_{i=1}^n C_i^2(b_i \cdot h)$$

$$2 \left(\frac{1}{12} 68,7 \cdot 1^3 + 2719,67 \right) = 5450,8 \text{ mm}^4$$

$$2 \left(\frac{1}{12} 75,6 \cdot 1^3 + 3841,8 \right) = 7696,2 \text{ mm}^4$$

$$2 \left(\frac{1}{12} 81 \cdot 1^3 + 4960,15 \right) = 9933,8 \text{ mm}^4$$

$$e_n = \frac{S_{x_i}(i)(y \cdot \Delta A_i)}{\sum \Delta A_i};$$

$$e_1 = \frac{2 \cdot 346}{2 \cdot 68,7} = 5,036 \text{ mm};$$

$$e_2 = \frac{2 \cdot 4296}{2 \cdot 75,6} = 5,675 \text{ mm};$$

$$e_3 = \frac{2 \cdot 502}{2 \cdot 81} = 6,197 \text{ mm};$$

- b) Momentele de inerție ale secțiunilor de rupere alese în raport cu axele centrelor de greutate proprii

$$A_1 \cdot I_{z0,1} = I_{z1}(A_1) - y_{G1}^2 \cdot A_1 = 5450 \cdot 8 - 5036 \cdot 2 \cdot 68,7 = 1966,16 \text{ mm}^4$$

$$A_2 \cdot I_{z0,2} = I_{z1}(A_2) - y_{G2}^2 \cdot A_2 = 7696,2 - 5,675^2 \cdot 2 \cdot 75,6 = 2826,71 \text{ mm}^4$$

Tabelul 3. Calcularea suprafețelor și poziției centrelor de greutate a celor trei secțiuni de rupere ale epruvetelor Chevron alese

No laturi	Semi-lungimea laturilor benzilor=length of the strips sides				Lungimea medie a benzilor=suprafața benzilor			y distanța medie the medium strip distance to axis O _{x1}	Strips static moment related to O _{x1} calc. with b ₁ [mm ³]	Strips static moment related to O _{x1} calc. with b ₂ [mm ³]	Strips static moment related to O _{x1} calc. with b ₃ [mm ³]
	b ₁ mm	b ₂ mm	b ₃ mm	No mediu de benzil	Cu contur no.1	Cu contur no.2	Cu contur No 3				
0	10	10	10	1	9,6	9,6	9,6	0,5 mm	4,8	4,8	4,8
1	9,2	9,2	9,2	2	8,65	8,7	8,75	1,5 mm	12,975	13,05	13,125
2	8,1	8,2	8,3	3	7,7	7,8	7,9	2,5 mm	19,25	19,5	19,75
3	7,3	7,4	7,5								
					A ₁ /2=68.7 Mm ²	A ₂ /2=75.6 mm ²	A ₃ /2=81.0 mm ²		S _{x1} (1)=346,0 mm ³	S _{x1} (2)=429,0 mm ³	S _{x1} (3)=502,0 mm ³

Tabelul 4 Calcularea momentului de inerție a suprafețelor celor trei secțiuni de rupere ale epruvetelor Chevron alese.

No. of medium strip	C _i -distance of medium strip to axis O _{x1}	C _i ² -distance square C _i	C _i ² ·ΔA _{i1} =C _i ² (b _{i1} -1)[mm ₄]	C _i ² ·ΔA _{i2} =C _i ² (b _{i2} -1)[mm ₄]	C _i ² ·ΔA _{i3} =C _i ² (b _{i3} -1)[mm ₄]
1	,5	,25	2,4	2,4	2,4
2	1,5	2,25	19,462	19,575	19,687
3	2,5	6,25	48,125	48,75	49,375
.
.
.
			2719,67	3841,80	4960,15

$$A_3 \cdot I_{z0,3} = I_{z1}(a_3) - y_{G3}^2 \cdot A_3 = 9933,8 - 6,197^2 \cdot 2 \cdot 84 = 3712,54 \text{ mm}^4$$

Distanța e_{G1}, e_{G2} și e_{G3}, determinarea e_{G1} = 45-10-h₁(A_i) Fig. 1b

$$e_{G1} = 35 - 5 \cdot 0,4 = 29,96 \text{ mm}; e_{G2} = 35 - 5 \cdot 0,67 = 29,33 \text{ mm}; e_{G3} = 35 - 6 \cdot 0,20 = 28,80 \text{ mm}$$

Determinarea caracteristicilor geometrice compuse U₁, U₂ și U₃ și ale factorilor q₁, q₂ și q₃.

$$U_1 = \frac{1}{A_1} + \frac{e_{G1} \cdot h_{2(1)}}{I_{z_0G_1}} = \frac{1}{2 \cdot 68,7} + \frac{29,96 \cdot (16,8 - 5,04)}{1966,16} = 0,18656$$

$$U_2 = \frac{1}{A_2} + \frac{e_{G2} \cdot h_{2(2)}}{I_{z_0G_2}} = \frac{1}{2 \cdot 75,6} + \frac{29,33 \cdot (19,3 - 5,67)}{2826,71} = 0,14796$$

$$U_3 = \frac{1}{A_3} + \frac{e_{G3} \cdot h_{2(3)}}{I_{z_0G_3}} = \frac{1}{2 \cdot 81} + \frac{28,80 \cdot (21,8 - 6,20)}{3712,54} = 0,12725$$

$$q_1 = \frac{U_2(A_2)}{U_1(A_1)} = \frac{0,14796}{0,18656} = 0,7931;$$

$$q_2 = \frac{U_2(A_2)}{U_2(A_2)} = 1;$$

$$q_3 = \frac{U_2(A_2)}{U_3(A_3)} = \frac{0,14796}{0,12725} = 1,1627;$$

Cu valorile caracteristicilor geometrice calculate, corespunzătoare celor înălțimi h_b , h_2 and h_3 , ale secțiunilor de rupere alese, în funcție de înălțimea secțiunilor de rupere pentru următoarele dimensiuni: A_i , suprafața secțiunilor de rupere; I_{z_0} , momentul de inerție a secțiunilor respective raportat la axa centrală G_{z_0} ; U_i , caracteristica geometrică compusă a secțiunilor de rupere; și factorul

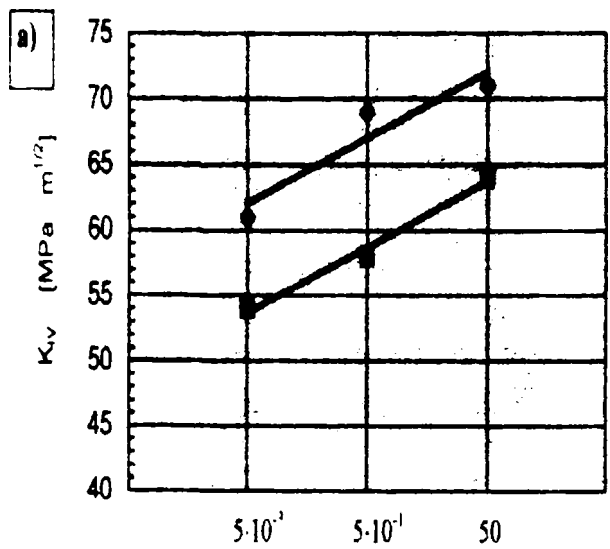
$$q_i = \frac{U_2(A_2)}{U_i(A_i)}.$$

Tenacitatea la rupere a fost determinată cu relația (5.15), unde în loc de forța maximă de rupere obținută experimental, noi am scris valoarea corectată a forței maxime $F_{\max} = F_{i,\min}/q_i$.

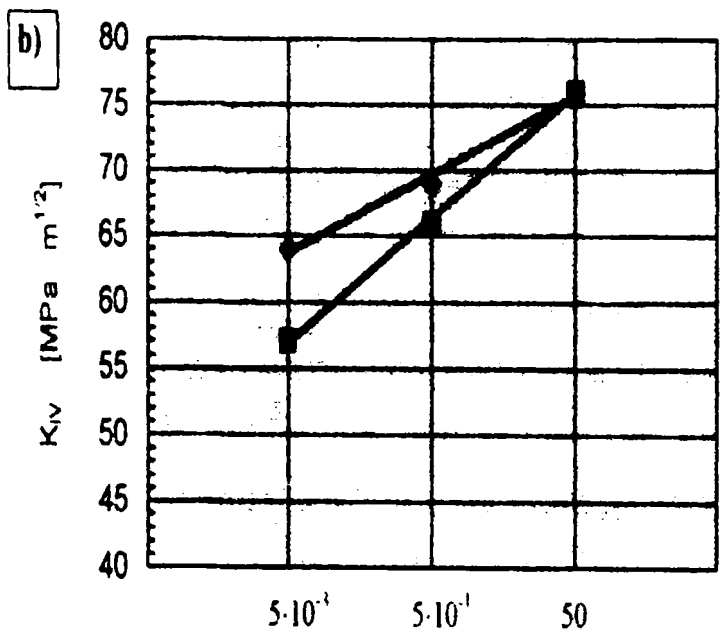
Rezultatele K_{IV} corectate sunt prezentate în Tabelul 2, coloanele 11 și 12 și în diagramele din Fig. 5.17, trasate cu linii întrerupte pentru valorile rezultatelor primare și cu linie continuă pentru valorile corectate.

În diagramele din Fig.5.17 rezultatele au fost prezentate separat de debitare a epruvetelor din Fig.5.14.

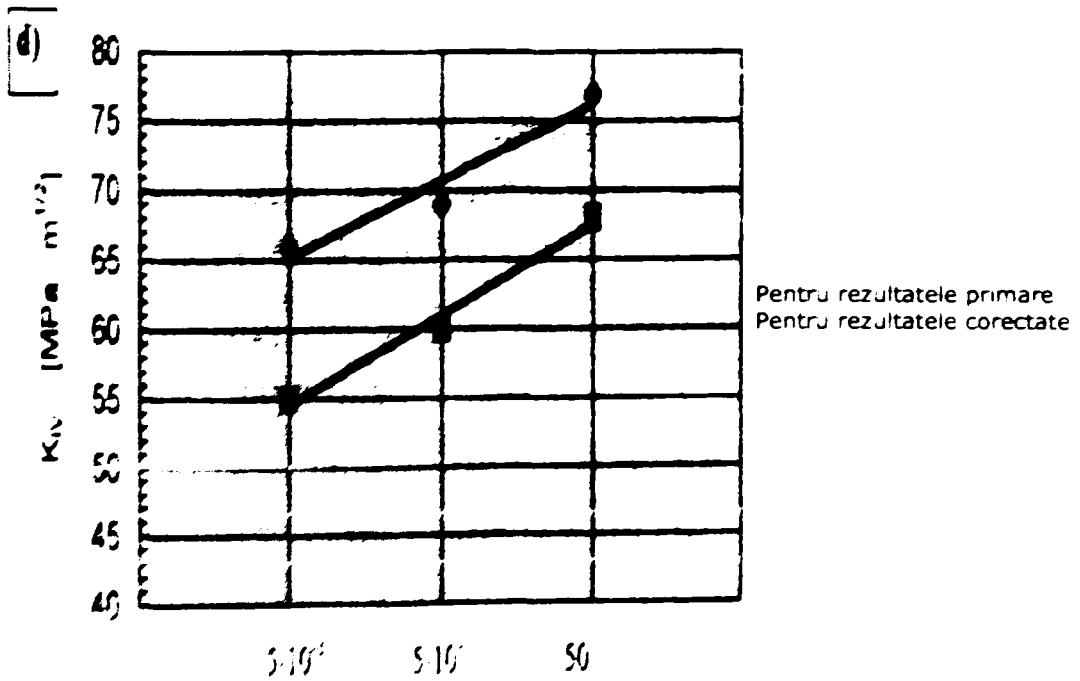
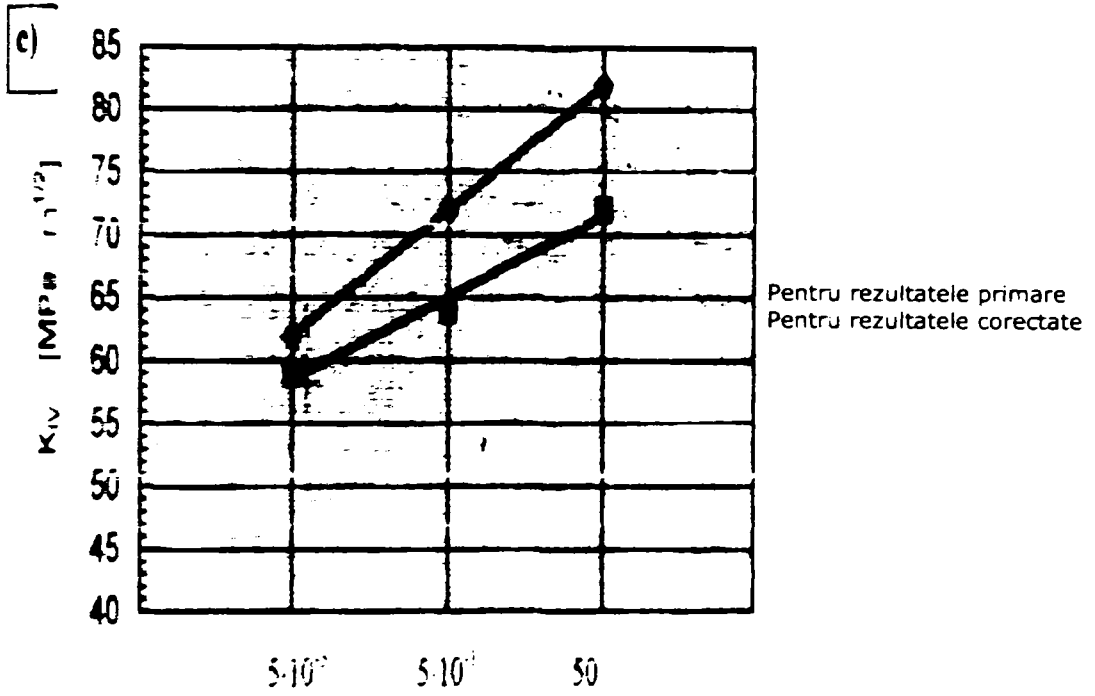
Pentru a trasa variația tenacității la rupere a oțelului testat în funcție de viteza de încărcare folosită la testarea epruvetelor, , relative puține la număr, am admis o variație liniară în reprezentarea semi logaritmică admisă (Fig. 3.34).



Pentru rezultatele primare
Pentru rezultatele corectate



Pentru rezultatele primare
Pentru rezultatele corectate



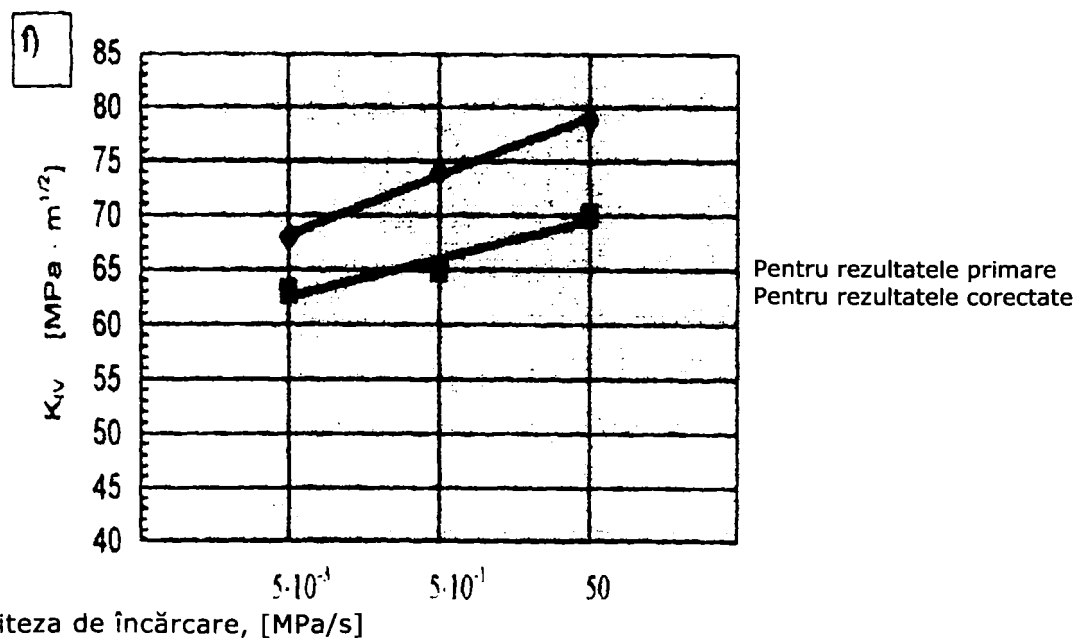
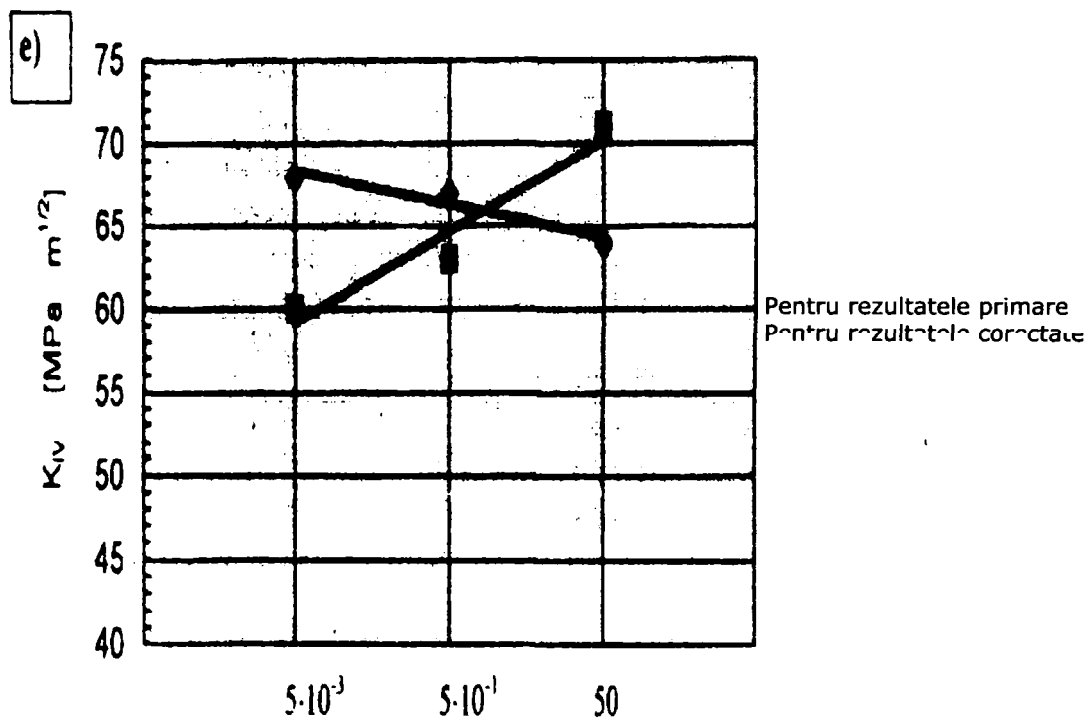


Fig. 3.34 Tenacitatea de rupere în funcție de viteza de încărcare

Concluzii

Din reprezentarea grafică prezentată în Fig. 3.34, pentru cele șase perechi de curbe ale variațiilor liniare ale tenacității de rupere determinate prin metoda Chevron pentru placa de oțel examintă, în funcție de viteza de încărcare la temperatură mediului ambiant de 20 °C, se desprind următoarele concluzii:

1. Tenacitatea de rupere K_{IV} crește – cu excepția direcției primare – cu viteza de încărcare – pentru toate celelalte direcții de înclinare ale epruvetei extrase din placă.

2. Tenacitatea de rupere depinde în mică măsură în funcție de direcția de laminare a axei longitudinale a epruvetelor Chevron încercate.

3. Se remarcă într-o mică măsură o creștere relativă a valorii tenacității de rupere ale epruvetelor corespunzătoare direcțiilor 2, 3, și 6 în comparație cu cele corespunzătoare direcțiilor 1 și 4. Fig. 3.31.

4. Se pune în evidență că procesul tehnologic de laminare a plăcii din oțel utilizate nu conduce cu certitudine la creșterea tenacității de rupere pentru o anumită direcție.

CAP. 4 COROZIUNEA MATERIALULUI TUBULAR ȘI PROTECȚIA ÎMPOTRIVA EFECTELOR ACESTEIA

4.1 Forme specifice de coroziune a materialului tubular

Materialul tubular se află în contact cu substanțe tensio-active, săruri minerale și gaze dizolvate în fluidul de lucru în diferite condiții de solicitări mecanice, temperatură și presiune, fiind supus la diferite procese de coroziune chimică, electrochimică și la fenomene de fragilizare și rupere, dependente de factori de material și de factori de mediu.

La materialul tubular pentru foraj și extracție se întâlnesc procese de coroziune datorate fluidului de foraj și de packer, gazelor naturale și de sondă, apelor sărate, soluțiilor injectate în sonde și coroziunii bacteriene.[2] [59] [81].

La conductele de colectare și transport se manifestă suplimentar și coroziunea în contact cu solul, coroziunea în apă și coroziunea atmosferică. Coroziunea poate fi uniformă (sau generalizată) când întreaga suprafață a metalului este supusă atacului și grosimea de perete este redusă cu viteză constantă. Aceasta este forma cea mai puțin periculoasă de manifestare. Coroziunea localizată, în special sub formă de ciupituri (pitting), reprezintă forma uzuală și cea mai periculoasă a coroziunii. Datorită conținutului ridicat de suspensii solide din fluidele vehiculate, acestea exercită și o intensă acțiune erozivă, favorizând fenomenele de coroziune prin îndepărtarea mecanică a produselor de coroziune și prin aportul continuu de agenți corozivi la suprafața metalului [2] [14] [15] [20] [25] [58] [59] [67] [81] [117].

Odată cu extinderea forajului de adâncime pentru sonde de țigeti și gaze din industria petrolieră au apărut probleme noi, generate de solicitările mecanice, presiunile și temperaturile asociate cu prezența unor medii deosebit de corozive. În general este vorba de soluții de săruri cu dioxid de carbon și hidrogen sulfurat care au și un puternic efect fragilizant, conducând la ruperi de tip întârziat, fără pierderi substanțiale de masă ale oțelului expus. În aceste condiții principalele mecanisme de degradare corosivă pot fi împărțite în două grupe, după cum fisurarea se produce în absența sau în prezența hidrogenului.

a. Fisurarea corosivă sub tensiune (FCT). Este simbolizată și SCC (Stress Corrosion Cracking), definind fenomenul de rupere fragilă prin fisurarea unui metal sub acțiunea combinată a tensiunilor de tracțiune și a coroziunii.

Mecanismul constă în dizolvarea anodică a unei faze și fisurarea pe calea activă de coroziune, fisurile putându-se propaga intercristalin sau transcristalin. Această formă de degradare se manifestă sub acțiunea fluidelor de foraj.

b. Acțiunea hidrogenului asupra oțelurilor expuse mediilor acide de hidrogen sulfurat (H_2S). Se manifestă sub două aspecte :

- fisurarea sub tensiune în mediu acid cu H_2S , simbolizată SSC (Sulfide Stress Cracking), definește fenomenul de rupere fragilă a oțelurilor cu limita de

curgere ridicată, chiar dacă acestea sunt rezistente la fenomenele obișnuite de coroziune.

- ruperea în trepte pe grosimea materialului, simbolizat HIC (Hydrogen Induced Cracking), reprezintă formarea unor umflături ("blisters"), provocate de acumularea hidrogenului la presiuni ridicate în defectele interne, la suprafața pieselor din oțel cu limita de curgere coborâtă

În ambele situații are loc absorbția hidrogenului degajat catodic în urma unor reacții de coroziune.

Indiferent de aspectul sub care se manifestă acțiunea hidrogenului, ea are ca efect, concomitent, și un proces de fragilizare a metalului. Asigurarea utilajului rezistent la acțiunile corozive și fragilizante menționate, în special în prezența hidrogenului sulfurat, implică un complex de măsuri în principal de ordin metalurgic și constructiv.

Metodele chimice de folosire a inhibitorilor de coroziune sunt neeficiente datorită temperaturilor mari atinse în sondele adânci, care degradează inhibitorii de coroziune.

4.2 Coroziunea garniturii de foraj și a burlanelor pentru tubaj

Degradările corosive ale garniturii de foraj și a burlanelor pentru tubaj sunt determinate de compoziția și caracteristicile fluidelor de lucru (fluide de foraj, fluide de packer), de condițiile întâlnite în formațiunile traversate temperatură și presiuni ridicate și de solicitările mecanice (eforturi, frecări cu pereții sondei, acțiuni ale solidelor din fluide etc.)

Principalii agenți corosivi din fluidele de foraj și de packer sunt: oxigenul, dioxidul de carbon, sărurile solubile (cloruri de sodiu și de calciu, sulfatul de calciu), acizii, hidrogenul sulfurat, derivații lignosulfonici și celulozici și bacteriile.

Hidrogenul sulfurat (H₂S) constituie componentul cel mai corosiv al fluidelor de foraj și de packer, conducând la fenomene de coroziune generalizată și pitting și la promovarea fragilizării și ruperilor de tip întârziat la valori ale sarcinilor mult inferioare rezistenței la rupere a materialului. Agresivitatea H₂S se manifestă în prezența apei în care se dizolvă cu ușurință.

Studiile făcute au arătat că fluidele de foraj pe bază de apă nu sunt recomandate în cazul sondelor cu temperaturi mai mari de 150 °C, în condițiile utilizării unor oțeluri cu rezistență ridicată și în prezența hidrogenului sulfurat și a dioxidului de carbon. În aceste cazuri se recomandă utilizarea unor fluide speciale pe bază de produse petroliere, caracterizate printr-o fază continuă uleioasă care previne desfășurarea proceselor electrochimice și care conduce la evitarea problemelor de coroziune, indiferent de temperatură.

Combaterea coroziunii garniturii de foraj se realizează prin următoarele metode:

a. Condiționarea fluidelor de foraj. Compoziția chimică a fluidelor determină caracterul acestora: acid (pH < 7) sau alcalin (pH > 7). Odată cu scăderea pH-ului crește atât viteza de coroziune cât și solubilitatea gazelor H₂S și CO₂ în fluid. Controlul pH-ului este metoda cea mai răspândită pentru reducerea corosivității fluidelor de fluaj, asigurând uzual o valoare minimă pH = 10, prin adăugarea unor materiale alcaline.

În prezența hidrogenului sulfurat pH-ul fluidelor trebuie să fie minimum 11 (uzual 11...13) pentru a asigura ca în locul H₂S să se formeze ionii sulfură-acidă, HS și sulfura S²⁻.

b. Îndepărtarea oxigenului. Se realizează prin metode fizice ca : dezaerarea termică, dezaerarea în vid și prin tratare cu substanțe averse de oxigen cum sunt sulfitul de sodiu, bioxidul de sulf, hidratul de hidrazină etc. Aceste substanțe pot fi introduse în conducta de aspirație a pompelor de noroi, reprezentând cea mai eficientă metodă de reducere a corosivității fluidelor de foraj.

c. Folosirea inhibitorilor de coroziune. Are aplicabilitate limitată, eficiența inhibitorilor fiind redusă de cantitatea mare de suspensii solide care absorb o mare parte din inhibitorii introduși. Se folosesc inhibitori anorganici și organici.

Ca inhibitori anorganici se folosesc cromatii, sulfatul de cupru și carbonatul de cupru, care acționează ca inhibitori anodici. Ca inhibitori organici se folosesc aminele peliculare, care au capacitatea de a se adsorbi la suprafața oțelului formând un film compact care împiedică pătrunderea apei și a agenților corosivi. Eficiența lor este mai mare atunci când sunt aplicate direct pe materialul tubular.

d. Îndepărtarea hidrogenului sulfurat. Se face prin metode fizice (aerare) și prin metode chimice.

Aerarea se realizează prin contact cu atmosfera în bazine de decantare prin injecție forțată de aer ș.a. Tratarea chimică se poate face cu substanțe oxidante (hipoclorit de sodiu, permanganat de potasiu, apă oxigenată ș.a.) care însă conduc la fenomene secundare de coroziune- sub formă de pitting. De aceea, în mod curent se aplică două categorii de substanțe pe bază de oxid de fier [13] [39] [43].

4.3 Coroziunea țevilor de extracție

Principala formă de manifestare a coroziunii la țevile de extracție o reprezintă coroziunea în mediu acid, generată de prezența CO₂, H₂O și a acizilor din substanțele de stimulare a sondelor.

Coroziunea datorată CO₂, Această formă de coroziune se manifestă atât în sondele de gaze cât și în cele de țitei, intensitatea procesului fiind determinată de următorii parametri:

presiunea, temperatura, conținutul în CO₂, compoziția apei de zăcământ, vitezele de curgere ș.a. Coroziunea datorată CO₂ este localizată și se manifestă sub formă de pitting sau arii atacate (caverne) având diferite dimensiuni. Atacul local decurge cu viteze de coroziune foarte mari, uzual de ordinul milimetrelor pe an.

Coroziunea țevilor de extracție în prezența H₂S. Aceasta conduce la două fenomene de degradare: fisurarea sub tensiune în mediu acid cu H₂S și coroziunea sub formă de caverne.

Fisurarea sub tensiune în mediu acid cu H₂S (SSC) are loc la temperaturi ambiante afectând în principal utilajul de la partea superioară a sondei. Coroziunea sub formă de caverne (crevase) se manifestă la partea inferioară a sondelor foarte adânci (peste 7000 m) sub efectul corosiv exercitat de asocierea factorilor H₂S, CO₂, ape de zăcământ cu conținut ridicat de săruri și temperatură ridicată, distrugând țevile de extracție în câteva luni. Se menționează că fenomenul este independent de compoziția și structura materialului, fiind încetinit de formarea peliculelor protectoare sau de folosirea inhibitorilor și accelerat de concentrație, viteza de curgere și temperatură (în special peste 150°C când efectul inhibitorilor este redus datorită evaporării).

Temperatura mărește sensibil viteza coroziunii astfel încât temperatura maximă ce poate fi admisă pentru apele sărate vehiculate este 50 - 55°C. Temperatura acționează nefavorabil și asupra eficacității inhibitorilor de coroziune, peste 50°C mulți inhibitori devenind ineficienți, iar alții impunând concentrații mai mari, devenind economici.

Combaterea coroziunii țevelor de extracție se realizează în principal prin trei metode: folosirea inhibitorilor de coroziune, înlocuirea oțelurilor nealiatate cu oțeluri aliate și reducerea vitezei ascensionale sub 10m/s.

4.4 Fisurarea corozivă sub tensiune

Sub acțiunea simultană a tensiunilor de tracțiune și a mediilor active, la materialul tubular de foraj-extracție, în special la sondele de mare adâncime și la conductele de colectare și transport (sub presiune), se produc ruperi bruște a căror cauză o reprezintă fisurarea corozivă sub tensiune. La oțeluri acest tip de rupere se manifestă în principal în prezența soluției de săruri și acizi de exemplu, în apă de mare, în cloruri în soluții obținute prin dizolvarea H_2S , CO_2 ș.a., intensitatea fenomenului depinzând de natura aliajului, de agresivitatea mediului și de nivelul tensiunilor.

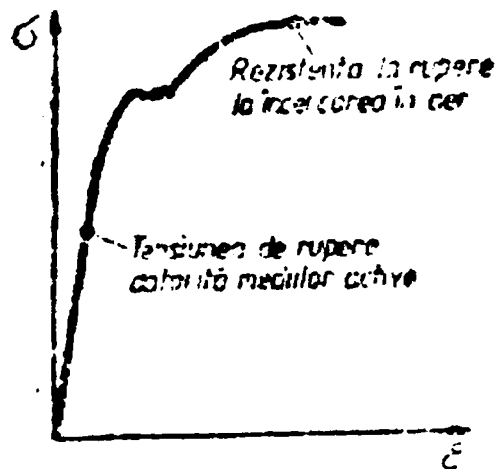


Fig. 4.1 Efectul SCC supra tensiunii de rupere

Fisurarea corozivă sub tensiune, simbolizată SCC (Stress Corrosion Cracking) reprezintă ruperea întârziată cu caracter fragil a materialelor ductile, prin fisurarea sub acțiunea combinată a unei solicitări statice de tracțiune inferioară limitei de curgere și a coroziunii. În procesul de fisurare corozivă sub tensiune are loc o reducere a caracteristicilor de rezistență și de tenacitate prin interacțiunea dintre procesele chimice și solicitările mecanice, ruperea având loc la o tensiune inferioară tensiunii de rupere în aer, așa cum se prezintă în figura 4.1. Coroziunea

sub tensiune reprezintă fenomenul, iar fisurarea corosivă sub tensiune este mecanismul de rupere.

Mecanismul fisurării sub tensiune. Constă din următoarele etape:

În urma coroziunii electrochimice localizate are loc un fenomen de dizolvare anodică pe calea activă de coroziune, formându-se fisuri a căror rază de vârf este de ordinul distanței interatomice. Fisurile se pot propaga intercristalin sau transcristalin în funcție de natura metalului.

Vârful fisurii exercită un puternic efect de concentrare a tensiunilor sub acțiunea cărora are loc o deformare plastică a zonei de la frontul fisurii. Această zonă deformată plastic și ecrusată poate iniția o rupere fragilă.

În funcție de geometria piesei, de nivelul solicitărilor, de caracteristicile materialelor ș.a., o fisură se poate propaga în regim dinamic pe întreaga secțiune transversală a piesei sau poate fi oprită, ca rezultat al redistribuirii vârfurilor de tensiune.

Extinderea fisurii sub acțiunea solicitării mecanice conduce la expunerea unor noi suprafețe metalice (marginile fisurii) atacului agentului care pătrunde prin capilaritate.

Atacul corosiv durează până când se realizează la vârful fisurii o stare de tensiune care poate produce deformarea plastică și avansul frontului fisurii. Acest ciclu este repetat până când survine ruperea, fie datorită propagării în regim dinamic a unei fisuri pe toată secțiunea transversală, fie ca urmare a slăbirii treptate a secțiunii transversale a piesei, fisurile dezvoltându-se într-un plan perpendicular pe direcția de solicitare. Mecanismul de rupere este determinat de forma și dimensiunile piesei, de nivelul tensiunilor și de natura mediului. Fenomenul de rupere se poate produce și în absența unor tensiuni exterioare, sub acțiunea tensiunilor interne datorate prelucrărilor mecanice și termice (sudare, deformare plastică la rece etc.);

- Aliajele de înaltă rezistență sunt mai susceptibile la S.C.C. decât cele de joasă tensiune. Mediile care determină S.C.C. sunt acelea în care fenomenele de coroziune sunt foarte localizate, având caracter selectiv, fără o coroziune semnificativă a suprafeței metalului. Mediul corosiv atacă electrochimic faza mai susceptibilă a aliajului, care se dizolvă anodic.

- Nivelul tensiunilor influențează prin aceea că creșterea tensiunii de tracțiune scade durata până la rupere. Pentru majoritatea aliajelor există o tensiune limită σ_{SCC} sub care ruperea nu se mai produce, rolul hotărâtor al tensiunilor în fenomenul SCC fiind astfel evident.

Tehnici de laborator pentru cercetarea corosivă sub tensiune. Inginerul de foraj este nevoit să aleagă materialul tubular care să asigure rezistența la fisurarea corosivă, sub tensiune în condiții de exploatare date. În acest scop pe baza rezultatelor încercărilor de laborator, el trebuie să estimeze comportarea în condiții reale de exploatare a oțelurilor preconizate. Exploatarea rezultatelor de laborator poate conduce la erori grave dacă încercările nu au fost corespunzător alese.

La fel și în cazul survenirii unei rupei în exploatare este necesară diagnosticarea acesteia prin cercetarea în laborator a susceptibilității materialului la fisurare corosivă sub tensiune în mediile de lucru.

Încercările trebuie să asigure obținerea unor aprecieri cantitative ale susceptibilității la SCC în condițiile unei durate acceptabile de încercare, cu reproducerea condițiilor din exploatare.

Parametrii cei mai importanți ai încercării sunt tipul solicitării și modul de aplicare a sarcinii, forma și dimensiunile epruvetelor, mediul de încercare și durata limită a încercării.

Condițiile de solicitare. În funcție de scopul urmărit, încercările la fisurare corosivă sub tensiune se realizează prin încărcarea epruvetelor la sarcină constantă sau la deformare constantă. Alegerea tipului de încercare se face în funcție de natura solicitărilor din exploatare și de scopul urmărit.

Tipul epruvetelor este determinat de scopul încercării și de forma materialului cercetat (țeava, placă, etc.)

Epruvetele pot fi lise sau cu creștătură. Acestea din urmă servesc la o evaluare mai exactă a susceptibilității la fisurare corosivă sub tensiune deoarece iau în considerație și efectul concentrării tensiunilor.

Concentratorii de tensiune se întâlnesc frecvent la materialul tubular sub formă de filete, raze de racordare, defecte ale îmbinărilor sudate, defecte superficiale provocate de manevră, ș.a.

În acest scop se folosesc epruvete cu creștături și epruvete prefisurate cu ajutorul cărora pe baza conceptelor mecanicii ruperii materialelor, se determină parametrii care caracterizează propagarea fisurilor în prezența mediilor active. Folosind epruvete prefisurate încercate la diferite intensități ale tensiunii exprimate prin factorul de intensitate a tensiunilor K_I se determină factorul critic de intensitate a tensiunilor în condițiile de mediu cercetate $K_{I_{SCC}}$ sub care fenomenul nu se produce (figura 4.2). Această valoare reprezintă un parametru de proiectare . [16], [73], [83].



Fig. 4.2. Dependenta dintre factorul de intensitate a tensiunilor și durata până la rupere

Mecanica ruperii materialelor oferă pentru epruvetele crestate o bază analitică de apreciere a stării de tensiunii la vârful fisurii, pe baza căreia se poate aprecia comportarea la fisurare a structurilor reale în funcție de mărimea defectelor (fisurilor) inițiale și de nivelul tensiunilor.

Mediul de încercare în condiții de laborator se reproduce, de regulă mediul din exploatare, o atenție deosebită acordându-se reproducerii pH-ului, concentrației și conținutului de oxigen. Totuși pentru a obține ruperea într-un timp acceptabil, în mod frecvent condițiile experimentale de mediu sunt mai severe decât cele din exploatare. Uneori mediul este astfel ales încât să evidențieze efectul unui anumit agent agresiv.

Criterii de apreciere a susceptibilității la S.C.C. Aprecierea susceptibilității unui material la fisurare corosivă sub tensiune se bazează pe încercările experimentale menționate, cu determinarea tensiunilor limită de rezistență la fisurare corosivă sub tensiune și a duratelor până la rupere. Tensiunea limită de rezistență la SCC, σ_{SCC} .

reprezintă valoarea maximă a tensiunii pentru care nu mai survine ruperea epuvelor după menținerea o perioadă de timp determinată în mediul corosiv. Prin încercarea unui lot de epruvete la diferite tensiuni și înregistrând duratele până la rupere în mediul activ se obține diagrame de tipul curbei Wöhler care permit determinarea σ_{SCC}

Factorul critic de intensitate a tensiunilor K_{ISCC} reprezintă valoarea limită a factorului K_I pentru care viteza de propagare a fisurii materialului expus mediului tinde către zero.

Indicele de fragilizare, I_f , este un parametru ce caracterizează efectul fragilizant al mediului asupra oțelului (în particular efectul exercitat de hidrogen), exprimat prin gradul în care este afectată gătuirea la rupere.

$$I_f = \frac{Z_{nc} - Z_c}{Z_{nc}} 100 [100] \quad (4.1)$$

unde Z_{nc} este gătuirea la rupere a oțelului nesupus mediului corosiv, iar Z_c , este gătuirea la rupere a oțelului supus acțiunii mediului corosiv. Se vede că indicele de fragilizare nu ține seama de efectul tensiunilor.

Prevenirea coroziunii sub tensiune (SCC). Metodele de evitare a SCC sunt constructive, tehnologice și de exploatare. Metodele constructive cuprind alegerea corespunzătoare a materialelor unor forme constructive și dimensiuni care să conducă la reducerea tensiunilor (evitarea concentratorilor de tensiuni).

Metodele tehnologice urmăresc reducerea tensiunilor reziduale prin aplicarea unor tratamente termice de detensionare. De asemenea, introducerea unor tensiuni de compresiune în strat prin rulare la rece sau prin ecrusare cu jet de alică are efecte deosebit de favorabile asupra rezistenței la SCC. Ca metodă de exploatare se recomandă protecția catodică, curentul catodic necesar pentru protecție fiind în funcție de nivelul tensiunilor.

4.5 Acțiunea hidrogenului asupra oțelurilor expuse mediilor acide cu hidrogen sulfurat.

Expunerea pieselor din oțel mediilor acide cu H_2S conduce atât la promovarea fenomenului de coroziune electrochimică prezentate anterior cât și la apariția hidrogenului în stare atomică la suprafața piesei. Mediile de lucru ale materialului tubular de foraj-extracție favorizează fenomenele de absorbție fizică a hidrogenului la suprafața piesei difuzia în masa metalului și acumularea sub formă moleculară în defectele interioare, proces cunoscut sub denumirea de ocluzia hidrogenului.

Prezența H_2S în mediu acid, chiar și în cantități foarte mici, conduce la creșterea agresivității mediului prin formarea ionilor de hidrogen și prin accelerarea adsorbției acestora la suprafața metalului.

Prin mediu acid cu H_2S se înțelege un mediu care conține apă și hidrogen sulfurat și are pH-ul mai mic decât 7.

Utilajele vor fi alese pe baza prescripțiilor normelor de asigurare a rezistenței la SCC când condițiile de mediu din exploatare se încadrează în cazurile prevăzute [35].

Principalele aspecte sub care se manifestă acțiunea hidrogenului asupra oțelurilor expuse mediilor acide cu H_2S sunt:

- fragilizarea materialului;
- fisurarea sub tensiune ;
- ruperea în trepte pe grosimea materialului și formarea unor umflături la

suprafața materialului (blistering).

Fragilizarea datorită hidrogenului, care determină și fenomenul de rupere prin fisurare sub tensiune, este produsă atât de hidrogenul aflat în stare atomică în rețea cât și de hidrogenul ocluzionat. Hidrogenul se poate însă elimina din oțeluri prin difuzie, concentrația sa în piesă scăzând progresiv, începând cu momentul scoaterii piesei din mediul agresiv. În consecință efectul fragilizant al hidrogenului poate avea caracter ireversibil sau reversibil, după cum s-au produs sau nu microfisuri în material înainte de eliminarea hidrogenului din metal. [59]

Influența temperaturii, se manifestă prin dispariția fragilității la temperaturi joase și înalte, efectul fragilizant fiind maxim la temperatura ambiantă pentru oțelurile cu rezistență ridicată.

Influența vitezei de solicitare se manifestă prin faptul că efectul fragilizant crește odată cu scăderea vitezei de solicitare iar la viteze mari de solicitare fragilitatea nu se manifestă. Ca urmare hidrogenul nu influențează reziliența materialului, iar temperatura de tranziție nu este deplasată spre valori mai ridicate.

Influența duratei de solicitare se manifestă prin faptul că piesele exploatate în prezența mediilor agresive se rup după un interval de timp la o valoare a solicitării inferioară rezistenței la rupere a materialului. Este un proces de rupere întârziată cu caracter de rupere fragilă bruscă. Din cele de mai sus rezultă că studiul fragilizării oțelurilor datorită hidrogenului se poate efectua prin încercarea la tracțiune a epruvetelor expuse mediilor acide cu H_2S . Aspectul curbei caracteristice, valoarea rezistenței la rupere și indicele de fragilizare (rel.4.1.) reprezintă principalele criterii de apreciere a efectului fragilizant al mediului.

Explicarea fenomenului de fragilizare datorită hidrogenului nu este încă pe deplin lămurită.

Ruperea prin fisurare sub tensiune în mediu acid cu H_2S este o consecință a efectului fragilizant al hidrogenului, având caracter de rupere secvențială întârziată, descris anterior. Variația duratei până la rupere pentru un anumit material și o anumită concentrație de hidrogen, în funcție de nivelul tensiunilor are alura prezentată în fig.4.3.

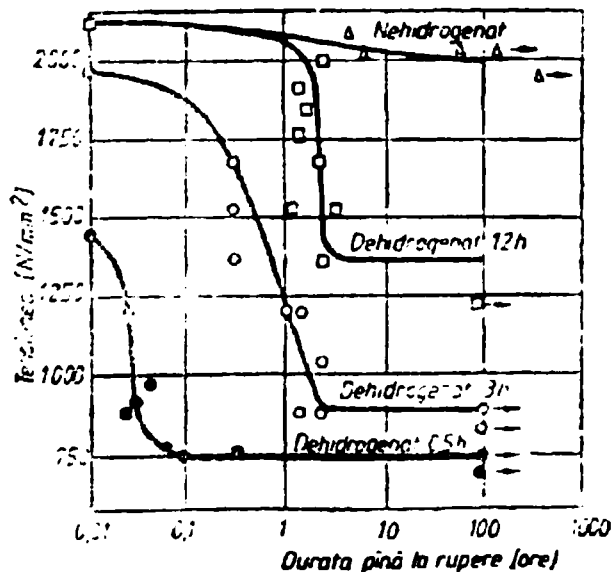


Fig. 4.3.

Curbele tensiune-durată până la rupere pentru oțelul echivalent cu 34 MoCrNi16 (cu 2,1% Ni) dehidrogenat la 148°C, cu durata de timp diferită specifică oțelurilor, evidențiind două caracteristici importante ale procesului:

- ruperea are loc la o valoare a tensiunii inferioară rezistenței la rupere a materialului;
- se evidențiază o tensiune minimă sub care ruperea nu se mai produce, definind limita de rezistență σ_{SCC} (Sulfide Stress Cracking)
- fisurarea sub tensiune în medii acide cu H_2S este influențată de următorii factori: concentrația hidrogenului în mediu, pH-ul, temperatura, limita de curgere a materialului, gradul de triaxialitate al tensiunilor contradictorii de tensiuni, structura materialului, tratamentele termice aplicate și compoziția chimică a materialului.

Influența concentrației hidrogenului în mediu. Gradul de fragilizare cu creșterea concentrației în hidrogen, ruperea întârziată apărând chiar la concentrații foarte mici. Tratarea în vid a oțelurilor nu asigură întotdeauna eliminarea hidrogenului, până la nivelul care evită fragilizarea.

De exemplu, un oțel cu 0,33% C, 2,1% Ni, = 0,94% Cr și 0,22% Mo echivalent oțelului 34 MoCrNi16 cu conținut de nichel puțin depășit având după topire în vid un procent, de hidrogen de 0,4...0,8 ppm, a suferit fenomenul de rupere întârziată într-un interval de tensiuni cu 200 N/mm² sub valoarea rezistenței la tracțiune. În figura 4.3 este prezentată variația susceptibilității la fisurarea sub tensiune în funcție de concentrația de hidrogen, ruperea survine la sarcini din ce în ce mai mici, durate din ce în ce mai reduse. Prin eliminarea completă a hidrogenului din metal fragilitatea dispare. Ca urmare, există o concentrație critică, peste care fenomenul de fragilizare este ireversibil datorită formării microfisurilor.

Influența pH-ului mediului. Tendința spre SSC descrește cu creșterea pH-ului mediului, iar peste valorile 6...9 metalele devin rezistente la SSC, în funcție de condițiile specifice de solicitare. Controlul pH-ului reprezintă o metodă eficientă de prevenire a SSC în cazul elementelor garniturii de foraj, deoarece acestea sunt executate din oțeluri cu rezistență ridicată, susceptibile la SSC. Din contră, la echipamentul de extracție și transport, unde pH-ul nu poate fi influențat, se impune folosirea oțelurilor rezistente la SSC.

Influența temperaturii. Rezistența la SSC crește odată cu creșterea temperaturii. Ca rezultat, multe oțeluri susceptibile la SSC la temperatura ambiantă devin rezistente la temperaturi ridicate. În figura 4.4 este prezentată variația rezistenței la fenomenul SSC (exprimată procentual) în funcție de temperatură [30]

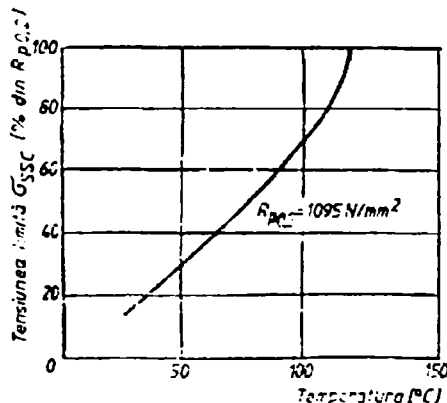


Fig.4.4 - Influența temperaturii asupra rezistenței la SSC.

Influența limitei de curgere, a gradului de triaxialitate a tensiunilor și a concentratorilor de tensiuni. Fragilitatea crește odată cu creșterea limitei de curgere a unui aliaj și a gradului de triaxialitate a tensiunilor. În piesele metalice zonele cu triaxialitate maximă se găsesc în vecinătatea creștăturilor și a defectelor metalului, care au totodată și un efect de concentrare a tensiunilor. Acestea vor fi și zonele în care e favorizată acumularea prin difuziune a hidrogenului. Crește astfel tendința de fisurare sub tensiune. Ca urmare filetele utilajului petroliere cu raza de fund mică vor prezenta susceptibilitate maximă la rupere prin SSC.

Influența compoziției aliajului. Influența compoziției chimice este esențială din punct de vedere al comportării la SSC fiecare element component al oțelului având o influență complexă: pe de o parte determină structura oțelului iar pe de altă parte, pentru o structură dată el modifică proprietățile chimice. Spre exemplu un oțel slab aliat cu nichel este sensibil la SSC. Crescând conținutul de nichel structura devine astenică și oțelul devine rezistent la SSC. În general, se pot face unele aprecieri de ordin general cu privire la influența elementelor de aliere asupra oțelurilor utilizate la materialul tubular petrolier. [59] [81]

Carbonul conduce la creșterea caracteristicilor de rezistență astfel încât oțelurile cu procentul de carbon mai ridicat sunt mai susceptibile la SSC decât cele cu puțin carbon.

Cromul micșorează difuzia hidrogenului în fier și astfel mărește rezistența la fisurare în medii cu H_2S . În plus menține caracteristici de rezistență ridicate la creșterea temperaturii de revenire necesară obținerii structurii sorbitice.

Molibdenul mărește rezistența la SSC, a oțelurilor de îmbunătățire printr-un efect similar cromului.

Sulfur și fosforul au efecte negative asupra rezistenței la SSC. Niobiul și vanadiul în concentrații mici au efecte favorabile asupra rezistenței la SSC.

Manganul reduce rezistența la SSC. La fel și siliciul.

Soluția principală de evitare a ruperilor constă în utilizarea unui oțel insensibil la SSC, dar se folosește și soluția reducerii agresivității mediului. Selecția materialelor rezistente la SSC în industria de petrol și gaze implică alegerea compoziției chimice, a tratamentului termic și limitarea durității.

Pentru asigurarea rezistenței la SSC se recomandă ca oțelurile să fie prelucrate la cald sau tratate termic și se stabilește o limită superioară pentru rezistența la rupere, exprimată uzual prin intermediul durității Rockwell.

Materialele rezistente la SSC la temperatura ambiantă sunt oțelurile prelucrate la cald sau tratate termic din clasele de oțeluri nealiatate (carbon) și slab aliate, oțeluri inoxidabile și aliaje speciale.

Duritatea oțelurilor nealiatate și slab aliate este în mod curent limitată la valoarea 22 HRC cu excepția oțelurilor călite și revenite din clasa Cr-Mo.

Ruperea în trepte sub acțiunea hidrogenului. Această rupere simbolizată HIC (Hydrogen Induced Cracking) denumește fenomenul de rupere sub acțiunea presiunilor exercitate de hidrogenul acumulat sub formă moleculară în zonele cu segregării de incluziuni nemetalice în oțelurile deformate plastic la cald. Fisurarea este inițiată la incluziunile nemetalice, în primul rând sulfuri, care sunt alungite în lungul direcției de deformare la cald. Prin unirea acestor fisuri are loc ruperea, cu aspect caracteristic de rupere în trepte. În cazul în care procesul este inițiat lângă suprafața metalului și materialul este ductil, pe suprafața metalului se formează " umflături " caracteristice, fenomen cunoscut sub denumirea de " blistering ".

Spre deosebire de fisurarea sub tensiune SSC, specifică oțelurilor de înaltă rezistență, ruperea prin HIC poate avea loc la oțelurile cu rezistență atât înaltă cât și

joasă și nu necesită existența unei stări de tensiuni. Ruperea în trepte sub acțiunea hidrogenului (HIC) s-a semnalat în conducte și vase separatoare (sub presiune) fabricate din table laminate la cald, fiind întâlnită cu precădere în oțelurile calmate cu aluminiu, supuse unor grade mari de deformare în procesul de prelucrare (de exemplu țevile sudate fabricate din table laminate la cald). Fenomenul nu s-a semnalat în conducte executate din țevi laminate [117], Singura metodă practică pentru depistarea degradărilor prin HIC în exploatare o reprezintă controlul cu ultrasunete.

Metodele pentru reducerea sau eliminarea ruperilor prin HIC sunt : utilizarea oțelurilor semi-calmate cu siliciu, folosirea oțelurilor cu conținut redus de sulf (sub 0,003 % microalierea cu cupru sau cu pământuri rare, folosirea acoperirilor cu rășini sintetice și răcirea rapidă după laminare, care asigură o distribuție fină a martensitei.

Alierea cu cupru are efect favorabil prin limitarea cantității de hidrogen absorbit din mediu. [21]

4.6 Coroziunea datorită CO₂

Această formă de coroziune apare atât în sondele de gaze cât și în cele de țiței având caracter puternic localizat și manifestându-se sub formă de pitting și caverne de diferite dimensiuni. Atacul localizat decurge cu viteze de coroziune foarte mari, de ordinul milimetrilor pe an. În sondele de gaze, coroziunea datorită CO₂ se manifestă în special la partea superioară a țevilor de extracție deoarece, prin scăderea temperaturii și presiunii de la talpa sondei spre suprafață, vaporii de apă condensează iar CO₂ se dizolvă formând acidul carbonic care conduce la coroziuni locale foarte puternice. S-a constatat practic că la viteze ascensionale de peste 15m/s apar degradări pe suprafața interioară a țevilor de extracție datorită fenomenelor de cavitație. În prezența CO₂ și a apei, în discontinuitățile produse prin cavitație au loc fenomene de coroziune foarte intense. Oțelurile nealiate C75 sau L80, destinate mediilor acide cu H₂S, se corodează în câteva luni. [11] [21] [83]

Intensitatea procesului de coroziune, este determinată de următorii factori: presiunea, temperatura, conținutul de CO₂, compoziția apei de zăcământ, vitezele de curgere ș.a.

Mecanismul coroziunii în prezența CO₂ îl reprezintă coroziunea electrochimică datorată acidizării apei de zăcământ prin dizolvarea CO₂ sub presiune, proces influențat puternic de alcalinitatea apei [21]. Diferite aspecte analizate au evidențiat complexitatea fenomenelor de coroziune în prezența CO₂, datorită numeroșilor factori de influență insuficient clarificați și care variază atât de la o sondă la alta cât și pe înălțimea aceleiași sonde.

Combaterea coroziunii în CO₂ se face utilizând țevi de extracție din oțeluri înalt aliate pentru a asigura pasivitatea electrochimică și reducând vitezele ascensionale sub 10 m/s. Ca oțeluri aliate se utilizează oțeluri martensitice cu 13 % Cr, oțeluri cu 9% Cr și 1 % Mo și oțeluri austenitoferitice (duplex). De asemenea, îmbinările filetate trebuie să asigure etanșeitatea, pentru evitarea accesului agenților corosivi în zona filetată, prin alegerea tipului constructiv și a lubrifiantului corespunzător.

4.7 Coroziunea conductelor de colectare și transport

Conductele pentru transportul produselor de la sonde la parcul de separatoare sunt supuse, sub acțiunea fluidelor vehiculate sau a agenților corosivi din mediul înconjurător, atât proceselor de coroziune, cât și fenomenelor de fisurare

corozivă sub tensiune, fragilizării și ruperii datorită hidrogenului și ruperii prin fisurare sub tensiune în medii acide cu H_2S .

Coroziunea provocată de produsele vehiculate are aceleași caracteristici cu cele prezentate pentru țevile de extracție menționate la paragraful 4.3., condițiile de presiune și temperatură fiind mai moderate la conductele de transport. Se remarcă faptul că, deoarece traseul conductelor nu este rectiliniu, apar fenomene intense de coroziune în zona curbelor, la raza exterioară, datorită vitezelor mari de circulație și a fenomenelor de eroziune.

La conductele îngropate în sol și protejate catodic s-au semnalat fenomene de fisurare corosivă sub tensiune (SSC) care au condus la accidente grave, datorită alcalinității dezvoltate la peretele exterior al conductei sub acțiunea protecției catodice și polarizării conductei într-un domeniu de potențial favorabil SSC. Până în prezent nu s-au semnalat astfel de avarii la conductele submarine.

La conductele îngropate în sol fenomenul SCC este controlat de nivelul tensiunilor, temperatura, potențialul conductei în raport cu solul și natura chimică a mediului înconjurător.

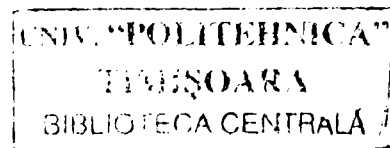
Cercetările de laborator și ale ruperilor în exploatare au evidențiat că soluțiile slab alcaline de carbonat și bicarbonat de sodiu reprezintă principalul mediu care determină SCC la conductele protejate catodic. Carbonatul și bicarbonatul de sodiu se formează în urma reacției dintre dioxidul de carbon, degajat de sol sau prin degradarea materialelor de protecție a conductei și hidroxidului de sodiu produs la suprafața conductei sub acțiunea curentului de protecție catodică. [33] Fenomenul este localizat în zona discontinuităților punctiforme din materialul de acoperire și mai rar, în zona porțiunilor neprotejate prin acoperire ale conductei. Starea de tensiuni se datorează presiunii interioare, tensiunilor remanente introduse prin îndoirea la rece și compresiunii datorită dilatărilor împiedicate. Ruperile semnalate s-au produs la tensiuni reprezentând (0,60...0,75) $R_{\sigma_{02}}$, valorile periculoase sunt - 550 ...750 mV față de un electrod de referință argint clorură de argint în raport cu care potențialul de protecție catodică este - 800 mV.

Probabilitatea fisurării corosive sub tensiune (SCC) la conductele submarine este mai mică decât la conductele terestre datorită faptului că formarea unui mediu alcalin, în zonele cu stratul protector degradat conduce la precipitarea carbonaților, scăzând concentrația acestora în apa de mare, evitându-se astfel SCC. Totodată această formă de coroziune este evitată și datorită faptului că normele privind acoperirile protectoare anticorrosive sunt mult mai severe la conductele submarine.

4.8 Protecția împotriva coroziunii

O clasificare a metodelor de protecție împotriva coroziunii a metalelor și aliajelor după mecanismul prin care se acționează, cuprinde următoarele 5 grupe de metode. [63]

- Protecția prin tratarea mediului adiacent metalului pentru a-i micșora agresivitatea;
- Protecția prin micșorarea intensității de desfășurare a proceselor catodice și / sau anodice;
- Protecția prin metode electrochimice;
- Protecția prin acoperirea (tratarea) suprafețelor;
- Combaterea coroziunii conductelor metalice subterane



4.8.1 Protecția prin tratarea mediului adiacent metalului pentru a-i micșora agresivitatea

Cuprinde numeroase proceduri. De exemplu îndepărtarea oxigenului și a bioxidului de carbon din apele de alimentare a cazanelor este un procedeu foarte folosit pentru micșorarea vitezei de coroziune a cazanelor și a restului instalațiilor anexe.

Folosirea inhibitorilor de coroziune este la fel un procedeu important din această grupă de metode de tratare a mediului adiacent metalului expus coroziunii. Inhibitorii de coroziune sunt substanțe care adăugate mediului adiacent duc la scăderea însemnată a vitezei de coroziune, față de situația în care lipsesc.

Condițiile de utilizare, domeniul și concentrația la care este eficace fiecare inhibitor sunt specifice. Cromații se utilizează mai ales în cazul sistemelor de răcire și a motoarelor cu ardere internă mai ales când acestea sunt construite dein aliaje feroase.

Azotitul se utilizează mai ales ca adaos la emulsiile pentru uzinarea oțelurilor și în industria petrolieră pentru protecția sistemelor de transport a acestor produse în procesul de prelucrare.

Inhibitorii catodici cuprind substanțe care în condițiile desfășurării proceselor de coroziune pot produce pe suprafața zonelor catodice filme sau straturi insolubile, izolând astfel zonele catodice și împiedicând desfășurarea proceselor catodice. Pentru fier și aliajele sale sunt utile substanțe ca $ZnSO_4$, $BaCl_2$, $Ca(CHO_3)_2$, săruri ale arsenului, bismutului, etc.

Inhibitorii de absorbție sunt în general substanțe organice care se absorb pe suprafața metalului pe zonele anodice și / sau pe cele catodice ducând la scăderea vitezei de coroziune.

Au fost propuse și utilizate foarte multe substanțe organice în calitate de inhibitori de coroziune ca de exemplu: - Săruri de amoniu; - Aminoacizi naturali sau sintetici; - Aldehyde;

4.8.2 Protecția prin micșorarea intensității de desfășurare a proceselor catodice și / sau anodice.

Micșorarea vitezei de coroziune a unui metal sau aliaj, adică îmbunătățirea rezistenței la coroziune, se poate realiza fie reducând intensitatea de desfășurare a proceselor catodice ce au loc în timpul coroziunii, fie reducând intensitatea de desfășurare a procesului anodic de ionizare a metalului. Cum cele două procese sunt cuplate și se petrec concomitent în timp, deși separat în spațiu reducerea desfășurării unui proces atrage după sine reducerea intensității de desfășurare a celuilalt.

S-a constatat că solubilitatea maximă a cuprului în oțel este de 1,4% la temperatura ambiantă și numai de 0,35% la 650°C. Totuși metalurgii sunt de acord că un conținut de Cupru de 0,2 - 0,3 % în oțel duce la scăderea considerabilă a vitezei de coroziune în oțel mai ales când este vorba de coroziunea cu depolarizare de hidrogen. Din acest motiv toate oțelurile de construcții conțin cupru, în general în jur de 0,2-0,3 %.

O importanță deosebită o au aliajele fier - crom. Fierul formează cu cromul un șir de soluții solide în care cromul are o mare tendință de pasivare. Prin aceasta

se înțelege creșterea pronunțată a rezistenței la coroziune a aliajului respectiv format.

Despre un metal sau aliaj se spune că este pasiv atunci când, în anumite condiții (compoziție a mediului de lucru, temperatură, el se comportă, din punct de vedere electrochimic, aproape ca un metal nobile și nu este atacat. În cazul cromului un singur strat de oxid este suficient pentru a se pune în evidență această stare, deosebit de importantă în lupta împotriva coroziunii.

De un deosebit interes este faptul că fierul formează cu cromul aliaje cu tendința spre pasivare în salturi numai când cromul conține valori de 12,5; 25 și 37,5% atomice).

În prezent se produc mari cantități de aliaje ce au la bază fier - crom, cu multe alte adaosuri (în special nichel, titan etc.) care se cunosc în practică sub denumirea generală de oțeluri inoxidabile.

4.8.3 Protecția împotriva coroziunii prin metode electrochimice.

Metodele electrochimice de protecție împotriva coroziunii se bazează pe schimbarea potențialului metalului (instalației) de protejat în mediul dat, prin polarizare.

Polarizarea poate fi atât catodică cât și anodică, adică potențialul instalației de protejat poate fi deplasat fie spre valori negative față de potențialul pe care-l avea când se coroda, fie spre valori pozitive.

După sensul în care se face polarizarea, se realizează o protecție catodică sau anodică, iar după modul în care se asigură curentul necesar pentru a atinge potențialul dorit, se realizează o protecție cu curentul exterior, respectiv o protecție catodică cu anod de sacrificiu și protecție anodică cu catod protector.

Protecția catodică cu curent exterior este cea mai răspândită metodă de protecție. Practic nu există conducte magistrale îngropate pentru transportul produselor petroliere și al gazelor naturale, etc. să nu beneficieze de ea. Poate fi aplicată în orice mediu și pentru protecția oricărui metal sau aliaj cât și pentru faptul că viteza de coroziune se poate reduce la 0.

Singurul neajuns este imposibilitatea de a folosi direct o anumită formulă de calcul pentru determinarea potențialului metalului protejat. În acest caz potențialul minim până la care trebuie polarizată instalația pentru a fi protejată rămâne o mărime stabilită experimental.

Densitatea de curent necesară pentru atingerea acestui potențial minim de protecție este în funcție, desigur de mediul în care se găsește metalul. Asemenea valori nu se pot calcula și se stabilesc experimental. Unele valori orientative se dau și în lucrări de specialitate.

4.8.4 Protecția împotriva coroziunii prin acoperirea suprafețelor de protejat

Aceasta cuprinde toate procedeele prin care la suprafața metalului ce trebuie protejat se realizează un strat cu rol de protecție.

Principalele straturi care pot oferi protecție împotriva coroziunii sunt:

- Acoperiri metalice ca: zincare, cadmiere, nichelare, cuprare, cromare etc.

Unele acoperiri care sunt realizate din metale mai puțin nobile decât metalul de bază, cum ar fi zincul, zincul pe oțel protejează după un mecanism analog protecției catodice cu anod de sacrificiu. Chiar și metalele acoperitoare mai nobile decât

metalul de bază pot conferi protecție în anumite limite. De exemplu, în cazul unei acoperiri metalice care prezintă pori, coroziunea metalului de bază va avea loc în aceste zone. Dacă porii stratului acoperitor se umplu cu produse de coroziune procesul de coroziune se reduce foarte mult sau chiar poate înceta.

Principalele metode prin care un metal este acoperit cu un strat din alt metal sunt:

- cufundarea într-o baie de metal topit
- galvanizarea
- pulverizarea metalului topit pe suprafața ce urmează a fi acoperită
- termodifuziunea
- cementarea

Zincul este metalul cu care se acoperă de departe cea mai mare suprafață de produse din oțel

- Acoperiri nemetalice de protecție pot fi realizate în diverse moduri. Dintre cele mai uzuale sunt cele cu oxizi, cele cu compuși ai metalului de bază și cele cu vopsele.

Dintre acoperirile de protecție cu oxizi, mai uzuale sunt oxidarea superficială a oțelului (brunarea) și cea a aluminiului (eloxarea).

Dintre acoperirile cu produși ai metalului de bază se amintesc: fosfatarea și cromatarea.

Acoperirile cu vopsele se realizează atât în scop decorativ cât și protector sau în ambele scopuri.

Vopselele sunt sisteme complexe, alcătuite din următorii componenți:

- substanțe policulogene, uleiuri, rășini naturale sau sintetice sau alte substanțe care în condiții potrivite pot realiza pe suprafața pe care sunt puse pelicule continui.

- solvent ca benzenul xilenul, toluenul, acetona, produse petroliere etc.
- pigment de obicei de natură anorganică ca de exemplu: oxizi Pb_3O_4 , ZnO sau pulberi metalice: Zn, Al, etc.
- altele

Vopselele se aplică pe obiectul metalic cu pensula, prin stropire, prin cufundare, care printr-un proces de uscare formează pelicule relativ insensibile la atingere. Pe lângă o aderență mai mult sau mai puțin pronunțată la metal și o oarecare rezistență mecanică multe dintre aceste pelicule prezintă și proprietăți anticorozive remarcabile.

Modul de alcătuire al sistemului, modul de aplicare și de pregătire a suprafeței metalice pentru aplicarea vopselei sunt factori hotărâtori pentru definirea calităților protectoare ale vopselelor.

În calitate de așa numiți „catalizatori” se folosesc, în special, săpunuri pe bază de plumb, mangan, cobalt etc.

În cazul unor pigmenți cum sunt cei cu caracter oxidant (Pb_3O_4 , $PbCrO_4$, $ZnCrO_4$, $BaCrO_4$) efectul de protecție se încearcă a fi explicat prin atribuirea unui rol de inhibitori anodici acestor pigmenți. De exemplu în cazul miniului Pb_3O_4 se admite ca ionul inhibitor este PbO_4 , care se poate reduce cu o viteză suficientă pentru a pasiva oțelul. Aceasta cu atât mai mult cu cât condițiile în care suprafața oțelului este acoperită, curentul critic este foarte mic. Și alți compuși Pb și O au proprietăți protectoare față de oțel însă cel al miniului este cel mai superior. De altfel miniul de Pb poate fi utilizat cu orice substanță pelicologenă.

Experimentul se demonstrează că pelicula de vopsire prezintă pori și capilare mai mult sau mai puțin dezvoltate și că este permeabilă pentru lichide datorită

evaporării solventului în timpul uscării. Cu toată permeabilitatea ridicată față de apă, multe vopsele prezintă proprietăți anticorozive remarcabile.

4.8.5 Combaterea coroziunii conductelor metalice subterane

Conductele și instalațiile metalice destinate transportului și / sau distribuției diferitelor produse sau gaze (produse petroliere, gaze naturale, gaze industriale, apă potabilă) sunt executate din diferite calități de oțel. Aceste structuri metalice sunt plasate preponderent subteran și sunt în contact cu medii care în majoritatea situațiilor prezintă o agresivitate corozivă ridicată. Pentru a asigura acestor instalații o fiabilitate acceptabilă, pentru a diminua riscul unor evenimente nedorite care se produc în urma avarierii acestora, prin perforarea datorită coroziunii cu toate implicațiile scurgerii necontrolate de produse se impune protecția anticorozivă corespunzătoare a lor. Desigur metodele de protecție anticorozivă trebuie astfel alese încât să se realizeze la un raport minim costuri / performanțe respectiv eficiență tehnico economică maximă.

În practică rețelele conductelor metalice subterane și a instalațiilor aferente, pe lângă conducte subterane prezintă și porțiuni aparente (porțiuni de conducte aeriene, elemente de instalații montate la suprafață sau în incinte de vizitare) porțiuni care sunt expuse coroziunii atmosferice, deseori în condiții severe.

În majoritatea situațiilor rețelele de conducte subterane și instalațiile aferente mai sunt expuse atât acțiunii unor curenți de dispersie (în CC și / sau în CA) cât și acțiunii unor încărcări accidentale cu sarcini electrice la tensiuni periculoase și / sau la descărcări atmosferice (trăsnete directe și / sau indirecte). Deci se impune asigurarea electroprotecției acestora. Soluțiile tehnice trebuie astfel alese încât să fie compatibile cu protecția anticorozivă activă a porțiunilor suprafețelor în contact cu solul (protecție catodică).

Protecția anticorozivă a părților aparente ale rețelelor de conducte subterane și ale instalațiilor aferente, expuse coroziunii atmosferice, se realizează de obicei, prin acoperirea cu straturi protectoare pe bază de compuși organici (vopsire), prin care se asigură simultan atât protecția anticorozivă cât și un aspect corespunzător. Peliculele organice protectoare prezintă o rezistență electrică ridicată și sunt penetrabile atât de depolarizantul catodic cât și de către produsul primar al reacției de coroziune (Fe^{2+}). Pentru a asigura o protecție eficientă, se impune ca pelicula organică să fie aderentă la metal, să fie aplicată în straturi uniforme și continue și să nu prezinte discontinuități sau zone cu exfolieri care să favorizeze apariția pilor locale de coroziune prin aerarea oxigenare diferențiată. Obținerea unor structuri - pelicule aderente și uniforme presupune o pregătire corespunzătoare a suprafețelor de protejat. Pregătirea suprafeței de protejat se asigură prin curățirea (ideal, până la luciul metalic) și degresarea acesteia.

În cazul suprafețelor care au mai fost vopsite în cadrul lucrărilor de reparații de obicei, se impune îndepărtarea completă a stratului vechi de vopsea.

În cazul în care suprafața metalică prezintă doar impurități oxidice (rugină) etapa de periere până la luciul metalic se poate evita prin aplicarea unor soluții chimice moderne, stabilizatoare de rugină, soluții care asigură blocarea oxizilor de fier (Siltan1 produs la SC ICPE SA) metodă prin care se asigură o aderență foarte bună a stratului de grund și o mentenabilitate ridicată a stratului de vopsea. Utilizarea stabilizatorilor de rugină poate fi recomandată și în cazul lucrărilor de mentenanță curentă pentru suprafețe vopsite atunci când stratul vechi de vopsea prezintă porțiuni aderente. În această situație se impune doar îndepărtarea porțiunilor de strat vechi de vopsea neaderentă operație care se poate face cu un jet

puternic de apă, după care se poate trece la aplicarea stabilizatorului de rugină conform instrucțiunilor specifice ale fabricantului.

În final se mai accentuează complexitatea mecanismului de protecție prin pelicule de vopsea care pun o serie de condiții pentru o bună protecție. Este de dorit ca pigmentul utilizat să provoace pasivizarea metalului de bază, să protejeze pelicula contra radiațiilor luminoase, să formeze săpunuri hidrofobe. Pelicula de vopsea trebuie să se inhibe cât mai puțin cu apă să prezinte o încărcare negativă față de apă.

4.9. Considerații privind efectul coroziunii asupra rezistenței de rupere la încovoiere al unui oțel pentru conducte de transport produse petroliere

4.9.1. Consideratii generale

Datele statistice despre cedările (ruperile) în timpul serviciului, raportate de industrie și organele de supraveghere, indică că anumite țevi. În special cele de transport produse petroliere au fost obiectul unor degradări și vătămări produse în principal de fenomene de eroziune/coroziune. Această formă de degradare a materialului țevilor este cauzată de o curgere de fluide care de regulă uzează în primul rând stratul de oxid protector prin fluidul care curge cu viteză mare (procesul de eroziune) și care apoi dizolvă continuu metalul de sub acest strat (procesul de coroziune). Procesul de eroziune / coroziune dintre care preponderentă este coroziunea este (factorul de vătămare cel mai important [1], [2], [3]. Conducta din oțel carbon este mai susceptibilă în special, la coroziune decât conducta din oțel inoxidabil austriac datorită conținutului mai bogat în elemente de aliere.

Dacă sunt prezente atât procesele de eroziune/coroziune cât și cele de oboseală în aceeași porțiune a sistemului de conducte, degradarea și vătămarea materialului sunt accelerate.

Distrugerile datorate coroziunii în instalații și construcții sunt însemnate. Pentru a obține o siguranță în exploatare a instalațiilor și construcțiilor metalice se impune aplicarea unor serii de măsuri în etapele de proiectare execuție și exploatare, prin care riscul distrugerilor prin coroziune să fie minimizat sau chiar eliminat. Pe plan mondial există o tendință generală de dezvoltare atât în domeniul construcțiilor cât și al instalațiilor pentru cercetarea celor mai eficiente metode și soluții tehnice de control și combatere a coroziunii [3], [4].

Din statisticile publicate rezultă că în țările dezvoltate din costul instalațiilor și construcțiilor metalice, cea. 3-10% reprezintă costul aferent cercetării/proiectării celor mai eficiente soluții de control al coroziunii, iar cheltuielile de implementare a sistemelor de protecție anticorrosivă reprezintă cea. 10-25% [5].

Metalele și aliajele din care sunt construite instalațiile, țevile, recipientele etc. cu timpul sunt degradate de agenți chimici și electrochimici ce au loc la interacțiunea acestora cu mediul înconjurător. Acest proces complex se numește coroziune.

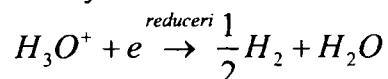
Coroziunea se clasifică după mai multe criterii:

După mecanismul coroziunii există trei tipuri de coroziune: chimică, electrochimică și biochimică [6].

Coroziunea chimică este produsă prin acțiunea gazelor uscate sau a soluțiilor ce nu conduc curentul electric (soluții de neelectroliti) asupra suprafeței metalelor.

Astfel, la temperaturi mai înalte, gaze ca oxigenul (O_2), dioxidul de sulf (SO_2) hidrogenul sulfurat (H_2S), clorul (Cl_2); acidul clorhidric gazos (HCl), provoacă degradarea aparatelor și a pieselor cu care vin în contact. În urma reacțiilor chimice ce au loc între agentul coroziv și metal. Coroziunea chimică nu este însoțită de apariția unor curenți electrici locali.

Coroziunea electrochimică este forma cea mai răspândită de distrugere a metalelor care apare la contactul metalelor cu soluții de electroliți, însoțite de transfer de sarcini electrice și are la bază legi ale cineticii electrochimice. La contactul cu soluția corozivă, atomii metalici de la suprafață cedează electroni (se oxidează) și trec în soluție ca ioni pozitivi. Zona unde are loc acest proces este numită zonă anodică. Electronii acumulați pe suprafața metalului în această zonă pot migra sub influența diferenței de potențial în altă zonă (zona catodică) unde sunt preluați în procesul de reducere al agentului oxidant, de exemplu, în procesul de reducere a ionilor hidroniu H_3O^+ din soluțiile acide



Se creează astfel, la suprafața metalului pile electrochimice, microscopice (pile locale). Porțiunile mai active din metal (zone anodice) vor fi cele care se vor coroda, iar porțiunile mai puțin active (zone catodice) vor fi locurile unde se formează hidrogenul.

Coroziunea biochimică este determinată de activitatea diferitelor microorganisme care utilizează metalul ca mediu de cultură sau elimină produsele de coroziune. Apare la structurile metalice feroase aflate în contact cu ape stagnante.

Agenții agresivi cei mai periculoși sunt: aerul, în special atmosfera industrială puternic poluată și apa. sub formă de vapori, apa de mare sau ape reziduale. Ceilalți agenți chimici agresivi, cum sunt gazele industriale sau soluțiile unor substanțe organice sau anorganice, deși sunt mult mai periculoși decât apa și aerul, au o răspândire mult mai redusă.

Pentru a caracteriza comportarea la coroziune a unui metal este necesar să se țină seama de condițiile coroziunii. În special să fie cunoscută compoziția chimică a mediului agresiv, precum și alți factori care intervin în proces.

4.9.2 Metode de protecție anticorrosivă a metalelor [2][8]

Metodele de protecție anticorrosivă a metalelor pot, fie să prevină coroziunea, fie s-o încetinească. În general se urmărește ca aceste măsuri să asigure unei instalații metalice o durată cât mai mare de funcționare (10 -15 ani). Alegerea metodei de protecție depinde de mediul în care are loc utilizarea instalațiilor metalice și de natura metalului. În general se folosesc concomitent mai multe metode de protecție.

Principalele metode de protecție anticorrosivă sunt:

- acoperirea pieselor. încă de la confecționare cu straturi de metal, oxizi metalici.
- lacuri, vopsele, polimeri sau materiale ceramice. Aceste straturi izolează total sau parțial metalul de mediul corosiv;
- îndepărtarea, dacă este posibil, a agenților corozivi din mediul cu care piesele metalice trebuie să vină în contact, sau adăugarea unor săruri care reduc

viteza de corodare ele se numesc **inhibitori** [4] [7]:

- în cazul rezervoarelor sau conductelor de transport produse petroliere sau gaz metan, care trec prin apă sau sol. a navelor ca și la traseele metroului se aplică două metode:

- se fixează pe instalație, din loc în loc, plăci sau bare dintr-un metal mai electronegativ decât cel care trebuie protejat. În cazul oțelului sunt Zn, Mg, Al și aliajele lor. În timp ele se corodează și se înlocuiesc. Metoda se utilizează la protejarea instalațiilor de dimensiuni mari (rezervoare, nave). Acest tip de protecție se numește **protecție catodică**;

- se conectează instalația din loc în loc la polul (-) al unor generatoare de curent electric; la polul (+) se conectează piese din oțel, fier vechi care se consumă în timp. Această metodă este utilizată la protejarea rezervoarelor cu dimensiuni mari și a conductelor de transport petrolier cu trasee lungi [9].

- Pentru a împiedeca procesul de coroziune a unor construcții și instalații metalice se mai folosesc și aliaje și metale rezistente din punct de vedere chimic (oțeluri inoxidabile). Ele au în compoziția lor metale ca: Mn, Cr, Ni, care le conferă o rezistență chimică mare. Alumiul are și el o rezistență chimică ridicată față de unele medii corozive.

4.9.3. Fisurarea corozivă sub tensiune a metalelor.

Fisurarea prin sub tensiune corozivă reprezintă efectul combinat al acțiunii tensiunii mecanice și al corozivității asupra comportării fizice și chimice a metalelor și aliajelor. Experimental s-a constatat că elementele de rezistență aflate într-un mediu agresiv se pot rupe după o anumită durată de timp chiar dacă tensiunile statice sunt inferioare limitei de elasticitate al metalului. **Fenomenul se numește fisurare corozivă sub tensiune, prescurtat F.C.T.** [10] [11] [12].

În literatura de specialitate sunt indicate atât aliajele cât și mediile corozive respective. Procesului de degradare a unui material în condițiile F.C.T îi sunt caracteristice trei etape: a) inițierea fisurii sau stadiul întâi de propagare; b) stadiul al doilea de propagare lentă în timp a fisurii; c) stadiul trei sau ruperea finală.

Încercările experimentale pentru studiul F.C.T. se împart în următoarele categorii:

1. încercări cu sarcini statice folosind epruvete netede;
2. încercări statice folosind epruvete cu concentratori sau prefisurate;
3. încercări pe epruvete la o viteză redusă de solicitare.

Încercările experimentale din categoria 1 urmăresc determinarea timpului de rupere în prezența unui anumit mediu agresiv. În figura 4.5 este prezentată diagrama în coordonate semilogaritmice **log t** - σ , reprodusă după lucrarea citată la nr. 15 în bibliografie a cercetătorului din Ucraina Halyna Chumalo. Acesta a efectuat încercări de tracțiune în condiții F.C.T pe epruvete din oțel austenitic, marca O3X23H7M4 cu 2 soluții corozive: 1. soluție cu 30% MgCl₂; 2. soluție considerată standard NACE care conține 5% NaCl + 0.5% CH₃COOH și saturare cu H₂S până pH-ul ajunge la valoarea 4,5.

Oțelul austenitic încercat a avut în compoziția sa: Cr 23%, Ni 6,9% și Mo 4%. iar caracteristicile mecanice: $R_{p0.2} = 475$ MPa; $R_m = 712$ MPa și $Z = 66\%$.

Din diagrama figurii 4.5 se obțin următoarele valori limită ale rezistenței la rupere prin F.C.T. ale oțelului O3X23H7M4: $\sigma_{rSCC} = 274$ MPa după cea. 1200 ore încercat cu soluția nr. 1 și $\sigma_{rSCC} \cong 249$ MPa cu soluția nr.2 după cca. 3000 ore.

Tensiunea limită σ_{rSCC} este tensiunea maximă care poate fi aplicată în serviciu pentru care nu apare ruperea prin F.C.T. Prezența unor defecte care

determină o concentrare a tensiunilor, împreună cu mediul coroziv conduc la o reducere și mai substanțială a nivelului tensiunii limită σ_{rSCC} .

Încercările experimentale din categoria 2 urmăresc în primul rând determinarea vitezei de propagare a fisurii da/dt . Starea de tensiune la vârful fisurii se ia în considerare prin factorul de intensitate a tensiunii K_I care caracterizează o anumită geometrie a fisurii. Mărimea lui $K_{I,SSC}$ este determinată de acel nivel al tensiunii aplicate care în prezența unui anumit mediu coroziv nu conduce la propagarea fisurii [11]. Parametrul $K_{I,SSC}$ poartă denumirea de tenacitate limită și depinde de cuplul material-mediu agresiv. Acesta nu este o caracteristică de material așa cum este K_{IK} .

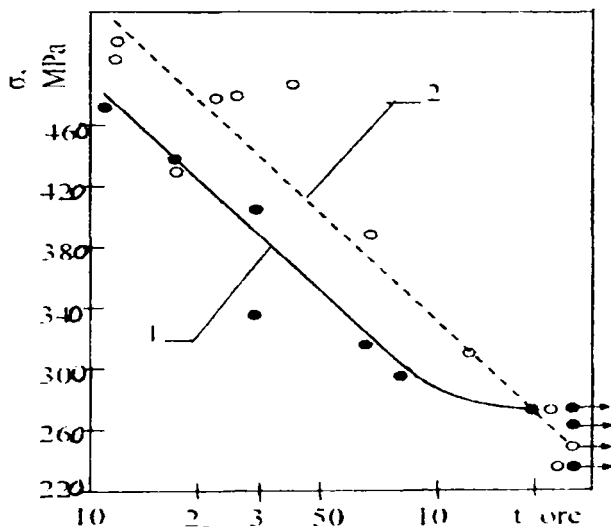


Fig. 4.5

În lucrarea [11], pentru oțelul 835M30 care are $K_{IK} = 240 \text{ dN} \cdot \text{mm}^{3/2}$ se indică $K_{I,SSC} = 43 \text{ dN} \cdot \text{mm}^{3/2}$. Rata de creștere a unei fisuri în condițiile unor soluții apoase depinde de numeroși parametri ca de exemplu: temperatura, presiunea, tipul soluției concentrația soluției. PH. potențialul electrochimic, mărimea tensiunii aplicate, condițiile metalurgice și geometria fisurii.

Determinarea experimentală a tensiunii limită la tracțiune statică σ_{rSCC} , a unui oțel austenitic în două soluții coro/Ke I și 2.

4.9.4. Dispozitivul realizat pentru studiul experimental al ruperii metalice prin F.C.T.

Pentru efectuarea încercărilor de încovoiere în mediu coroziv au fost alese epruvete de tip Charpy cu creștătură, folosite la încovoiere cu șoc. Epruvetele rupte rezultate în urma încercării sunt prezentate în imaginile din Fig. 4.6. și Fig. 4.7.

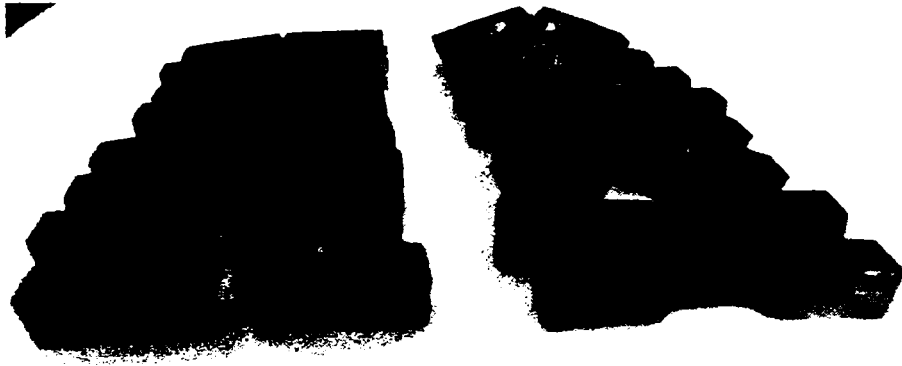


Fig. 4.6. Imaginea de ansamblu pentru epruvete de tip Charpy încercate la încovoiere în mediul coroziv.



Fig. 4.7. Detaliu pentru epruvete de tip Charpy încercate la încovoiere în mediul coroziv

În acest fel epruvetă este solicitată la încovoiere pură cu concentratorul de tensiune situat în zona întinsă. Întreg sistemul de încărcare este montat într-o cuvă metalică cu pereții acoperiți cu o vopsea rezistentă la mediul coroziv. Figura 4.8 reprezintă schema de principiu a dispozitivului de încercare realizat, iar în Fig. 4.9, Fig. 4.10 și 4.11, se prezintă imagini mașinii realizate. Cu această mașină încărcarea până la rupere a epruvetei se face cu sarcină constantă, spre deosebire de cazul epruvetelor plate încercate într-un dispozitiv prevăzut cu un șurub de încărcare și la care deformația inițială rămâne constantă, iar sarcina descrește continuu cu extinderea fisurilor în epruvetă.

Ca material pentru epruvetele de încercare s-a ales oțelul nealiat mărcile R360 și R510, cuprinse în STAS 2883/2-91. Ambele oțeluri sunt destinate pentru table de recipiente și de conducte sub presiune pentru temperatura ambiantă și scăzută. Cele două mărci de oțeluri au avut următoarele caracteristici conform STAS 2883-91.

Tabel 4.3

M arca oțelului	$R_{p0,2}$ [N/mm ²] Table cu $b > 16$ mm $b \leq 40$ mm	R_m [N/mm ²] Table cu $b \leq 100$ mm	A_s [%] Table cu $b > 8$ mm $b \leq 25$ mm
R360	225	360...400	24
R510	340	510...610	22

Pe baza literaturii consultate pentru prima soluție corozivă s-a ales apa de robinet în care s-a dizolvat 3,5% NaCl iar după trecerea a 2 luni pentru creșterea agresivității soluției corosive s-a mai adăugat încă 2 litrii de apă cu 5% HCl.

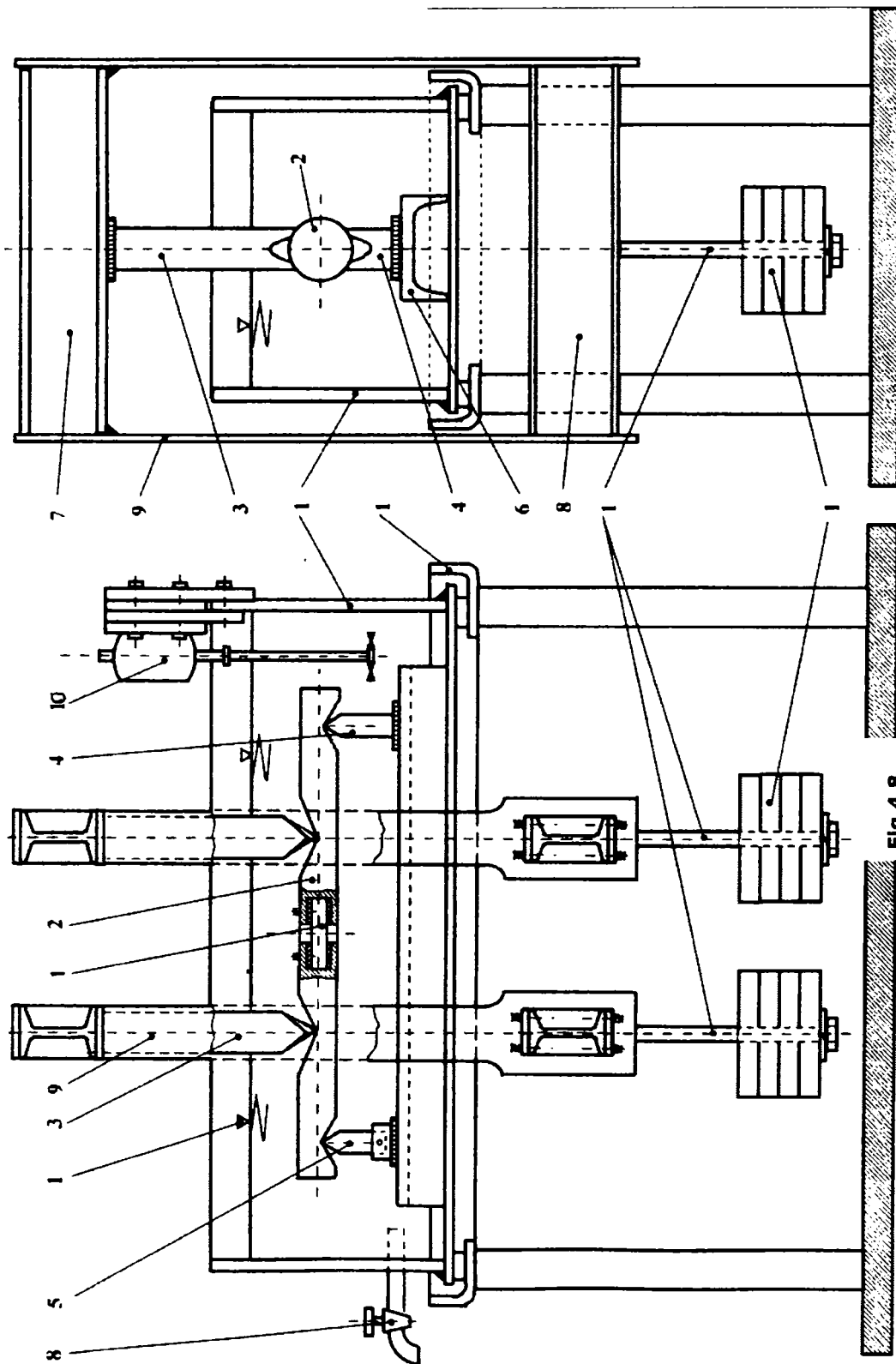


Fig. 4.8

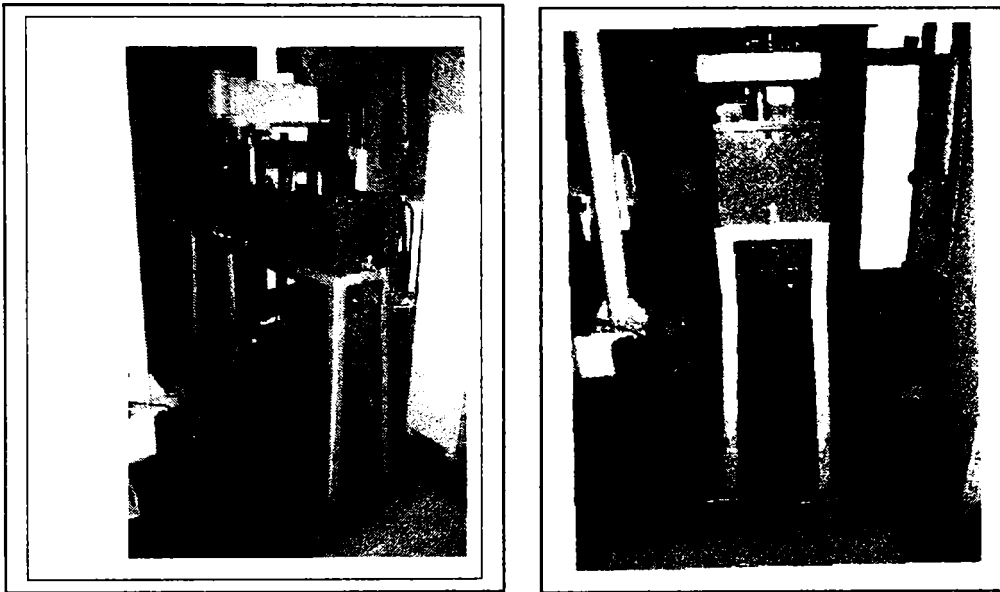


Fig. 4.9. Imagini de ansamblu ale mașinii mașii de încercat la încovoiere în mediu coroziv

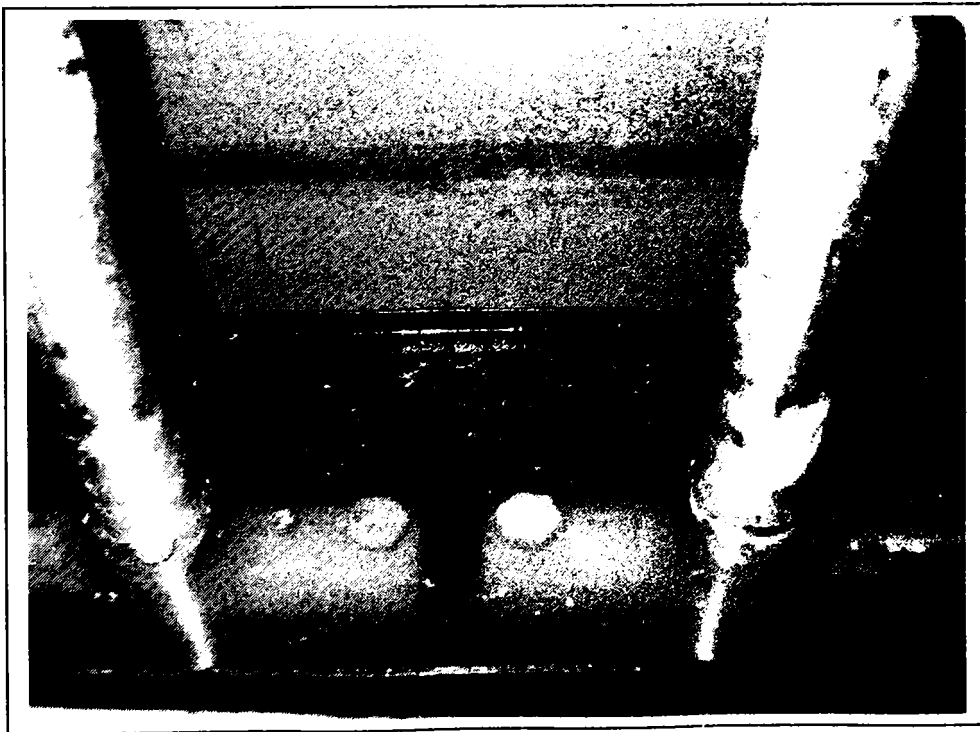


Fig. 4.10. Imagine de detaliu sistemului de fixare epruvetei și a băii corozive

4.9.5. Încercări efectuate

Din cele două table de oțel având mărcile R360 și R510 s-au confecționat câte 30 de epruvete din ambele table cu dimensiunile 70x15x15 mm cu axele longitudinale paralele cu direcția de laminare. La mijlocul fiecărei epruvete prin frezare s-a executat o creștătură transversală adâncă de 2 mm identică cu creștătura unei epruvete Charpy de încovoiere prin șoc. La început chiar pentru încărcări superioare care produceau în dreptul creștăturii tensiuni normale maxime superioare limitei de curgere a oțelului, nici ruperea și nici chiar fisurarea în dreptul creștăturii nu apărea după 1000 ore. În schimb epruveta înregistra o deformare plastică importantă. În continuare s-a recurs la executarea a încă două creștături laterale, Fig. 4.11.

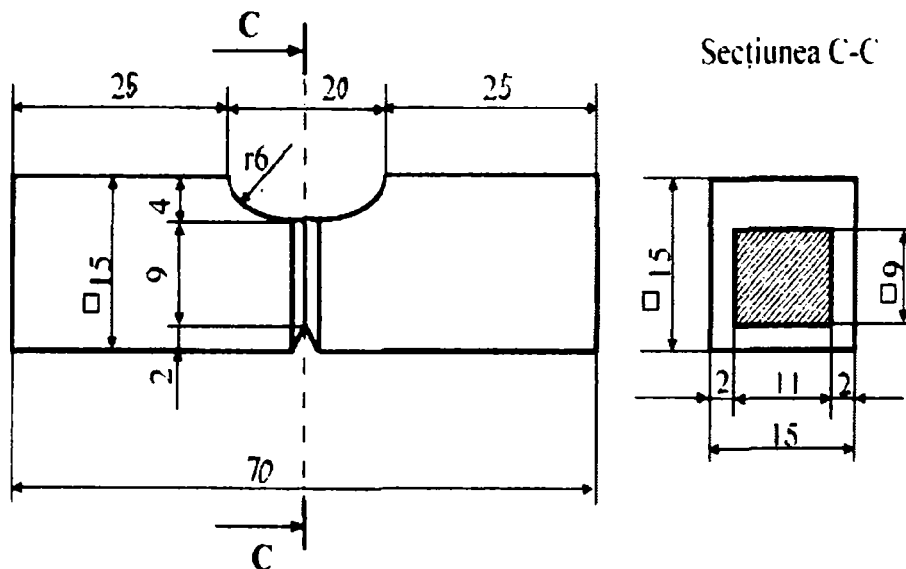


Fig. 4.11. Schița epruvetei cu creștături suplimentare

Aceasta a redus cu 26.7% secțiunea periculoasă a epruvetei și deformarea plastică. Însă nici această măsură nu a condus la diminuarea rezistenței nominale la rupere a oțelului epruvetelor datorită acțiunii comune de degradare a solicitării mecanice de încovoiere cu coroziunea chimică a soluției folosite.

După cum am constatat această situație s-a datorat lipsei de mișcare relativă a mediului corosiv față de epruvetele destinate încercărilor.

Completând instalația cu un agitator acționat electric (Poz. 10 din Fig. 4.8) pentru lichidul corosiv, care a asigurat circulația continuă a mediului corosiv în raport cu epruveta. Acest lucru a contribuit la formarea nucleelor de fisurare având ca rezultat propagarea fisurii. Fără această circulație continuă a cantității de soluție corosivă în zona vârfului fisurii efectul ar consta într-o stopare a acesteia [11].

S-au obținut o serie de date importante pentru oțelul încercat în soluția corozivă cu 30% $MgCl_2$, la temperatura ambiantă de $t=20^\circ \pm 5^\circ$, rezultând următoarele valori caracteristice:

- $\sigma_{ISCC} = 145 \text{ MPa}$,

- tenacitatea la rupere, K_{ISCC} , conform formulei date în tabelul lui John Barson și Stanley Rolfe: *Fracture Fatigue Control in Structures*, second edition 1987, pag. 193

$$K_{ISCC} = 1,12\sigma_{ISCC}\sqrt{\pi a} = 1,25 \cdot 154\sqrt{3,14 \cdot 2} = 432,2 \text{ MPa mm}^{1/2}.$$

În concluzie pentru durabilitatea unei rețele de conducte destinate transportului unui anumit produs petrolier lichid să fie cât mai lungă, se recomandă ca o serie de epruvete confecționate din oțel folosit la fabricarea rețelei de conducte să fie supuse unor teste de acest fel. În primul rând pentru obținerea unei durabilități cât mai lungi la parametrii de lucru în condiții de siguranță, se impune efectuarea pe lângă controlul periodic impus și executarea unor încercări de coroziune a unor epruvete confecționate din oțelul conductei în mediul fluidului de transportat prin conducta respectivă, fluid care conține și substanțe corozive care degradează oțelul din care este confecționată conducta. Rezultatele obținute în sunt utile pentru cei care exploatează rețele de conducte folosite la transportul produselor petroliere.

CAP. 5 MĂSURI CARE URMĂRESC PRELUNGIREA DURABILITĂȚII SISTEMELOR DE CONDUCTE PETROLIERE ȘI GAZE

5.1 Procedura de apreciere a duratei remanente de viață a sistemelor de conducte [65]

Observație: Importanța economică mare pe care o reprezintă prelungirea durabilității de funcționare în condiții optime a sistemelor de conducte de transport produse petroliere și gaze, a făcut ca numeroși specialiști să de preoape intens de această problemă încă insuficient rezolvată mulțumitor.

Despre situația actuală a acestei probleme s-a considerat util ca în această teză de doctorat să prezint două extrase legate de această temă din lucrările a doi specialiști de prestigiu.

Sistemele de conducte utilizate pentru transportul produselor petroliere totalizează deseori, zeci sau chiar sute de kilometri lungime și deci reclamă costuri de investiții foarte importante. Astfel funcționarea rentabilă a acestor conducte implică o durată de funcționare cât mai mare, respectiv durata de viață fără defecte a acestor sisteme de conducte să fie cât mai lungă.

Realizarea acestui deziderat reclamă o proiectare competentă a sistemului de conducte prin: alegerea materialului (oțelului adecvat), stabilirea atentă a traseului. Alegerea îmbinărilor între tuburi (suduri, flanșe, manșon filetat, etc.), stabilirea tensiunilor admisibile în pereții conductelor, etc.

Pe baza analizei rezultatelor unui număr însemnat de sisteme de conducte care au avut o durată de viață lungă de funcționare, fără defecte majore, datorită proiectării competente și exploatării raționale la parametrii de lucru aleși în mod judicios, mai mulți cercetători au stabilit pentru diferite sisteme de conducte metode de calcul potrivite pentru determinarea duratei de viață remanentă a acestor sisteme de conducte.

Legat de această problemă în revista "SUDURA" din Timișoara, Nr.4 din 1995 [65], Prof. dr. ing. Mircea Rațiu, de la firma "VECTRA TECHNOLOGIES" din San Rarnon, California, SUA, a publicat articolul de bază cu titlul "*Aplicarea mentenanței preventive la sistemele de conducte din centralele nucleare*". Importanța conținutului lucrării rezidă și în faptul că o bună parte din prevederile sale se pot aplica și altor sisteme de conducte, ca de exemplu și sistemelor de conducte de transport produse petroliere (țitei, ulei, motorină, benzină, etc. În prezent încă nu sunt cunoscute la noi toate datele privind proiectarea rațională a conductelor petroliere, condițiile de montaj, a solicitărilor reale în timpul funcționării conductelor, caracteristicile de material și modul lor de vătămare, ori acestea reprezintă condițiile necesare pentru elaborarea unui model de degradare pentru calculul penetrării vătămării, la evaluarea duratei remanente de viață. Luând ca model preocuparea specialiștilor din țările mai avansate din punct de vedere tehnic, pentru achiziția datelor necesare mentenanței preventive se va putea ajunge și la noi la estimarea limitei de siguranță pentru continuarea funcționării sistemelor de conducte de transport petrolier.

5.1.1 Introducere

Conform recomandărilor din lucrarea [65] considerăm că se poate admite și în cazul sistemelor de conducte petroliere, prin asimilare că dacă este descoperită o degradare, evaluarea duratei remanente de viață a acestora este determinantă pentru cunoașterea siguranței care a fost luată în considerare.

Datele privind ruperea în serviciu a conductelor sistemelor de transport petrolier arată că nu au suportat degradarea și vătămarea (străpungerea invelitorii sub presiune) datorită în principal proceselor de eroziune/coroziune și/sau fisurării prin oboseală precum și defectărilor de execuție.

Eroziunea/coroziunea este o formă de degradare a materialului peretelui cauzată de curgere; fluidului cu suspensii solide și care de regulă uzează, în primul rând stratul de oxid protector prin fluidul care curge cu viteză mare (procesul de eroziune) și care apoi dizolvă continuu metalul de sub acest strat (procesul de

coroziune). Procesul de eroziune / coroziune este factorul de vătămare cel mai critic pentru evaluarea duratei remanente a conductelor. Conducta din oțel carbon este mai susceptibilă la eroziune/coroziune decât conducta din oțel inoxidabil austenitic, datorită conținuturilor mai scăzute de componente de aliere.

Fisurarea prin oboseală este o altă formă de degradare a materialului, cauzată de o încărcare ciclică care produce fisurarea în discontinuitățile de material și/sau în cele ale geometriei conductei în special în suduri.

Dacă sunt prezente, atât procesele de eroziune /coroziune cât și cele de oboseală în aceeași porțiune a sistemului de conducte, degradarea și vătămarea materialului sunt mai

Tehnicile uzuale de evaluare a duratei remanente de viață a conductelor constau din supravegherea / controlul, monitorizarea a funcționării, încercare pe probe și previzionare analitică a vătămării [8].

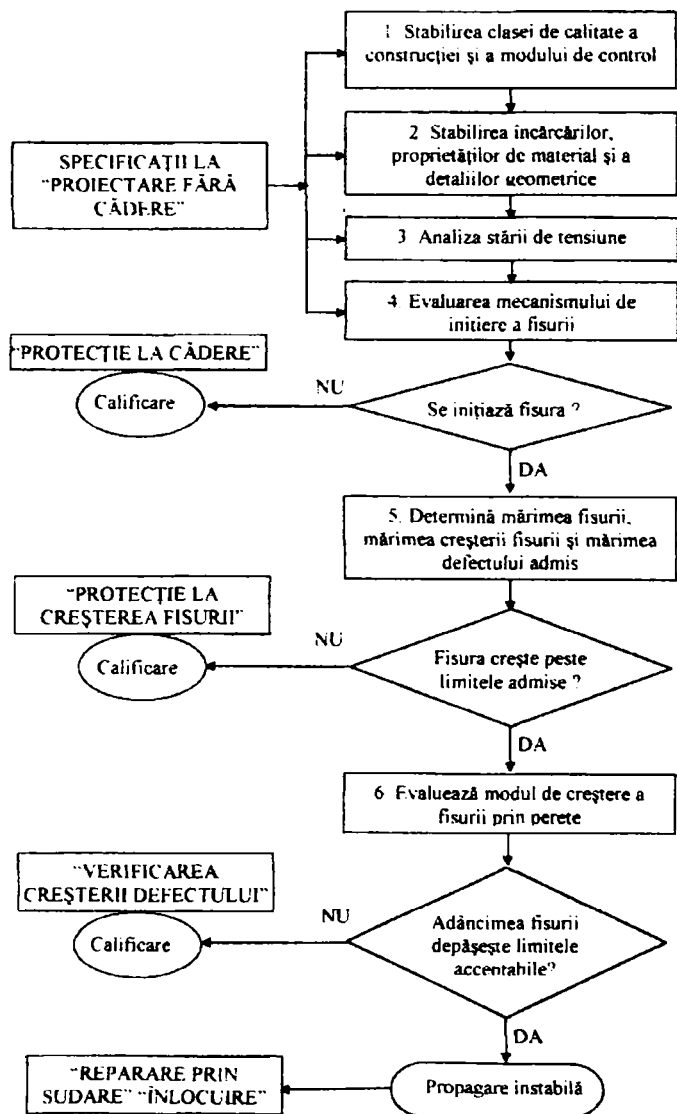


Figura 5.1. Calificarea rezistenței în serviciu a conductelor de presiune

În lucrarea considerată de bază [65] se prezintă o procedură de evaluare a duratei remanente de viață a conductelor supuse fisurării prin eroziune/coroziune și oboseală, utilizând o predicție analitică coroborată cu rezultatele inspecției supravegherii și cu atele privind exploatarea industrială.

Tot în lucrarea [65], în figura 5.1 se prezintă o logigramă pentru evaluarea duratei remanente de viață.

5.1.2 Achiziția datelor

Achiziția datelor cu privire la proiectarea conductelor și cele referitoare la condițiile de montaj, istoria solicitărilor în timpul funcționării conductelor, caracteristicile de material și modul lor de vătămare, reprezintă condițiile necesare pentru elaborarea unui model de degradare și pentru calculul penetrării și vătămării pentru evaluarea duratei remanente de viață.

5.1.2.1 Proiectarea sistemului de conducte și stabilirea datelor de montaj

Această proiectare și stabilirea datelor privind montajul precum și rezultatele analizei cazurilor de solicitare limită posibile trebuie luate în considerare la evaluarea duratei remanente de viață.

Analiza modului de încărcare de regulă include presiunea, greutatea proprie, dilatările termice, solicitări dinamice și dacă este posibil și solicitările seismice. Pentru țevi cu geometrii similare se compară rezultatele analizei obținute pentru toate zonele și numai rezultatul cel mai critic se va selecta ca cel mai semnificativ. Această trecere în revistă împreună cu rezultatele controalelor periodice, dacă există, permite stabilirea zonelor critice în care se va aprecia durata remanentă de viață.

5.1.2.2 Stabilirea istoriei solicitării în serviciu a conductelor

Istoria solicitării în serviciu a conductelor include degradarea și vătămarea determinate în serviciu care în general nu pot fi exprimate explicit în condițiile de proiectare a conductei. Solicitățile critice în exploatare sunt următoarele:

a) *Eroziune/coroziune.* Așa cum s-a mai amintit eroziunea/coroziunea sunt cele mai importante procese de vătămare în evaluarea duratei remanente de viață a conductelor. Metodele curente pentru prevenirea ruperii prin eroziune/coroziune se concentrează pe programele de supraveghere și control a sistemului de conducte considerat pentru a evalua durata remanentă de viață. Pentru a stabili în mod realist propagarea vătămării prin eroziune/coroziune pentru conducta investigată se vor avea în vedere atât datele furnizate de firma de care aparține sistemul de conducte cât și datele din literatura de specialitate.

b) *Temperatura cea mai joasă a metalului în exploatare.*

Dacă o porțiune a sistemului de conducte investigat este expusă la suprarăcire sau la funcționare în aer liber, va trebui să se determine cea mai scăzută temperatură de proiectare pentru mediul de lucru, în vederea utilizării în mecanica ruperii date privind materialul, necesare evaluării duratei remanente de viață.

c) *Solicitarea ciclică datorată vibrațiilor constante.* Este necesar să se determine efectul vibrațiilor potențial constante ale conductei instalate. În special în cazul conductelor de diametru mic. Se vor avea în vedere datele furnizate de către industrie și codurile ASME/ANSI - Operații și Mentenanță Standard, Partea 3/12, pentru a stabili necesitatea de a include această încărcare în evaluarea duratei remanente de viață.

5.1.2.3 Caracteristicile de material și stabilirea modului de vătămare

Pentru sistemele de conducte petroliere au fost folosite oțeluri de diferite fabricații din oțel carbon sau mai rar oțel inoxidabil austenic. În timpul execuției montajului au fost folosite diferite procedee de sudare și materiale de sudare aferente pentru sudurile executate în uzine și șantier. Tipurile de îmbinări sudate include suduri circumferențiale cap la cap și de colț. Rezultatele cercetărilor și cele ale încercărilor în condiții industriale cum sunt rapoartele EPRI care descriu caracteristicile de bază ale conductei și cele ale materialului sudurii se vor avea în vedere pentru a selecta caracteristici realiste de material care să fie în același timp conservative atât pentru datele de rezistență ale materialului standard ca în codul ASME, sau pentru datele de proiectare : limita de curgere, modulul de elasticitate ș.a. precum și date de referință ale mecanicii ruperii (tenacitatea la rupere, energia de rupere la încovoiere prin șoc, etc.) Se va acorda o atenție specială datelor de vătămare a materialului ca urmare a eroziunii/coroziunii și îmbătrânirii în mediul de lucru. Se va avea în vedere de asemenea datele specifice sistemului de conducte analizat cum sunt certificatele și specificațiile de material, rapoartele omologării procedeele de sudare și rapoartele controalelor de serviciu.

5.1.3. Procedura de evaluare a duratei remanente de viață

Procedura propusă de evaluare a duratei remanente de viață a conductei degradate în serviciu are la bază grosimea remanentă a peretelui t_r , la sfârșitul unei anumite perioade de lucru. Grosimea remanentă a peretelui este evaluată pe baza unei penetrări a vătămării radiale măsurată în realitate a_m și a creșterii extrapolate a_e în timpul următoarei perioade de serviciu. Grosimea minimă a peretelui se exprimă în termenii grosimii peretelui nominal t . Împărțită cu un factor impus RF de reducere a grosimii peretelui din proiectul sistemului de conducte petroliere considerat sau a specificației de mentenanță pentru reducerea de grosime a peretelui prin eroziune/coroziune și/sau fisurare prin oboseală.

Grosimea remanentă a peretelui este acceptată pentru o viață sigură dacă depășește grosimea minimă admisibilă a peretelui adică:

$$t_f = (t - a_m - a_e) \geq \frac{1}{RF} \quad (5.1)$$

În figura 2 din lucrarea de referință [63] reprodusă și în acest extras Fig. 5.2 se prezintă o logigramă a procedurii pentru evaluarea duratei remanente de viață. Procedura include doua trasee paralele corespunzătoare celor două procese majore de degradare eroziune/coroziune și o fisurare prin oboseală. Așa cum se vede în figura 5.2, durata remanentă de viață este determinată în următoarele patru etape : a) modelarea secțiunii transversale vătămate; b) calculul pătrunderii vătămării extrapolate ; c) stabilirea criteriilor de acceptare ; d) evaluarea acceptării.

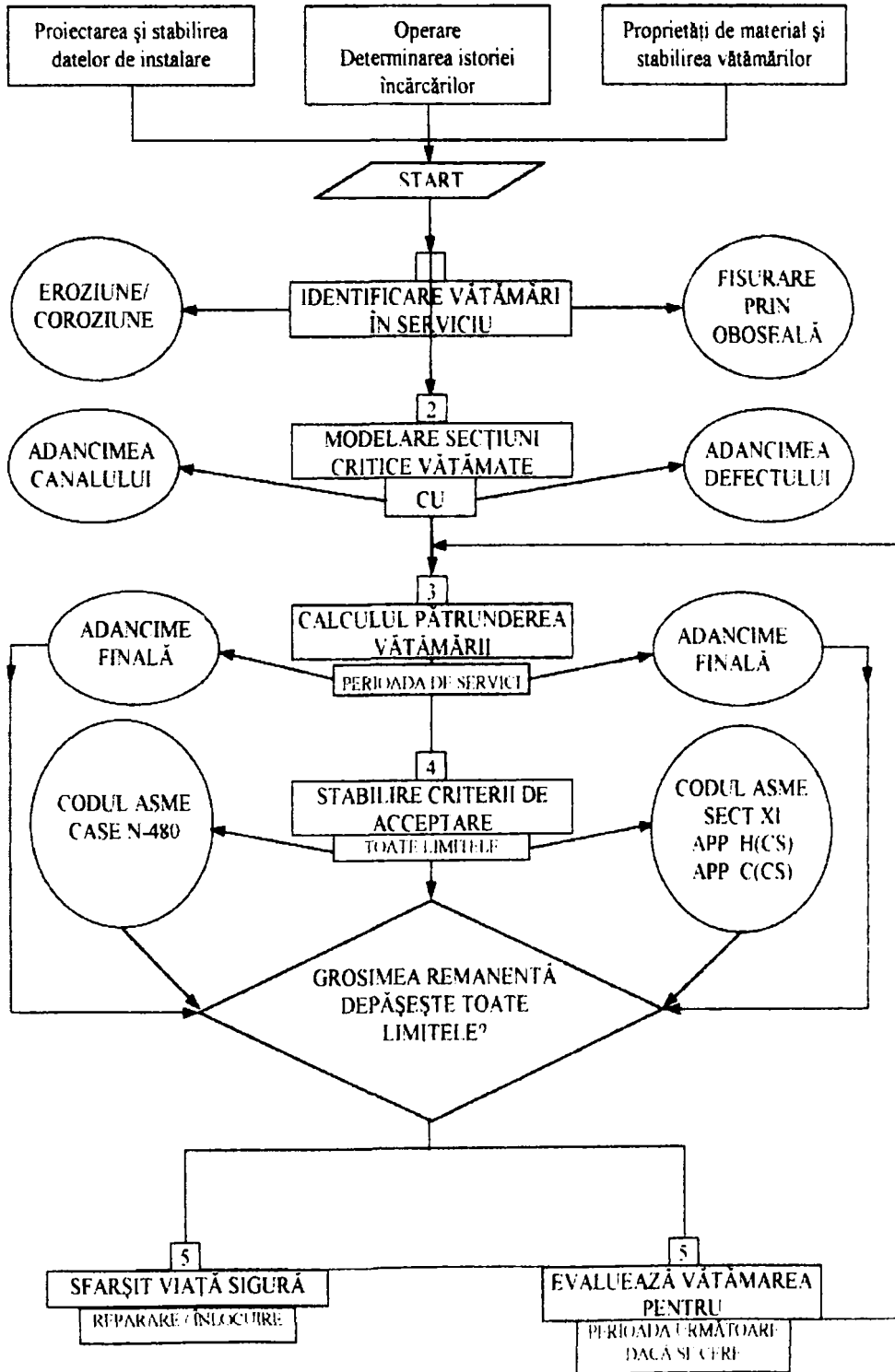


Figura 5.2. Logigrama pentru determinarea duratei remanente de viață

5.1.3.1 Modelarea secțiunii transversale vătămate

Pe baza considerării datelor de rupere a conductelor raportate în serviciu din țară și în literatura indicată în lucrarea de bază [65] tipurile principale de degradare și vătămare ce apar în cursul exploatării sunt următoarele :

- creștături locale în interiorul conductei și fittingurilor, produse prin eroziune/coroziune datorate curgerii lichidului transportat.

- fisuri în îmbinări sudate datorate sarcinilor oligociclice și policiclice. Sarcinile oligociclice sunt cauzate de tranzițiile termice în timpul operațiilor de încălzire/răcire și a altor operații ce intervin în funcționarea normală sau în cazuri de deranjamente a evenimentelor în regim dinamic. Sarcinile critice policiclice sunt vibrațiile în regim constant care sunt transmise de la echipamentele în rotație sau de la curgerea fluidului în interiorul conductei.

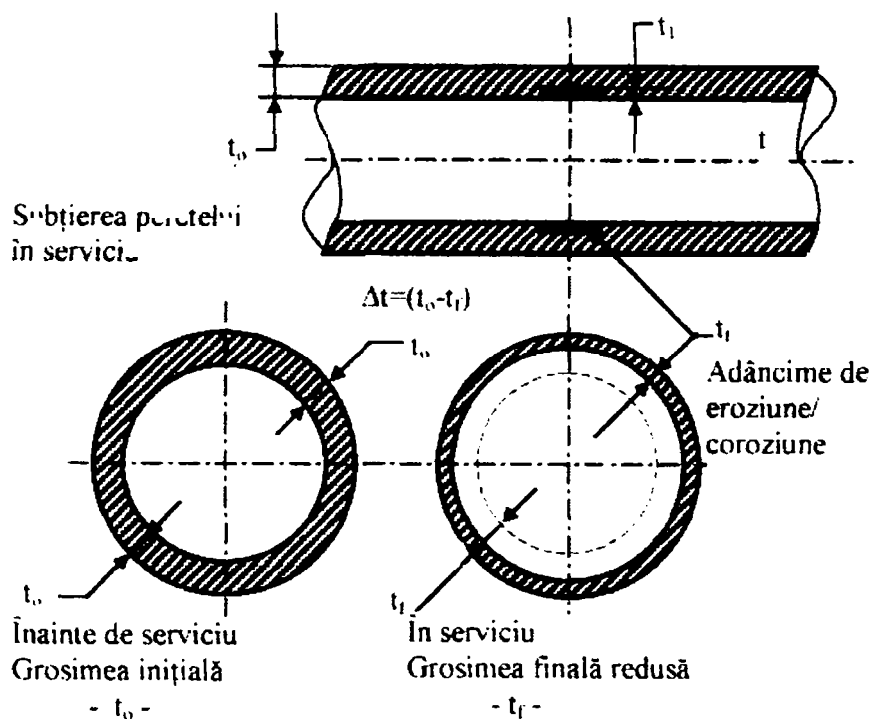
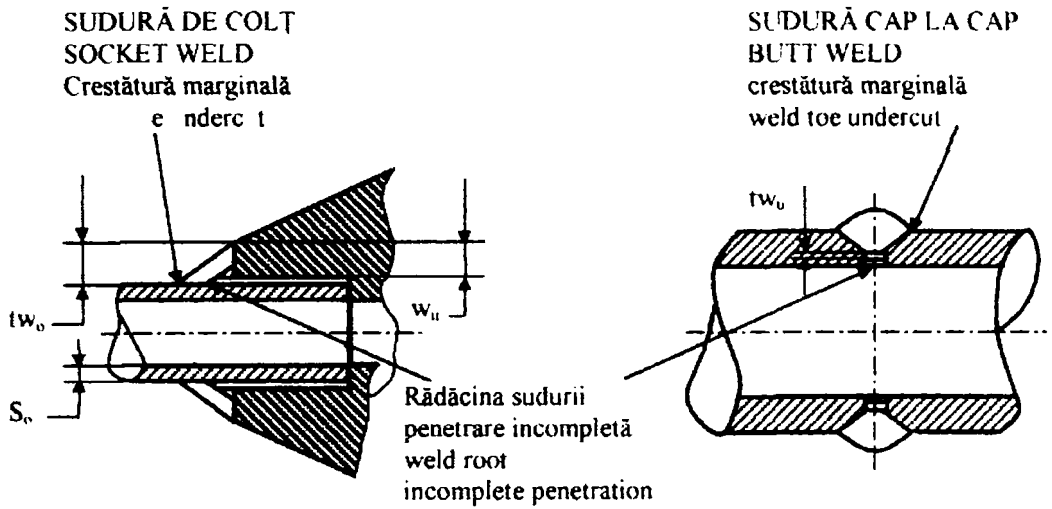
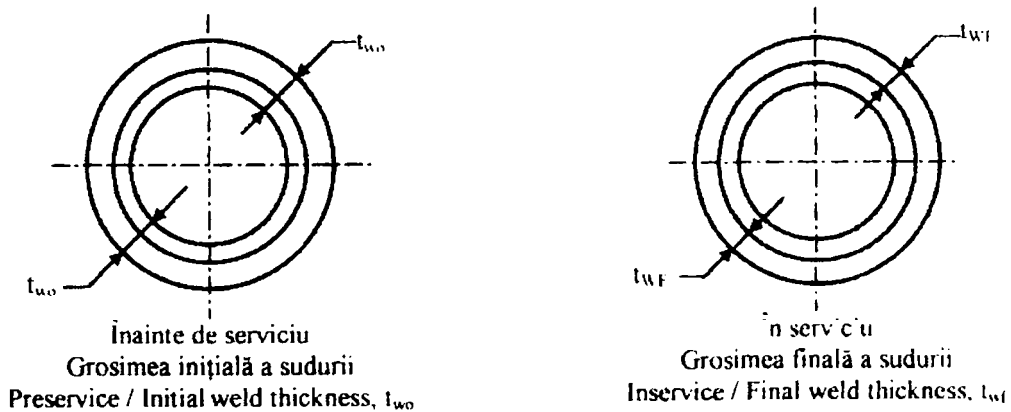


Figura. 5.3. Model pentru vătămarea în serviciu prin vibrații

Modelul de vătămare prin eroziune / coroziune prezentat în figura 5.3 consideră extinderea degradării specifice în direcție radială și longitudinală. Modelele fisurii de oboseală a îmbinărilor sudate cu discontinuități de suprafață potențiale, detectate sau nedetectate sunt prezentate în Fig. 5.4.



**PENETRAREA DEFECTULUI DE LA RĂDĂCINA SUDURII
WELD ROOT DAMAGE PENETRATION**



**PENETRAREA CRESTĂTURII MARGINALE
WELD TOE UNDERCUT PENETRATION**

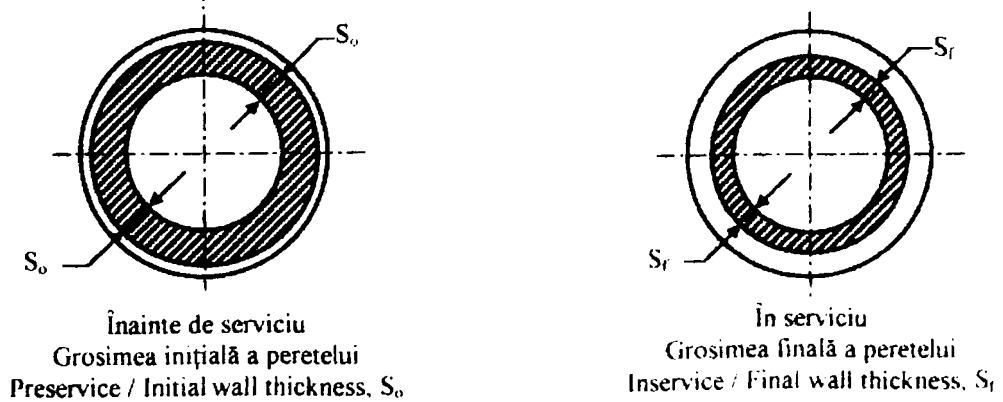


Figura 5.4. Model de fisurare prin oboseală pentru îmbinările sudate cu defecte potențiale.

Vătămarea critică a peretelui exterior al conductei este de așteptat să se producă la creșterile marginale ale sudurii. Degradarea critică a sudurii interioare poate fi datorată pătrunderii incomplete la rădăcină. Un defect radical cu adâncimea egală cu neuniformitățile de suprafață acceptabile la omologarea sudurilor și la controlul în serviciu pot fi adoptate pentru o abordare preliminară.

5.1.3.2 Estimarea pătrunderii extrapolate a vătămării

Pătrunderea vătămării într-o secțiune identificată ca și critică se determină pe baza vitezei de eroziune/coroziune specifică (da/dt) și pe baza vitezei de creștere ciclică a fisurii la oboseală (da/dN) unde a este variabila penetrării vătămării existente, t este variabila în timp și N - variabila ciclurilor aplicate (figura 5.5)

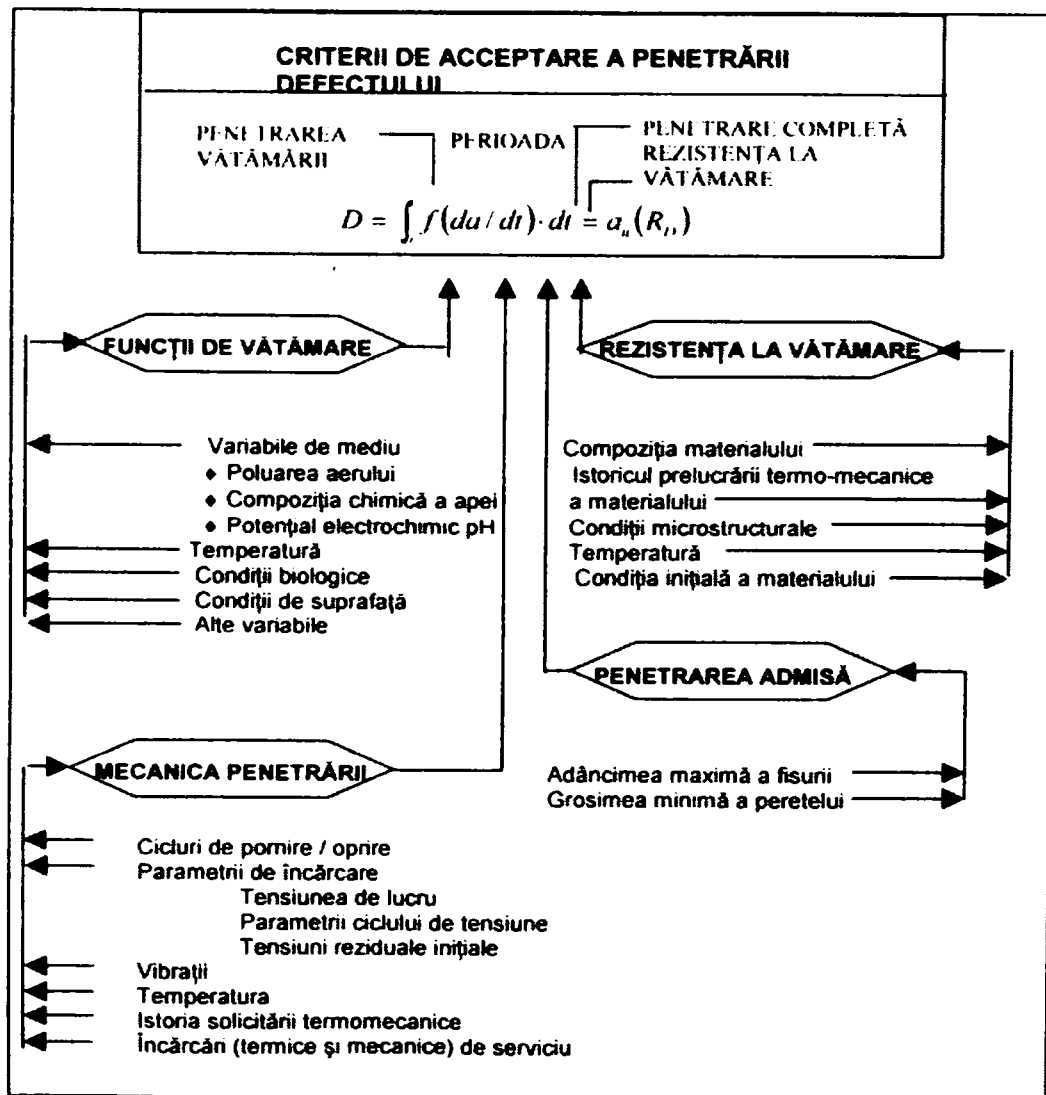


Fig. 5.5. Schemă logică pentru aplicarea mentenanței preventive la conductele magistrale, bazată pe identificarea parametrilor de serviciu

Viteza de eroziune/coroziune a oțelurilor nu este constantă în timp și variază cu durata de expunere. Prin urmare o penetrare verosimilă se obține doar prin extrapolarea rezultatelor măsurătorilor succesive a grosimii specifice a peretelui conductei. În absența unui set credibil de măsurători, penetrarea vătămării poate fi apreciată printr-o corelare atentă a rezultatelor analitice cu datele controlului raportate pentru conducte similare.

Modelele analitice elaborate de către Sanchez - Keik [13] sunt adecvate pentru o estimare preliminară a penetrării vătămărilor [5]. Cea mai agresivă viteză de propagare a vătămării este definită de soluția grafică a funcției complexe din [5] : $da/dt=f(pH.O_2.T.v.G.C_o)$ unde agresivitatea apei este determinată prin nivelul pH - lui, a conținutului de oxigen dizolvat O_2 , și de temperatura fluidului T : rezistența la curgere este definită prin debitul v și de geometria parcursului G. Rezistența materialului la eroziune/coroziune raportată la compoziția chimică nominală / standard se notează cu C_o .

Considerând condițiile specifice de serviciu pentru conducta investigată viteza de eroziune / corozione așteptată poate fi estimată pentru perioada următoare de serviciu. Inspecția planificată la sfârșitul perioadei de serviciu va furniza o corecție de încredere a vitezei de eroziune/coroziune după expunerea efectuată.

Penetrarea defectului prin oboseală la o discontinuitate potențială a sudurii se determină folosind metodologia mecanicii ruperii elasto - plastice din codul ASME [10], secțiunea XI. Anexa H pentru conducte din oțel carbon și Anexa C pentru conducte din oțel inoxidabil austenitic.

Penetrarea fisurii subcritice pentru perioade de lucru se evaluează pe baza cunoscutei Legi a lui Paris [16] a creșterii defectului

$$da / dN = A[K_1 (\max) - K_1 (\min)]^m$$

unde $K_1(\max)$ și $K_1(\min)$ sunt limitele variației factorului de intensitate a tensiunii iar A și m sunt constante de material dependente de condițiile de încărcare și agresivitate a mediului.

Calculul creșterii accelerate a defectului pentru creștături marginale și pentru pătrunderi incomplete la rădăcina sudurii vor fi adăugate la procedura din codul ISME utilizând alte metode publicate cum ar fi [14], [15].

Efectul vibrațiilor constante ale conductei este considerat a fi principala cauză pentru fisurarea sudurii conductelor cu diametru mic [3]. Ca urmare este necesară o analiză riguroasă a vibrațiilor în serviciu a conductei (amplitudine și frecvență) pentru o evaluare precisă a duratei remanente de viață.

Tensiunile ciclice induse prin vibrații se calculează pe baza măsurătorilor din serviciu a vibrațiilor [17]. În absența măsurătorilor de vibrații se recomandă ca să fie considerată limita amplitudinii admisibile în locul considerat în corelația cu frecvența vibrației induse de către echipamentul în rotație sau de curgere a fluidului în interiorul conductei.

5.1.3.3 Stabilirea criteriilor de acceptare

Criteriile de acceptare pentru secțiunile transversale degradate se stabilesc pe baza limitei acceptate pentru grosimea rămasă a peretelui, calculată analitic la sfârșitul perioadei de serviciu. Aproximația reducerii peretelui din codul ASME N - 480 [7] asigură reguli pentru determinarea grosimii peretelui rămasă local (admisă), considerând configurația specifică creșterii. Codul ASME [10] pentru evaluarea defectelor din conducte asigură reguli pentru acceptabilitatea adâncimii defectului maxim, care se apreciază prin creșterea sa până la sfârșitul perioadei de serviciu. Adâncimile defectului admisibil sunt prezentate sub formă analitică sau tabelar în

Codul ASME secțiunea N. Anexa C și H suplimentat cu Codul Case N-494 [18]. Aceste adâncimi maxime admisibile ale defectului definesc grosimea peretelui minim admisă.

5.1.3.4 Evaluarea acceptabilității

Durata sigură remanentă a conductei degradate investigate se determină pe baza concordanței grosimii calculate a peretelui remanent cu criteriile de acceptare indicate anterior de către codul ASME. Dacă penetrările vătămării suprafeței calculate în toate secțiunile transversale critice sunt în limitele admisibile, integritatea structurală a conductei analizate este omologată pentru a fi utilizată în condițiile de proiectare și exploatare până la momentul considerat, plus perioadele de lucru extinse în continuare. În caz contrar secțiunea transversală a conductei/sudurii este insuficientă pentru a rezista cu o limită de siguranță cerută în specificațiile proiectului și exploatarea.

5.1.3.5 Prelungirea durabilității conductelor de transport produse petroliere impuse

În vederea prelungirii durabilității conductelor de transport pentru produsele petroliere sunt necesare urmărirea următoarelor aspecte:

1) Controlul periodic al cusăturilor sudate între tuburile care formează conductele de transport produse petroliere la temperatura ambiantă.

Căldură implicată în procesul mecano-tehnologic de sudare generează modificări structurale în zonele de influența termomecanică (ZIT) și chiar modificări ale compoziției chimice în aceste zone.

Datorită răcirii sale de cele mai multe ori rapide, materialul de adaos (MA) depus prin sudare prezintă neuniformități și intensificări locale ale compoziției chimice proprii. În asemenea circumstanțe riscurile materializării unui anumit tip de coroziune selectivă devin reale. Sensibilitatea la coroziune și la CORFIS (coroziune fisurantă) se accentuează ca efect al contracției materialului depus, generatoare de puternice tensiuni remanente. Depunerile de zgură pe suprafețele metalelor ale elementelor sudate de asemenea le diminuează rezistența la coroziune. Abaterile geometrice și formarea incompletă ale cusăturilor sudate facilitează fluxuri neuniforme de tensiuni mecanice și generează concentrări de eforturi unitare; prin acestea diminuând capacitatea de rezistență mecanică la solicitări variabile și intensificând fenomenul CORFIS, mai ales în regim de vibrații mecanice.

Oricare cusătură sudată nedetensionată (de exemplu prin recoacere) este expusă primejdiei de fisurare ca efect al solicitărilor mecano-chimice. Prin urmare sudarea crează una din premisele necesare pentru generarea fenomenului CORFIS.

2.) Controlul periodic la legăturilor prin flanșe între tuburile componente a unei conducte lungi de transport produse petroliere la temperatura ambiantă. Și această operație reclamă din partea persoanelor care fac verificarea o atenție mare ca toate șuruburile și piulițele de strângere să fie în bună stare și să fie strânse în mod uniform cu un cuplu adecvat diametrului șuruburilor respective. Cele ruginite sau defecte vor fi înlocuite cu altele noi de aceeași dimensiune.

3. Controlul funcționării normale a conductei de transport produse petroliere (fluidul tehnologic)

Acest control constă din :

a) Verificarea etanșeității conductei, adică a trecerii fluidului tehnologic prin conductă fără scurgeri sau fără pierderi;

- a) Verificarea bunei funcționări a pompelor care antrenează mișcarea fluidului tehnologic ;
- c) Verificarea deschiderii și închiderii unui robinet pentru extragerea probelor de analiza chimică a fluidului tehnologic ;
- d) Trimiterea probei extrase pentru analiza compoziției chimice în vederea stabilirii tipurilor și cantității componentelor de coroziune precum și stabilirea tipurilor inhibitorilor de coroziune necesari pentru protecția anticorozivă a fluidului tehnologic.

5.1.4 Concluzii

Procedura prezentată bazată pe estimarea reducerii așteptate a grosimii peretelui conductei la sfârșitul perioadei de serviciu se aplică pentru evaluarea duratei remanente de viață a conductei luând în considerare două procese importante de degradare și vătămare ale conductei : eroziune/coroziune și fisurare prin oboseală. Grosimea minimă remanentă acceptabilă a peretelui se deduce din reducerea secțiunii admise locale a peretelui datorită eroziunii/coroziunii calculată conform Codului ASME N-480 și criteriilor de acceptare din ASME, Secțiunea XI pentru creșterea defectelor.

În aplicații această procedură recomandă postularea existenței unei vătămării reduse de suprafață, nedetectate la control, dacă nu s-a constatat degradarea peretelui. Formulele propuse pentru predicția reducerii așteptate a grosimii peretelui la sfârșitul perioadei de serviciu se bazează pe relații stabilite experimental pentru extrapolarea vitezei de eroziune/coroziune și a vitezei de creștere a defectului prin oboseală.

Calculul de predicție trebuie să fie validat prin controale în serviciu. Dacă sunt constatate unele penetrări accelerate se vor verifica condițiile de mediu și de încărcare adoptate și se va repeta calculul considerând condițiile reale de serviciu. Acest calcul revizuit va fi folosit pentru a determina următorul interval de inspecție.

5.2 Problema siguranței în exploatare a rețelelor de conducte petroliere

Sistemele de conducte ca de altfel și celelalte construcții sudate, trebuie să asigure rezistența la rupere ductilă și fragilă a componentelor sale. Ca urmare, oțelurilor pentru conducte li se impun două caracteristici mecanice esențiale; în primul rând , materialul trebuie să aibă o limită de curgere ridicată, astfel încât tensiunile din exploatare să fie inferioare limitei de curgere, iar în al doilea rând ele trebuie să asigure suficientă rezistență la inițierea și propagarea fisurilor la temperatura de exploatare, cerință care se realizează prin prescrierea unui nivel minim de tenacitate.

5.2.1 Dimensiunea critică a defectelor

Pentru producerea ruperii unei conducte sub presiune, la o tensiune inferioară rezistenței la rupere a materialului, este necesară prezența unui defect. Defectele modifică comportarea materialului sub sarcină, iar pentru aprecierea acestora se folosesc caracteristici specifice mecanicii ruperilor.

La materialele fragile tenacitatea ruperii se exprimă prin factorul critic de intensitate a tensiunilor K_{IC} . În majoritatea cazurilor, materialele conductelor nu se comportă complet fragil, astfel încât, pentru o apreciere mai corectă a tenacității ruperii, se recomandă utilizarea caracteristicilor deplasarea critică de deschidere a fisurii δ_c sau integrala critică de contur J_{IC} .

La o placă infinită cu fisura centrală, dimensiunea defectului critic, în condițiile comportării linear elastice a materialului, este $a_{cr} = 1/\pi(K_{IC}/\sigma)^2$ [12]. Deoarece tensiunea de exploatare σ se limitează la o fracțiune din valoarea limitei de curgere, din relație rezultă că oțelurile de înaltă rezistență (cu limită de curgere ridicată) vor fi mai sensibile la prezența defectelor. De asemenea rezultă că dimensiunea defectului ce conduce la rupere descrește odată cu creșterea tensiunii de exploatare, respectiv a presiunii de lucru a conductei. Aceste corelații au fost cercetate teoretic și experimental [19], urmărind ca o primă etapă în stabilirea criteriilor de garantare a siguranței în exploatare, determinarea dependenței dintre dimensiunea defectului și tensiunea de exploatare pentru care are loc ruperea. Cercetările au fost efectuate pe conducte reale, pentru o gamă largă de tipodimensiuni și grade de rezistență având executate defecte de diferite forme și dimensiuni (crestături pătrunse pe toată grosimea peretelui, crestături în formă de V cu adâncimea mai mică decât grosimea peretelui, etc.) solicitate la presiune interioară la diferite temperaturi. Pe această bază, a fost stabilită teoretic (linia continuă) și experimental (linia întreruptă) dependența dintre dimensiunea critică a defectului și tensiunea de rupere (tensiunea circumferențială produsă de presiunea interioară), prezentată în fig. 5.6.

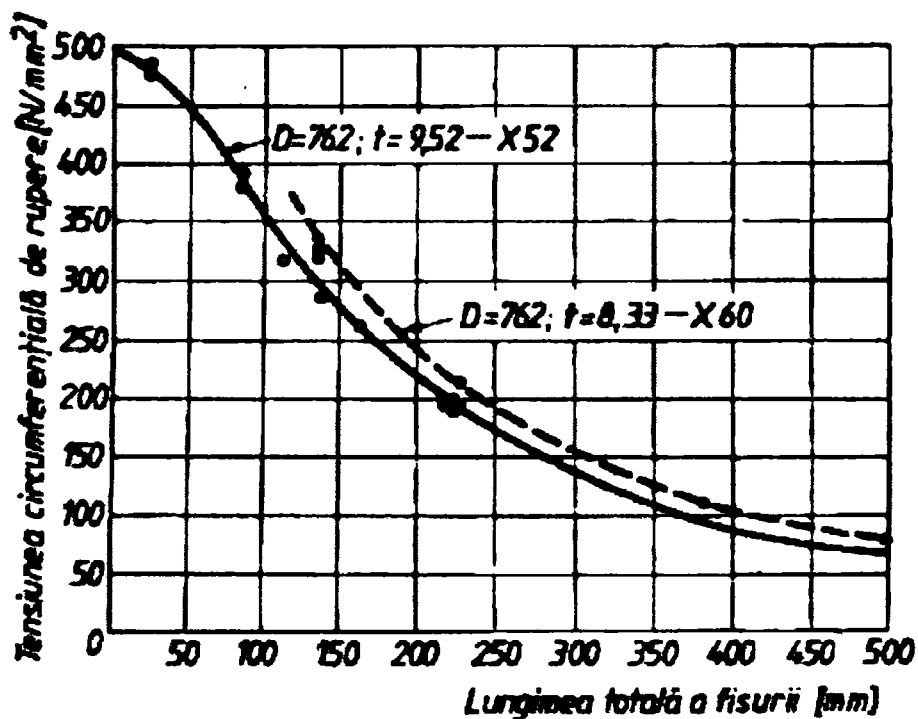


Fig.5.6. Dependența dintre lungimea fisurii pătrunse pe toată grosimea peretelui și tensiunea din exploatare ce produce ruperea

Pentru a reduce riscul de rupere în exploatare, este necesar să fie garantată absența defectelor cu o dimensiune superioară valorii critice corespunzătoare tensiunii din exploatare.

Aceasta se realizează prin control nedistructiv. Deoarece controlul nedistructiv nu se aplică în proporție de 100% proba hidraulică este cea care va

garanta dimensiunea maximă a defectului remanent în conductă, în funcție de valoarea presiunii de probă. Astfel din figura 5.7. rezultă că prin efectuarea încercării la presiuni ce conduc la dezvoltarea în conductă a tensiunii de lucru, a unei tensiuni egale cu $1,1 R_{t0,5}$ - se obțin valorile lungimii critice a fisurii, respectiv de 168 mm, 174 mm și 74 mm. Rezultă că defectele neevidențiate după proba la tensiunea $110\% R_{t0,5}$ au dimensiunea mai mică decât jumătate din cele neevidențiate prin încercarea la 110 % din tensiunea de exploatare.

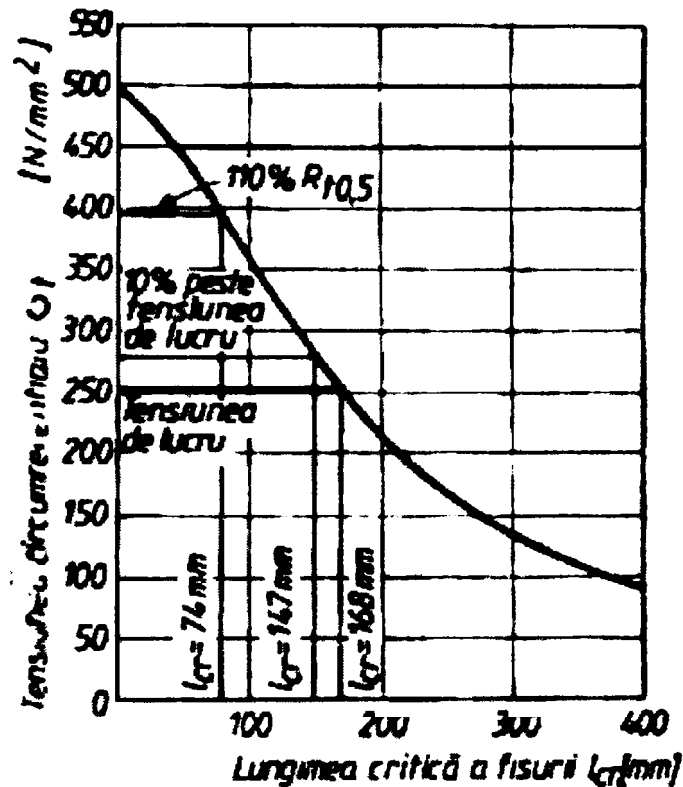


Fig.5.7. Lungimea critică a fisurii în funcție de tensiunea de exploatare. $D=762$ mm; $t=9,52$ mm; grad X52

Din cele arătate rezultă că, în urma controlului, în conducte pot fi prezente defecte care reprezintă amorse de rupere. Pentru evitarea extinderii fisurilor sub acțiunea solicitărilor din exploatare, se folosesc două categorii de metode: metode constructive, constând din încorporarea în conductă a unor elemente de oprire a propagării fisurilor și metode tehnologice, constând în principal din prescrierea unei tenacități a materialului care să asigure oprirea fisurii.

Elementele constructive utilizate pentru oprirea propagării fisurilor complică construcția și măresc costul conductei, motiv pentru care, în situațiile când este posibil, se practică specificarea valorii minime a tenacității.

5.2.2 Condițiile inițierii ruperii

Cunoașterea condițiilor extinderii defectelor de tip fisură în conducte reprezintă o problemă de interes major care este justificat de faptul că au fost semnalate numeroase ruperi catastrofale, unele din acestea cu propagarea

necontrolată a fisurii pe lungimi de până la 914 m [23]. Dacă, inițial, atenția a fost concentrată numai spre metode de prevenire a ruperilor fragile, în prezent sunt cercetate din punct de vedere tehnic și economic metode constructive și tehnologice (metalurgice) pentru prevenirea atât a ruperilor fragile cât și a celor ductile.

Prevenirea ruperilor fragile se asigură prin prescrierea pentru materialul conductei a unei temperaturi de tranziție ductil-fragil inferioare temperaturii minime de exploatare.

Temperatura de tranziție și tenacitatea se determină atât prin încercarea de încovoire prin șoc pe epruvete cu creștătura în V, cât și prin încercarea de rupere prin șoc a materialului conductei (DWTT) [6].

Criteriul de prevenire a ruperii fragile la temperaturi scăzute prin prescrierea valorii minime a energiei de rupere (rezilienței) la temperatura minimă de exploatare nu este pe deplin satisfăcător deoarece nu ține seama de influența grosimii elementului de conductă asupra comportării materialului. Odată cu creșterea grosimii produsului, este favorizată comportarea fragilă a materialului, în principal din cauze metalurgice și tehnologice (creșterea probabilității apariției defectelor pe secțiunea transversală, reducerea gradului de deformare la laminare ș.a.)

În consecință, un criteriu mai precis de garantare a comportării ductile la temperaturi scăzute îl constituie prescrierea unei tenacități (reziliențe sau energii de rupere) minime, la o temperatură de referință diferită de temperatura minimă de proiectare, determinată în funcție de dimensiunile elementului de conductă și de existența sudurii și a tratamentului termic după sudare, exprimate prin intermediul noțiunii grosime de referință . Se impune , astfel ca nivelul minim prescris pentru energia de rupere să fie garantată la o temperatură cu atât mai scăzută cu cât crește grosimea de referință , conform normativului MICH PD 178-82.

Prevenirea ruperilor ductile prezintă o importanță deosebită datorită condițiilor mai frecvente de apariție, impunând stabilirea nivelului minim al energiei de rupere care să asigure oprirea fisurii.

Condițiile inițierii ruperii prin extinderea unei fisuri preexistente în conductele sub presiune se studiază analitic, folosind teoria deplasării la vârful fisurii în materialele elastoplastice [12], pe baza căreia se stabilește corelația dintre lungimea critică a defectului de tip fisură, dimensiunile conductei, caracteristicile materialului și condițiile de exploatare pentru care se inițiază ruperea sub forma [23], [53].

$$KV_{\min} = \frac{8a}{\pi E} R_{t0.5}^2 \ln \sec \left(\frac{\pi M \sigma_t}{2 R_{t0.5}} \right) \quad (5.2)$$

În care KV este energia de rupere necesară pentru oprirea propagării ruperii ductile, în J ;

2a – lungimea defectului (fisurii) pe direcția grosimii peretelui, în mm ;

$R_{t0.5}$ – limita de curgere (convențională) a materialului conductei, în N/mm²

σ_t – tensiunea circumferențială) în peretele conductei, în N/mm²

E – modulul de elasticitate al materialului, în N/mm²

M - factor de corecție al tensiunii circumferențiale în scopul asimilării conductei sub presiune cu o placă plană solicitată la tracțiune cu tensiunea $M \cdot \sigma_t$. Pentru determinarea factorului M, în cazul fisurilor pătrunse, se recomandă în [12] relația:

$$M = (1 + 1,61a^2/Rt)^{1/2} \quad (5.3)$$

În care R este raza conductei, iar t grosimea peretelui.

În cazul fisurilor nepătrunse, se recomandă M=1

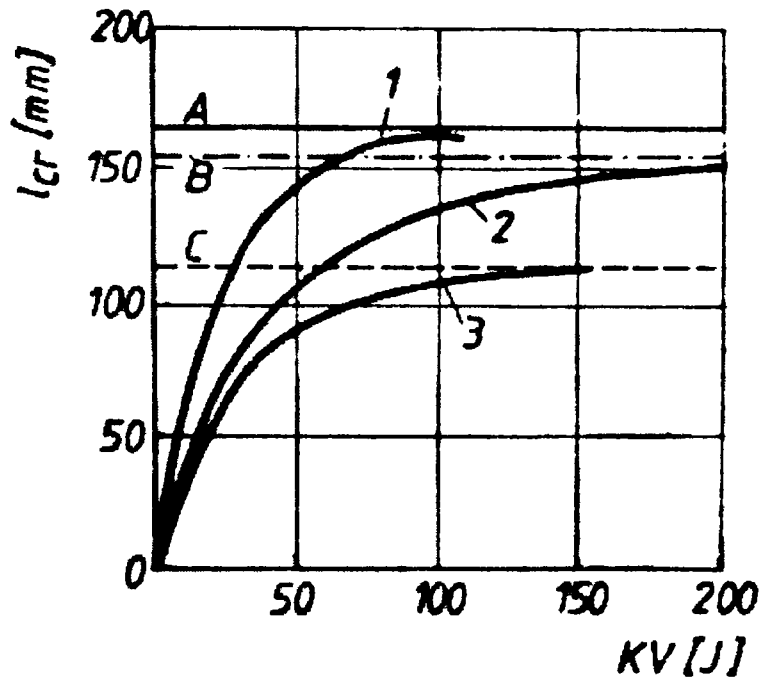


Fig. 5.8 . Corelația dintre lungimea critică a fisurii și energia de rupere KV

Reprezentarea grafică a expresiei (5.2) pentru conducte cu diferite dimensiuni (fig. 5.8) evidențiază faptul că dimensiunea critică a defectului crește odată cu creșterea tenacității materialului. În figura 5.8. este reprezentată influența tenacității și a rezistenței materialului asupra dimensiunii critice a fisurii pentru trei variante de conducte de gaze (debit de $50-80 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{zi}$), ale căror caracteristici sunt redată în tabelul 5.1 [11], [19]. Varianta 1 corespunde situației actuale din punct de vedere al clasei de rezistență a materialului, iar variantele 2 și 3 reprezintă gradele de rezistență de perspectivă permițând creșterea presiunii fluidului fără majorarea grosimii peretelui. Curbele 1, 2 și 3 tind asimptotic către dreptele notate A, B respectiv C (care corespund dimensiunii critice a defectului ce conduce la ruperea) chiar în condițiile în care tenacitatea materialului crește nelimitat. Se observă că, odată cu creșterea gradului de rezistență (trecerea de la curba 1 la curba 2) materialul devine mai sensibil la inițierea ruperii prin propagarea fisurilor, la aceeași tenacitate dimensiunea critică a fisurii fiind mai mică la materialul 2.

Caracteristicile conductelor analizate în figura 5.8.

Tabelul 5.1.

Varianta	D mm	t mm	Gradul de rezistență	
			Simbol	$R_{t0,5}$
1	1219	13,71	X70	482
2	1219	13,71	X100	690
3	914	10,27	X100	690

Pentru aceeași mărime a defectului, creșterea rezistenței impune creșterea tenacității materialului.

Corelațiile dintre mărimea defectului și parametrii constructivi și funcționali ai conductelor ce conduc la inițierea ruperii permit elaborarea criteriilor de garantare a siguranței în exploatare. Principial, energia necesară propagării fisurii, furnizată de presiunea fluidului transportat, este echilibrată de rezistența materialului la propagarea fisurii, care este o funcție de tenacitatea acestuia. Pe această bază se poate stabili grafic tenacitatea (energia de rupere) necesară pentru oprirea fisurii.

Cercetările menționate ale căror rezultate au fost reprezentate în figura 5.8. sunt confirmate de rezultatele experimentale.

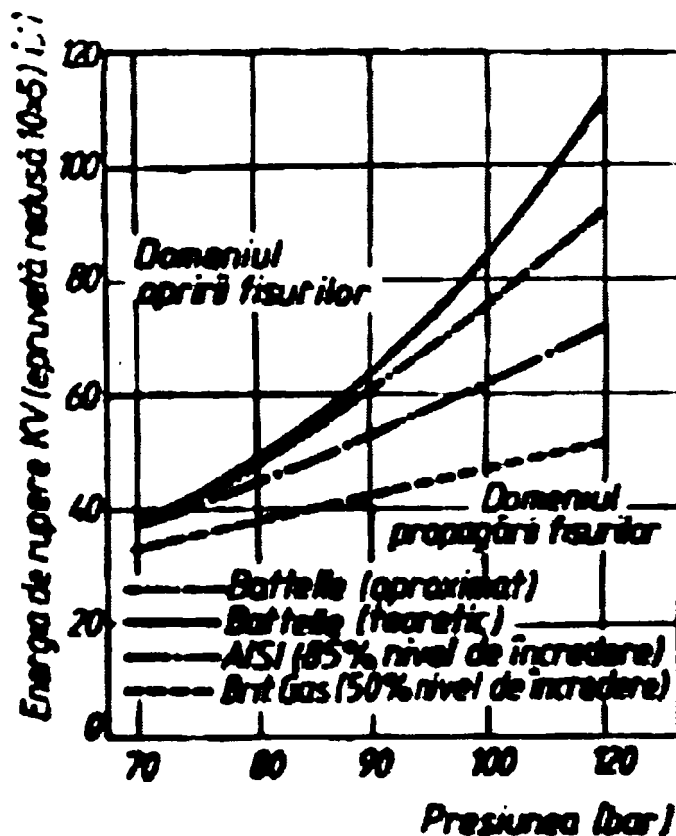


Fig.5.9. Energia de rupere minimă necesară pentru oprirea fisurilor, obținută teoretic și experimental pentru țevi cu $D = 1219$ mm, $t = 15,87$ mm, grad X 70 în diferite laboratoare (Battelle Memorial Inst., British Gas Corp și Amer. Iron and Steel Inst. AINSI)

În figura 5.9. sunt prezentate comparativ rezultatele teoretice și experimentale obținute pentru diferite categorii de țevi: [22]

- a. - sudate elicoidal
- b. - sudate longitudinal și
- c. - laminate.

Se observă că între metodologiile determinării energiei de rupere minime necesare pentru oprirea fisurilor, propuse de diferite laboratoare, diferențele sunt mici. Totodată, se constată că țevile sudate elicoidal prezintă o siguranță ridicată la propagarea fisurii, explicată prin tenacitatea ridicată a țevii în direcție circumferențială.

5.2.3 Criterii de garantare a siguranței în exploatare

Majoritatea metodelor de prevenire a propagării fisurilor în conducte au la bază specificarea energiei de rupere minime determinată pe epruvete cu creștătura în V (KV). În acest scop, conductele se împart în trei categorii [23].

a. Conducte pentru transportul produselor lichide. Presiunea lichidelor scade rapid în cazul fisurării conductei, astfel încât ea nu poate conduce la propagarea fisurii. Tenacitatea (energia de rupere) impusă de condiția prevenirii ruperilor fragile, este suficientă și pentru evitarea ruperilor ductile.

b. Conducte pentru transportul gazelor. Gazele se depresurizează relativ lent în cazul fisurării conductei, energia înmagazinată conducând la propagarea fisurii cu o viteză superioară undeii de depresurizare. În acest caz, pentru oprirea propagării fisurii este necesară prescrierea unei tenacități ridicate, pentru a cărei determinare au fost propuse relații de forma (5.2).

c. Conducte pentru transportul produselor bifazice gaz-lichid. Depresurizarea produselor bifazice decurge după un mecanism complex, intermediar, între depresurizarea lichidelor și cea a gazelor, fiind de regulă necesară determinarea experimentală a variației presiunii.

În continuare se prezintă metodologia de determinare a energiei de rupere minime necesare pentru oprirea propagării fisurii într-o conductă, pentru cele 3 situații distincte menționate.

Energia de rupere astfel determinată este de obicei superioară valorii necesară pentru evitarea inițierii fisurii, astfel încât valorile calculate asigură inhibarea ambelor stadii ale ruperii (inițierea și propagarea fisurilor). Metodologia este aplicabilă conductelor cu grosimea de până la 38 mm, exploatate la temperaturi cuprinse între 0 121 ° C și are la bază cercetările efectuate de American Gas Assoc., în cadrul laboratoarelor Battelle Memorial Instit [23].

În funcție de fluidul transportat, conductele sunt clasificate în patru clase pentru care sunt prescrise tenacități diferite.

Clasa 1.- cuprinde conducte pentru apă de injecție, țiței brut și produse cu presiunea de vapori maximă 7,91 bar. Presiunea de vapori redusă permite prescrierea unei tenacități minime a materialului.

Clasa 2.- cuprinde conductele pentru lichide a căror presiune de vapori depășește 7,91 bar.

Clasa 3.- cuprinde conductele îngropate pentru transportul gazelor și lichidelor bifazice.

Clasa 4.- cuprinde conductele supraterane pentru transportul gazelor și al fluidelor bifazice.

Conductelor neincluse în clasele de mai sus nu le sunt impuse cerințe speciale de tenacitate.

Garantarea tenacității conductelor din clasele 1.....4 se face pe baza încercării la încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătură în V și a încercării de rupere prin șoc a materialului conductei (DWTT) [6].

Specificarea energiei de rupere. Aceasta depinde de tipul și utilizarea conductei, principalele recomandări fiind următoarele:

- pentru conductele din cl.1 nu este specificată valoarea minimă iar încercarea se efectuează cu scop informativ. Pentru conductele submarine gradele X52 și superioare, energia de rupere minimă recomandată are valorile prezentate în tabelul 5.2.

Valorile KV_{min} pentru conducte submarine

Tabelul 5.2

Gradul de rezistență	KV _{min} [J]	Gradul de rezistență	KV _{min} [J]
X 52	27	X 65	33
X 60	30	X 70	35

Pentru conductele din clasa 2, presiunea ridicată dezvoltă solicitări importante ce determină propagarea fisurii, astfel încât pot fi întâlnite valori ale presiunii de lucru care să impună o tenacitate infinită pentru evitarea propagării acesteia (vezi fig. 5.8. dreptele A,B,C).

Pentru determinarea valorii minime a energiei de rupere din condiția opririi fisurii, se utilizează relația Battelle [23] dedusă pe baza relației generale (5.2)

$$KV_{\min} = \frac{2A}{\pi E} \sigma_c^2 \sqrt{\frac{DE}{2}} \ln \sec \frac{\pi 33,3 \sigma_0}{2 \sigma_c} \quad (5.4)$$

În care A este aria secțiunii transversale a epruvetei normale ($A=80\text{mm}^2$); E – modulul de elasticitate în N/mm^2 ; σ_c – limita de curgere efectivă în N/mm^2 ; D- diametrul exterior în mm; t- grosimea peretelui în mm; σ_0 – tensiunea de oprire a fisurii (tensiunea maximă pe care o fisură o poate suporta fără să se propage), în N/mm^2 . Obținerea valorilor tenacității determinate cu relația (5.4) impune producătorului de țevi controlul mai riguros al tehnologiei de fabricație. Analizând statistic valorile energiei de rupere realizate la un volum mare de țevi (cca. 300.000 tone) în lucrarea [18] se demonstrează că poate fi redusă tenacitatea minimă prescrisă cu cca 27%. În acest caz mai puțin de 5% din țevi nu îndeplinesc cerințele de tenacitate, reducându-se sensibil costul fabricației țevilor. Pe această bază modificând relația (5.4) se obține relația de determinare a energiei de rupere minime,

$$KV_{\min} = \frac{2 \cdot 0,73 A}{\pi E} \sigma_c^2 \sqrt{\frac{Dt}{2}} \ln \sec \frac{5,23 p_v}{(1,39 - K) p_{\max}} \quad (5.5)$$

în care 0,73 este un coeficient ce provine din ipotezele statistice adoptate; $\sigma_c = R_{p0,2} + 68,9 + K[\text{N/mm}^2]$ unde K are valorile prezentate în tabelul 5.3.; p_c - presiunea de vapori a lichidului din conductă, în bar (provine din experimentarea în relația: $\sigma_0 = p_v D / 2t$); p_{\max} - presiunea de lucru maxim admisibilă, în bar; valoarea sa corespunde uzual unei tensiuni în conducta de $0,72 R_{p0,2}$; k= constantă.

Pe baza relației (5.5), în figura 6.18, d și f din [11] sunt prezentate diagramele de determinare a energiei de rupere minime pentru gradele de rezistență standardizate, în care D este diametrul conductei, iar t grosimea peretelui.

Pentru conductele din clasa 3, determinarea valorii minime pentru energia de rupere din condiția opririi fisurii se poate face cu relația Battelle [23]:

$$KV_{\min} = 4,466 \cdot 10^{-7} \sigma_t^2 \left(\frac{Dt}{2} \right)^{3/4} A \quad (5.6)$$

În care σ_t este tensiunea circumferențială în conductă, în N/mm^2 ; D - diametrul conductei în mm; t - grosimea peretelui conductei în mm; A - aria secțiunii transversale a epruvetei de reziliență. (80mm^2)

Valorile termenilor K și k

Tabelul 5.3

Gradul de rezistență	K [N/mm ²]	k	Gradul de rezistență	K [N/mm ²]	k
B	103	0,40	X 60	41,4	0,23
X 42	89,6	0,33	X 65	34,5	0,21
X 52	62,1	0,27	X 70	34,5	0,20

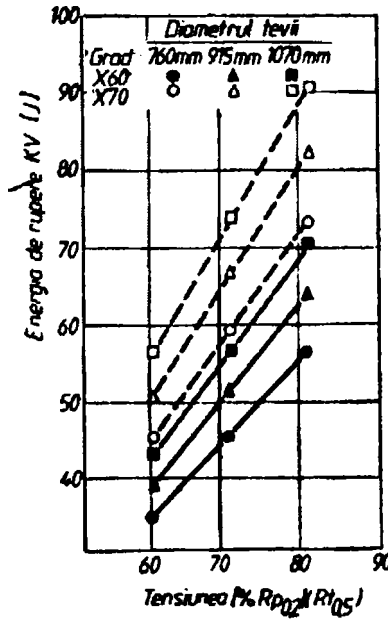
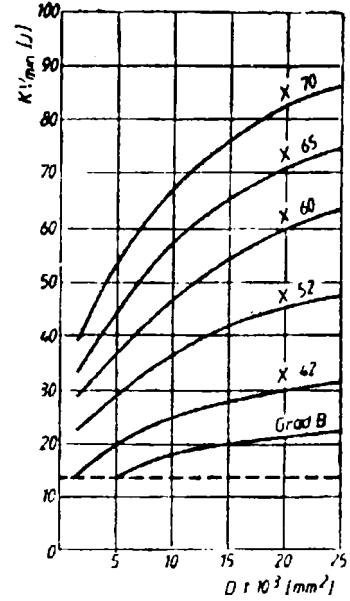
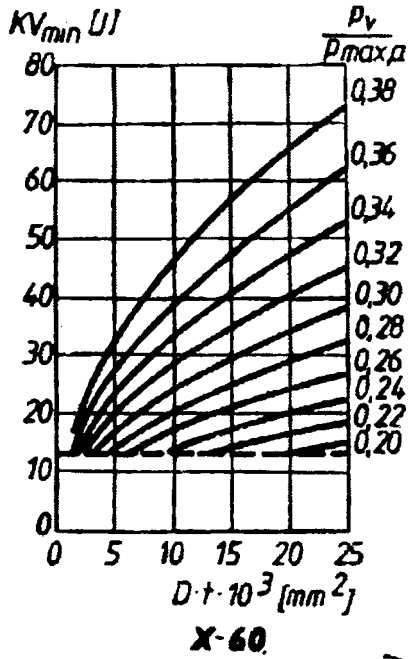


Fig. 5.12

Pe această bază, în Fig. 5.11 este reprezentată energia minimă de rupere, specificată din condiția opririi fisurii din conducte de diametru mare din oțeluri grad X 60 și X 70, pentru o gamă largă a tensiunilor de exploatare. Spre exemplu pentru asigurarea opririi fisurii la o conductă cu diametrul 915 mm, grad X 60, lucrând la o tensiune de 80% din limita de curgere, este necesară o energie de rupere de 61 J. Pentru aceeași conductă executată din oțel grad X70, energia de rupere necesară este de 80 J, însă utilizarea gradului X 70 permite reducerea cu cca 21% a grosimii de perete față de gradul X60, ceea ce conferă importante avantaje economice.

Pe baza considerentelor statistice menționate, în lucrarea [23] se reduc valorile energiei de rupere determinate cu relația (5.6) prin înmulțire cu coeficientul 0,73, în figura 5.13 fiind prezentate diagramele de determinare a energiei de rupere minime, din condiția opririi fisurii pentru gradele de rezistență standardizate.

Pentru conductele din clasa 4 determinarea valorii minime a energiei de rupere din condiția opririi fisurii se pot face cu relația Battelle [18]

$$KV_{\min} = 6,68 \cdot 10^{-5} \sigma_i^2 \left(Dt/2 \right)^{0,284} \quad (5.7)$$

în care semnificația notațiilor este aceeași cu cea din relația (5.6)

Pe baza considerentelor statistice menționate în [23] se reduc valorile energiei de rupere prin multiplicare cu coeficientul 0,73 în figura 5.8 fiind prezentate diagramele de determinare a energiei de rupere pentru gradele de rezistență standardizate.

Pe baza energiilor de rupere minime, determinate din condiția opririi fisurii, sunt prescrise energiile de rupere ce urmează a fi asigurate și verificate la țevile obținute prin diferite tehnologii de fabricație în funcție de mărimea lotului fabricat, prezentate în tabelul 5.4. Valoarea superioară reprezintă media valorilor obținute pe trei epruvete, iar valoarea inferioară reprezintă valoarea minimă admisă pentru oricare din cele trei epruvete încercate. Nu se admit energii inferioare valorilor 18/14 J.

Valorile prescrise pentru energia de rupere a conductelor (in J)

Tabelul 5.4

Mărimea lotului comandat	Diametrul [mm]	Tipul țevii		
		Sudate longitudinal	Sudate elicoidal	Laminate
< 2722	<406	$(L) \frac{2,10KV_{\min}}{1,86KV_{\min}}$	$(L) \frac{2,10KV_{\min}}{1,86KV_{\min}}$	$(L) \frac{1,80KV_{\min}}{1,60KV_{\min}}$
	≥406	$(T) \frac{1,50KV_{\min}}{1,33KV_{\min}}$	$(TDL) \frac{1,50KV_{\min}}{1,33KV_{\min}}$	$(T) \frac{1,50KV_{\min}}{1,33KV_{\min}}$
> 2722	<406	$(L) 1,40KV_{\min}$	$(L) 1,40KV_{\min}$	$(L) 1,20KV_{\min}$
	≥406	$(T) KV_{\min}$	$(TDL) KV_{\min}$	$(T) KV_{\min}$

Notații: L-epruvete longitudinale; T-epruvete transversale; TDL- epruvetă transversală direcției de laminare.

5.3. Exemple (după manualul [81])

Exemplu 1. Să se prescrie energia de rupere pentru țevile sudate longitudinal ale unei conducte destinate transportului gazelor naturale lichefiate cu dimensiunile $D=965$ mm și $t = 16,5$ mm, grad $X=60$, comanda fiind mai mică decât 2722 t.

Rezolvare. Conducta se încadrează în clasa 2. Corespunzător compoziției gazului, temperaturii și presiunii de exploatare proiectantul a determinat presiunea de vaporizare $P_v=27$ bar, iar presiunea maximă admisibilă de lucru de 100 bar.

Se calculează $p_v / p_{max} = 0,27$ și produsul $Dt = 15633$ mm².

Din figura 5.5. , corespunzător acestor valori se determină $KV_{min} = 24$ J din condiția opririi fisurii.

Din tabelul 5.4 se determină valoarea medie și cea minimă pentru energia de rupere a epruvetelor transversale, de 36/32 J.

Exemplu 2 Să se prescrie energia de rupere pentru țevile sudate elicoidal ale unei conducte îngropate grad $X 65$, cu dimensiunile $D = 1016$ mm și $t = 11,9$ mm, comanda fiind mai mare de 2722 t.

Rezolvare: Conducta se încadrează în clasa 3. Se calculează produsul $Dt = 1016 \times 11,9 = 12090$ mm². Din figura 5.11, pentru grad $X 65$, rezultă $KV_{min} = 60$ J din condiția opririi fisurii.

Din tabelul 5.4. , energia de rupere specificată pentru epruvete transversale direcției de laminare rezultă 60 J. Aceasta semnifică faptul că orice epruvetă încercată din orice șarjă de material, trebuie să aibă energia de rupere minimă 60J.

Exemplu 3. Să se prescrie energia de rupere pentru țevile laminate ale unei conducte supraterane pentru transportul gazelor, din oțel grad $X 52$ cu dimensiunile $D= 356$ mm și $t=16,3$ mm., comanda fiind mai mică decât 2722 t.

Rezolvare: Conducta se încadrează în clasa 4 . Se calculează produsul $Dt = 336 \times 16,3 = 5803$ mm².

Din figura 5.8. corespunzător gradului $X52$, se obține $KV_{min} = 31$ J din condiția opririi fisurii. Din tabelul 5.7. se determină valoarea medie și cea minimă pentru energia de rupere pentru epruvetele longitudinale de 56/50 J.

La recepția lotului de țevi, se verifică respectarea prescripțiilor de tenacitate. Determinarea energiei de rupere se face pe epruvete longitudinale (L) pentru metalul de bază și transversale (T) atât pentru metalul de bază cât și pentru cusătură. Pentru țevile cu diametrul de 406 mm se utilizează numai epruvete longitudinale, iar pentru țevile cu $D \geq 406$ mm se utilizează epruvete conform tabelul 6.55.

Energia de rupere se determină ca medie a minimum trei epruvete. Temperatura de încercare este de $-29 \pm 1,7$ °C. Se pot utiliza epruvete cu secțiunea normală sau redusă în cazul în care grosimea peretelui nu permite executarea epruvetelor cu secțiunea 10x10mm². La epruvetele reduse factorul de corecție este de 10/a, unde a este grosimea epruvetei (in mm), obținându-se o valoare a energiei de rupere echivalentă celei determinate pe epruvetele normale.

Tipul și orientarea epruvetelor de încovoire prin șoc la conductele cu $D \geq 406$ mm.

Tabelul 5.5.

Clasa conductei	Țevi sudate longitudinal și prin rezistență electrică	Țevi sudate elicoidal	Țevi laminate
1	T	T	T
2	T și L	T și L	T și L
3	T	TDL	T
4	T	TDL	T

L- epruvete longitudinale ; T - epruvete transversale ; Transversal direcției de laminare pentru conducte din clasa 2 încercarea are caracter informativ.

5.4. Specificarea fibrozității ruperii. Aceasta se prescrie atât la încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătura în V, cât și la încercarea de rupere prin șoc a materialului conductei (DWTT).

La încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătura în V, pentru conductele din clasa 1 nu este prescrisă fibrozitatea ruperii. Pentru conductele din clasele 2,3 și 4 toate epruvetele prelevate din metalul de bază vor prezenta fibrozitatea minimă 90% [23].

Încercarea de rupere prin șoc a materialului conductei (DWTT) se aplică țevilor cu diametrul $D \geq 508$ mm din toate gradele de rezistență și pentru toate clasele (1...4). Se recomandă ruperea a 2 epruvete pe șarjă, încercarea efectuându-se la temperatura de $0 \pm 1,7$ ° C. Fibrozitatea minimă admisă este 80%. Prelevarea epruvetelor se face conform indicațiilor de la paragraful 6.2.3. din manualul [81].

CAP. 6 SINTEZA LUCRĂRII. CONTRIBUȚII PERSONALE

6.1 Sinteza lucrării

Teza prezentată cuprinde rolul activității de cercetare a autorului pe parcursul a peste zece ani în calitate de conducător a unei întreprinderi de instalații de execuție a unor rețele de conducte de transport produse petroliere în zona de vest a țării noastre și în ultimii opt ani și ca doctorand pentru realizarea prezentei lucrări de doctorat sub conducerea atentă a Prof. Dr. Ing. Iosif Hajdu de la Catedra de Rezistența Materialelor de la UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DIN TIMIȘOARA.

Teza este structurată pe șase capitole.

În Capitolul I INTRODUCERE (pagina 5 la pagina 12) se face o scurtă prezentare a celor cinci modalități și mijloace folosite pentru transportul țițeiului, a produselor petroliere, petrochimice și a gazelor lichefiate tehnice. Dintre toate acestea transportul prin conducte (magistrale) este considerat ca fiind cel mai perfecționat atât din punct de vedere tehnic cât și economic. Transportul prin conducte prezintă următoarele avantaje principale: etanșeitate perfectă din punct de vedere tehnic și posibilitatea unei pompări (transportări) neîntrerupte.

Transportul prin conducte se poate face la unele fluide cu ajutorul pompelor, compresoarelor și ventilatoarelor, iar la altele folosind o parte din energia pe care aceste fluide o posedă.

În ultimul paragraf 1.5 autorul a urmărit să justifice importanța temei de doctorat respectiv economia care se poate realiza în urma prelungirii duratei de viață a sistemelor de conducte pentru transportul produselor petroliere. Soluția acestei probleme este aplicarea consecventă a conceptelor mecanicii ruperii pentru evitarea inițierii și propagării fisurilor în conductele de transport petrolier sau cel puțin amânarea cât mai mult a apariției acestor fisuri nedorite.

În Capitolul 2. CARACTERISTICI ALE CONDUCTELOR DE TRANSPORT PRODUSE PETROLIERE (pagina 12 la pagina 43). În prima parte se face o prezentare a formelor, a dimensiunilor și condițiilor tehnice impuse acestor conducte, în special cele de rezistența materialelor.

În paragraful 2.1 se menționează că în România „formele constructive, dimensiunile și condițiile tehnice generale de calitate ale conductelor destinate transportului de produse petroliere sunt reglementate prin mai multe standarde”. Astfel aceste conducte pot fi executate prin două procedee: a) prin deformare plastică la cald de regulă prin laminare (prin metoda Manesman) fără sudură și b) în construcție sudată. La fabricarea conductelor de diametru mare se folosesc în principal țevi în construcție sudate elicoidale.

Caracteristicile mecanice determinate prin încercarea la tracțiune (STAS 200-87) și (STAS 6718-85). Încercarea la tracțiune a țevelor reprezintă principalul criteriu de clasificare a țevelor pentru conducte de transport în clase sau grade de rezistență.

În paragraful 2.2 sunt formulate cerințele unei proiectări raționale care să asigure funcționarea fără defecte majore a unei rețele de conducte pe toată durata de utilizare prevăzută. Această proiectare inclusiv calculul hidraulic care urmărește determinarea diametrului interior D_i al conductei, determinarea presiunii p necesară

pentru pompare a numărului și amplasamentului stațiilor de pompare, determinarea debitului ș.a.

De asemenea calculul mecanic al conductelor urmărește determinarea grosimii și a pereților conductelor pentru asigurarea unei comportări corespunzătoare a acestora la solicitările din exploatare. Condiția de rezistență este satisfăcută dacă $\sigma_{\max} \leq \sigma_a$.

În Capitolul III intitulat „ELEMENTE DE MECANICA RUPERII” (pagina 44 la pagina 106) se precizează de la început că proprietatea materialelor metalice reale, inclusiv a elementelor de rezistență, respectiv a componentelor sistemelor tehnice reale sunt structural imperfecte care pot ceda la acțiuni mecanice și termice și care tind să le accentueze starea dată de imperfecțiunile structurale de tip fisură și care se numesc fracturare sau mai simplu Mecanica ruperii.

Se poate deci afirma că Mecanica ruperii urmărește să fundamenteze teoretic și să confirme experimental metodele de evaluare cantitativă a disponibilității de capacitate portantă mecanică și deci a intensificării nivelului de solicitare în condițiile considerării atât a discontinuităților existente cât și a modului specific de comportare sub sarcina a materialelor tehnice utilizate în funcție atât de caracteristicile dimensionale proprii cât și de cele ale regimurilor de exploatare.

Mecanica ruperii înlocuiește unele caracteristici mecanice ale proiectării tradiționale (rezistența de rupere, duritatea etc.) prin concepte și mărimi fizice noi, care definesc univoc caracteristici noi.

Una din caracteristicile de bază prin care se apreciază comportarea mecanică a oțelurilor conductelor este tenacitatea. Încă nu există o definiție unică a tenacității. Una din cele mai bune se consideră: tenacitatea este însușirea unui material de a suferi până la rupere sub acțiunea unui nivel de solicitare ridicat deformații plastice mari. Se mai definește prin „acea proprietate a unui material de a se opune inițierii sau propagării (dezvoltării) fisurilor”. În funcție de prezența sau absența deformațiilor plastice până la rupere, ruperea materialelor poate fi ductilă sau fragilă. Ruperea ductilă fiind precedată de deformații plastice mari are o energie de rupere apreciabilă pe când la ruperea fragilă această energie este mult mai mică.

Pentru ca în prezența unui defect fizic să nu se producă distrugerea (ruperea) unui element de rezistență este necesar ca valoarea caracteristicii de tenacitate determinată analitic pentru acel defect să fie mai mică decât a valorii critice a caracteristicii de tenacitate, numită tenacitate la rupere.

Tenacitatea la rupere este o caracteristică mecanică care se determină experimental. În prezent sunt cunoscute mai multe caracteristici de tenacitate la rupere, stabilite pe baza conceptelor Mecanicii ruperii și toate sunt fundamentate teoretic. Cele mai utilizate caracteristici de tenacitate care cuprind și metodele experimentale de determinare a caracteristicilor critice de tenacitate la rupere sunt următoarele:

- a) factorul critic de intensitate al tensiunii K_C
- b) deschiderea critică la vârful fisurii δ (COD, STOD, STOA, SMOD)
- c) integrala critică de contur I_C

Mecanica ruperii se bazează pe unele ipoteze specifice fenomenului ruperii și este caracterizat de trei faze: - inițierea fisurii; - propagarea (dezvoltarea) fisurii; oprirea (inhibarea) propagării fisurii.

Deoarece tenacitatea la rupere a unui material se exprimă printr-o caracteristică de tenacitate care a putut fi determinată mai ușor, în capitolul III al tezei s-au trecut și câteva corelații între astfel de caracteristici de tenacitate.

În paragrafele 3.5 ... 3.12 se prezintă după manualul [76] principalele etape care trebuie parcurse pentru calculul caracteristicilor de tenacitate pentru o serie de

conducte de transport produse petroliere, cu diferite defecte. Stabilirea relațiilor de calcul s-a făcut pe rând când fisura considerată era situată în domeniul elastic; apoi în domeniul plastic și în final în domeniul elasto – plastic.

În paragraful 3.12 se prezintă metodologia de unificare pentru determinare a tenacității la rupere acceptată pe plan mondial. Au fost propuse pentru acceptare cele trei caracteristici care s-au notat cu a); b); c).

Paragraful 3.13 prezintă contribuțiile autorului privind studiul influenței vitezei de încărcare și a orientării suprafețelor de rupere raportate la direcțiile de laminare asupra tenacității de rupere a oțelului pentru vasele sub presiune.

În Capitolul IV COROZIUNEA MATERIALULUI TUBULAR ȘI PROTECȚIA ÎMPOTRIVA EFECTELOR ACESTEIA (pagina 107 la pagina 140) se arată că materialul tubular folosit la transportul țiteiului și produselor petroliere se află în contact cu substanțe tensio – active, săruri minerale și gaze dizolvate în fluidul de lucru în diferite condiții de solicitări mecanice, temperatură și presiune, fiind supuse la diferite procese de coroziune chimică, electrochimică și la fenomene de fragilizare și rupere dependente de factori de material și de factori de mediu. Coroziunea localizată în special sub formă de ciupituri (piting) reprezintă forma uzuală și cea mai periculoasă a coroziunii. Datorită conținutului ridicat de suspensii solide din fluidele vehiculate, acestea exercită și o intensă acțiune corozivă favorizând fenomenele de coroziune prin îndepărtarea mecanică a produselor de coroziune și prin aportul conținutului de noi agenți corozivi la suprafața metalului.

De asemenea s-a evidențiat fenomenul a) – de fisurare corozivă sub tensiune (FCT), simbolizat și SCC (Stress Corrosion Cracking) prin care se definește fenomenul de rupere fragilă prin fisurarea unui metal prin acțiunea combinată a tensiunilor de tracțiune și coroziunii.

Alte două fenomene periculoase se consideră următoarele : b) – fisurarea sub tensiune în mediul acid cu H_2S , simbolizată SSC (Sulfide Stress Cracking) care definește fenomenul de rupere fragilă a oțelurilor cu limita de curgere ridicată chiar dacă acestea sunt rezistente la fenomenele obișnuite de coroziune; c) – ruperea în trepte pe grosimea materialului simbolizat CIC (Hydrogen Induced Cracking) reprezintă formarea unor umflături („blisters”), provocate de acumularea hidrogenului la presiuni ridicate în defectele interne, la suprafața pieselor din oțel cu limită de curgere coborâtă.

În paragrafele următoare 4.2. și 4.3 se prezintă principalii agenți corozivi ai garniturii de foraj și a burlanelor de tubaj și ai țevilor de extracție. În paragraful 4.4. se analizează fisurarea corozivă inclusiv metodele de prevenire a acesteia, iar în paragrafele 4.5 ... 4.7 se dau o serie de informații utile despre acțiunea hidrogenului asupra oțelurilor expuse mediilor acide cu hidrogen sulfurat respectiv despre coroziune datorită CO_2 și coroziunea conductelor de colectare și transport.

În ultimul paragraf 4.8 este prezentată detaliat problema protecției împotriva coroziunii. Metodele sunt împărțite în următoarele cinci grupe:

- Protecția prin tratarea mediului adiacent metalului pentru a-i micșora agresivitatea;
- Protecția prin micșorarea intensității de desfășurare a proceselor catodice și / sau anodice;
- Protecția prin metode electrochimice;
- Protecția prin acoperirea (tratarea) suprafețelor expuse mediului agresiv;
- Combaterea coroziunii conductelor metalice subterane.

În Capitolul 5 intitulat MĂSURI CARE URMĂRESC PRELUNGIREA DURABILITĂȚII SISTEMELOR DE CONDUCTE PETROLIERE ȘI GAZE (pagina 141 la

pagina 169) sunt prezentate părerile a doi cercetători de prestigiu despre problema prelungirii duratei de funcționare bună cât mai lungă a sistemelor de conducte de transport produse petroliere.

Aceste sisteme de conducte având în general o lungime mare reclamă costuri de investiții foarte importante. Prin urmare funcționarea rentabilă a acestor sisteme de conducte implică o durată de funcționare fără defecte majore cât mai lungă. Realizarea acestui deziderat reclamă o proiectare competentă a sistemului de conducte prin alegerea oțelului cel mai potrivit, stabilirea atentă a traseului conductei, alegerea judicioasă a îmbinărilor între tuburi, stabilirea tensiunilor admisibile în pereții conductelor.

Legat de această problemă, fostul cadru didactic de la Catedra de Rezistența Materialelor de la UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DIN TIMIȘOARA Prof. Dr. Ing. Mircea Rațiu a publicat în revista „SUDURA” din Timișoara în Nr. 4 din 1995 articolul de fond cu titlul „Aplicarea mentenanței preventive la sistemele de conducte din centralele nucleare” [65], când autorul era încă în serviciul firmei „VECTRA TECHNOLOGIES” din San Ramon California SUA. Importanța conținutului articolului citat rezidă și în faptul că o bună parte din prevederile sale se pot aplica și altor sisteme de conducte, ca de exemplu sistemelor de conducte de transport produse petroliere.

În prezent la noi nu sunt încă cunoscute toate datele necesare pentru proiectarea rațională a conductelor care să satisfacă și cerințele Mecanici ruperii, ori acestea reprezintă condițiile necesare pentru elaborarea unui model de degradare pentru calculul penetrării vătămării la evaluarea duratei remanente de viață. Luând ca model preocuparea specialiștilor din țările mai avansate din punct de vedere tehnic, pentru achiziția datelor necesare mentenanței preventive se va putea ajunge și la noi la estimarea limitei de siguranță pentru continuarea funcționării sistemelor de conducte de transport produse petroliere. În lucrarea [65] se prezintă o procedură de evaluare a duratei remanente de viață a conductelor supuse fisurării prin eroziune / coroziune și oboseală utilizând o procedură analitică coroborată cu rezultatele inspecției de supraveghere pentru exploatarea industrială.

În paragraful 5.2 al capitolul V este prezentată „Problema siguranței în exploatare a rețelelor de conducte petroliere”, (extras din manualul) [81].

Rezolvarea acestei probleme reclamă de la început din partea oțelurilor pentru conducte ca acestea să satisfacă două caracteristici necesare esențiale. În primul rând ele trebuie să aibă o limită de curgere ridicată, astfel ca tensiunile maxime din exploatare să fie inferioare limitei de curgere, iar în al doilea rând ele trebuie să asigure suficientă rezistență la inițierea și propagarea fisurilor la temperatura de exploatare, respectiv să aibă un nivel de tenacitate la rupere suficient de ridicat.

Cercetările au arătat că pentru a reduce riscul de rupere în exploatare, este necesar să fie garantată absența defectelor cu o dimensiune superioară valorii critice corespunzătoare tensiunii din exploatare. Aceasta se realizează fie prin control nedistructiv fie prin proba hidraulică.

Corelațiile dintre mărimea defectului și parametrii constructivi și funcționali ai conductelor ce conduc la inițierea ruperii permit elaborarea criteriilor de garantare a siguranței de exploatare. Principial, energia necesară propagării fisuri furnizată de presiunea fluidului transportat, este echilibrată de rezistența materialului la propagarea fisurii, care este o funcție de tenacitatea acestuia. Pe această bază se poate stabili grafic tenacitatea (energia de rupere) necesară pentru oprirea fisurii. În prezent metodele de prevenire a propagării fisurilor în conducte au la bază specificarea energiei de rupere minime determinată pe epruvete cu crestătura în v

(kv). În acest scop conductele se împart în trei categorii: a) conducte pentru transportul produselor lichide; b) conducte pentru transportul gazelor; c) conducte pentru transportul produselor bifazice gaz – lichid.

Energia de rupere astfel determinată este de obicei superioară valorii necesară pentru evitarea inițierii fisurii, astfel încât valorile calculate asigură inhibarea ambelor stadii ale ruperii (inițiere și propagarea fisurii).

În funcție de fluidul transportat, conductele sunt clasificate în patru clase pentru care sunt prescrise tenacități diferite. Specificarea energiei de rupere. Acesta depinde de tipul și utilizarea conductei. Pentru conducte submarine, energia de rupere minimă KV_{min} sunt date în tabelul 5.2.

Teza elaborată conține :

181 pagini scrise (fără cele două anexe)

59 figuri (scheme, desene, diagrame)

10 tabele

117 titluri bibliografice

6.2 Contribuții personale

Contribuțiile originale ale autorului sunt:

- Realizarea unei sinteze documentare privind transportul produselor petroliere.
- Prezentarea unui studiu critic asupra caracteristicilor de material folosite la proiectarea conductelor pe baza normelor și a standardelor elaborate la nivel național.
- Efectuarea unui studiu privind influența vitezei de solicitare și a orientării suprafețelor de rupere asupra tenacității unui oțel pentru recipienti sub presiune.
- S-a determinat direcția după care tenacitatea la rupere atinge valoarea maximă în funcție de direcția de laminare a semifabricatului din care se execută conducta.
- Conceperea și realizarea experimentală a unei instalații pentru încercări la fisurare corozivă sub tensiune folosind apruvete Charpy prefisurate.
- Determinarea experimentală a lui K_{ISSC} pentru oțelul R 510 într-o soluție corozivă cu 30% $MgCl_2$.
- Prezentarea unei proceduri moderne pentru aplicarea mentenanței preventive la sistemele de conducte petroliere.
- Se prezintă importanța proiectării raționale a sistemelor de conducte utilizate pentru transportul produselor petroliere.
- Prin exemplele de calcul elaborate se prezintă un ghid de proiectare pentru siguranța sistemelor de conducte pentru transportul produselor petroliere.
- Se evidențiază importanța disciplinei de Mecanica Ruperii în ceea ce privește proiectarea și exploatarea rațională a sistemelor de conducte pentru transportul produselor petroliere

BIBLIOGRAFIE

1. Alămurean E.-*Contribuții la studiul sistemelor spațiale de conducte supuse la solicitări mecanice și variații la temperatură* - Rezumatul tezei de doctorat - București 1980
2. Ana I.-*Studiu asupra coroziunii fluidelor de fluj la temperaturi și presiuni ridicate*-Teză de doctorat I.P. București 1975
3. Anderson T.L. - *Fracture Mechanics Fundamentals and Application* - CPC Press, Boca Raton 1991
4. Barson J.M., Rolfe St.T. - *Fracture and Fatigue Control in Structures Second Edition*-Mew Jersey 1987
5. Burducea C, Leca A.-*Conducte și rețele termice* - Ed. Tehnică București 1980
6. Buzdugan Gh.-*Rezistența materialelor* - Editura Tehnică București 1980
7. **Brînzan O.**- *Referatul Nr.1 Solicitățile produse în conducte și recipientele utilizate în transportul și depozitarea fluidelor tehnologice din industria petrolieră* - Timișoara 2000
8. **Brînzan O.**- *Referatul Nr.2 Controlul durabilității țevilor pentru conducte utilizate în transportul produselor petroliere* - Timișoara 2001
9. **Brînzan O.**- *Referatul Nr.3 Analiza principalelor degradări ale conductelor petroliere în cursul exploatării acestora, prevenirea și înlăturarea lor* - Timișoara 2003
10. Becet S, Boussel P. - *Aciers soudables aus manganese - molybdene - niobium utilises dans la fabrication de tubes pour gazoducs.* - Commission des etudes metalurgiques „Siderurgies lourde” Paris, 21 dec. 1972
11. Blauer J.C., Stahn D.-*Experimenteller Model des sproder Bruches, als Beitrag an Sicherheits Analyse* - Freiburg, 3 – 4 Oct. 1974
12. Brown R.K. - *The Chevron Notched Fracture Toughness Test* - ASTM Standardization News, Nov. 1988 p. 66 – 69
13. Bettge G.W. - *Zinc carbonate can control H₂S in drilling mud.* - O.G.I. Aug. 18, 1975
14. Castrantras H. - *Use of hydrogen peroxide to abate hydrogen sulfide in geothermat operations.* - I.P.T. May 1981
15. Cheres B.B. Pericone A.C. - *Corosive aspects of copper carbonate in driling fluids* - O.G.I. Sep. 14 – 1970
16. Cioclov D. - *Mecanica ruperii materialelor.* - Ed. Academică R.S.R., București 1977
17. Cioclov D. - *Recipiente sub presiune* - Ed. Academică R.S.R., București 1983
18. Constantinescu A. - *Detectarea și măsurarea coroziunii* - Ed. Tehnică București 1976
19. Cristea C., Dumitru I., Tripa P. - *Studiul tenacității dinamice a unui oțel termorezistent folosit în construcția conductelor de aburi* - Al IV - lea Simp. Naț. De Tens. Brașov Sept. 1986 Vol IV p.325
20. Vrastian M., Socol S. Constantinescu A. - *Creșterea productivității și receptivității sondelor* - Ed. Tehnică București 1982
21. Crolet I. L. - *Acid corosion in wells (CO₂, H₂S)* - Metalurgical aspects. I.P.T. Aug. 1983
22. Delamarian C. - *Manual pentru mentenanță și retehnologizarea instalațiilor termoenergetice și industriale* - Ed. SUDURA, Timișoara 1999

23. Deutsch I. - *Rezistența materialelor* - Ed. Didactică și Pedagogică București 1979
24. Duffy A.R. ș.a. - *Hidrostatic testing of pipelines in place* - Part 1 Oil and gas nov. 25 1962, part. 2 Dec 2 1968
25. Drăghici Gh. - *Contribuții privind folosirea unor oțeluri turnate la instalațiile de atașare și presiune de la gura sondei în cazul forajului de mare adâncime a sondelor cu țiteiurilor corosive*. - Teză de doctorat I.P.G. Ploiești 1985
26. Dumitru I., Cristuinea C., Tripa P. - *Studiu comparativ al metodelor de apreciere a tenacității oțelurilor folosite în conductele de abur viu - A VII - a Conferință de Sudură și Încercări de Materiale, Timișoara 1987*
27. Dumitru I., Faur N. - *Rezistența materialelor. Bazele teoretice în oboseala materialelor, Mecanica ruperii, Materiale compozite și Metode numerice* - Lito UPT, Timișoara 1997
28. Dumitru I., Marșavina L. - *Introducere în Mecanica Ruperii* - Ed. Mirton, Timișoara, 2001
29. Fischer K.F., Gunther W. - *Gegenwartiger Stand der Rissbruchmechanik in Hinblick auf eine praktische Nutzung* - Berlin Maschinenbautechnik 2/1978, p. 73 - 76
30. Fichting H. - *New tool - joint materials yields improved rezistance to H₂S induced failures* - Drilling Sept. 1982
31. Ghica V. - *Cercetarea susceptibilității la la fisurare ductilă a oțelurilor*. - Teză de doctorat Timișoara 1979
32. Glavardanov I. - *Primena Integrala J Rajsa za ocenu plasticinog i crtog ponasanja metoda* - Novi Sad 1991
33. Glavardanov I. Sedmak S. - *Evolution of I_C for weldment constituents by multispeciment test method* - 10th Cong. Mat. Testing Budapesta Sep. 1991 p. 134 - 139
34. Hajdu I., Tripa P., **Brânzan O.**, The Influence of the Loading Speed and of the Fracture Surface Orientation related to the Lamination Direction upon the Fracture Toughness of a Steel for Pressure Vessels, first part, - *Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Seria Mecanică, Tom 48(62) Fascicola 2, 2003.*
35. Hajdu I., Tripa P., **Brânzan O.**, The Influence of the Loading Speed and of the Fracture Surface Orientation related to the Lamination Direction upon the Fracture Toughness of a Steel for Pressure Vessels, second part, - *Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Seria Mecanică, Tom 48(62) Fascicola 2, 2003.*
36. Hajdu J., Faur N., **Brânzan O.**, The influence of the Specimen Axis Orientation Versus the Lamination Direction Upon the Tensile Mechanical Characteristics, the Impact Bending Characteristics and the Breacking Toughness of a Steel Plate for Pressure Vessels, *Proceedings of the 10 th International Symposium on Experimental Stress Analysis and Material Testing, vol1, Sibiu, 21-23 oct 2004.*
37. Hahn G. T. - *Spannungsverteilung an Rissen in festen Körpern* - VDI Verlag Düsseldorf 1970
38. Hertzberg W.R. - *Deformation and Fracture* - Mechanics of Engineering Materials, Jon Wiley and So Inc, New York, Fourth Ed. 1996
39. Ikeda A. ș.a. - *On the hydrogen sulfide environment* - II Congrea Int. lithidrogene dans les metaux Paris 1978
40. Iovițu E. - *Contribuții la determinarea susceptibilității la rupere fragilă a oțelurilor prin încercări dinamice* - Teză de doctorat, Timișoara 1971

41. Hasen D.A. - *Fracture control testing and acceptance criteria for line pipe* - J. of Petr.Tehn. march 1981
42. Ivan M. - *Contribuții la calculul spațial al conductelor metalice circulare* - Teză de doctorat, Univ. Politehnică Timișoara 1970
43. Kiselmann L.I. Kiselmann M.L. - *Iznos obsadnih Kolonn V gluokih* - Skvajin Neft. Hoz. Nr.10 1970
44. Mateescu Dan, Ivan M. - *Conducte metalice circulare cu diametru mare* - Ed. Tehnică București 1985
45. Marșavina L. - *Metode numerice utilizate în calculul parametrilor din Mecanica ruperii* - Teză de doctorat, Timișoara 1998
46. Marșavina L. - *Metode numerice în Mecanica ruperii* - Ed. Mirton Timișoara 1998
47. Marșavina L. Raicov P. - *Studiul propagării fisurilor în osii* - Analele Universității Eftimie Murgu Reșița anul V nr.2 '98
48. Marșavina L. - *Metode experimentale de determinare a tenacității la rupere* - Ed. Politehnică, Timișoara 2006
49. Mocanu D.R. - *Rezistența Materialelor* - Ed. Tennică București 1980
50. Mocanu D.R. și Colectiv - *Încercarea materialelor, Vol. I Încercări distructive* - Ed. Tehnică București 1982
51. Mocanu D.R. și Colectiv - *Încercarea materialelor, Vol.II Încercări nedistructive ale elementelor metalice și nemetalice* - Ed. Tehnică București 1982
52. Muttnyánszki A - *Szilardsagtan* - Muszaki Könyviado Budapest 1981
53. Newman I.C. - *A review of Chevron - Notched Fracture Speciment testing and Stress Analysis* - ASTM STP 855
54. Pană T. - *Aplicații inginerești ale mecanicii ruperii* - Ed. Tehnică București 1974
55. Pană T. - *Mecanica ruperii materialelor* - Lito. Inst. Polit. București '92
56. Pavel A. - *Elemente de inginerie mecanică* - Ed.Did. Și Ped.București '81
57. Pavel A. - *Elastostabilitatea recipientelor cilindrice* - Ed. Academiei RSR București 1983
58. Pavel A. - *Fiabilitatea și securitatea instalațiilor petrochimice* - Curs postuniversitar Lito. Ploiești I.P.G. 1989
59. Pavel A. - *Surse și riscuri de avarie în Petrol - Petrochimie - Chimie* - Ploiești SC Imprimex Vol I și II 1993
60. Ponomariov S. D. și al. - *Calculul de rezistență în construcția de malini Vol. 2 Traducere din limba rusă* - Ed. Tehnică București 1962
61. Posea N. - *Rezistența Materialelor* - Ed. Didactică și Pedagogică București 1979
62. Posea N. Cristocea V. - *Încercări la rupere utilizând epruvete Chevron crestate* - Buletinul Științific al Universității Petrol Gaze Ploiești 2002
63. Rădoi I. Golumbioschi Fr. Nemeș M. Vaszilcsin N. - *Electrochimie și coroziune Vol. I și Vol. II* - Ediția 1993 Timișoara
64. Rațiu M. - *Engineering Fracture Mechanics for in Service Failure Analzsis of Power Plant Components* - Short Course ABB Impell Corporation USA 1988
65. Rațiu M. - *Aplicarea mentenanței preventive la sistemele de conducte din centralele nucleare* - Revista Sudura din Timișoara ASR Nr. 4/95 p. 3 - 16
66. Rațiu M., Moisisid N.T. - *Servicieability of carbon steel piping to intermittent element temperature* - Report AAB Impell Corporation San Ramon California 94583
67. Russel H.I. - *Stress - Corrosion Cracking* - ASEM 1999

68. Rusu O. - *Considerații asupra calculului propagării fisurii la solicitări variabile* - Lucrările Simpozionului Național de Mecanica Ruperii 1998 p. 4 – 24; 25 – 30
69. Shelton E., Tothwelt A.B., Coote R.I. - *Problemele oțelurilor pentru conducte magistrale actuale și de perspectivă în Canada (în l. engleză) Steels for line and pipe – line fittings.* - London 21 – 23 Oct. 1982
70. Sherman H.D. - *Fracture toughness testing using Chevron – notched specimens* - Metal Handbook 1985 Vol VIII mechanical Testing
71. Sih G.C. - *Handbook of Stress – Intensity Factors. Solutions and Formulas for Reference* – (Thermoolastic Crack Problems) 1973
72. Tada H., Paris P. Irwin G. - *Stress Analysis of crack Handbook* - Second Edition, St. Luis 1985
73. Timmins P.F. - *Guidelines for detecting hydrogen bliters and similar damage in sour – gas service.* - Oil and Gas J. feb. 14 – 1989
74. Timosenko S.P., Gere J.M. - *Teoria stabilității elastice, traducere din limba engleză* - Ed. Tehnică București 1967
75. Tripa P. - *Cercetări asupra tenacității unor oțeluri utilizate la conducte de abur din centralele termoelectrice.* - Teză de doctorat Universitatea Politehnică Timișoara 1997
76. Tripa P. - *Mecanica ruperii cu aplicații la conducte* - Ed. Mirton Timișoara 1998
77. Tripa P., Marșavina L. - *Computer CODE of calculating the factor of safety againts facture and the fatigue crack propagation* - 11" European Conference on Fracture Poitiers FRANȚA 1996
78. Tripa P., Cristuinea C., Dumitru I., Turcu L. - *Unele considerații privind tenacitatea oțelului 12H1Mf utilizat la conducte de abur din centralele termoelectrice* - Al VI - lea Simpozion Național de Tens. Craiova Sept. 1992 Vol II p. 474 – 479
79. Tripa P., Faur N. - *Considerații asupra stării de tensiune și a factorului de intensitate al tensiunii K_I la vârful unei fisuri longitudinale nestrăpuse dintr-o conductă supusă la presiune interioară* - Al II - lea Simpozion Național de Mecanica ruperii, Midia iunie 1996 p. 50 – 54
80. Tripa P., Faur N. - *Considerații asupra stării de tensiune și a factorului de intensitate al tensiunii K_I la vârful unei fisuri circumferențiale nestrăpuse dintr-o conductă supusă la presiune interioară* - Al II - lea Simpozion Național de Mecanica ruperii, Midia iunie 1996 p. 56 – 59
81. Ulmanu V. - *Material tubular petrolier* - Ed. Tehnică, București 1992
82. Wellman G.W., Rolfe S.T. - *Engineering Aspects of CTOD Fracture to ughness Testing.* - WRC Bulletin Nov. 1984 p.292
83. Wey B.P. - *Application of Fracture Mechanics + Stress Corosion Cracking Studies* - Prac. Conf. Fund. Aspects of SCC Ohio State Univ. 1976
84. Faur N. - *Mecanica materialelor, Noțiuni fundamentale, Statică, Solicitări simple* - Ed. Politehnică 2005
85. Hajdu I. Tripa P. Brînzan O. - *The Influence of the Fracture Surface Orientation to the Rolling Direction About the Fractures Toughness of a Steel Belonging to a pressure Vessel* - VIITH International Symp. Hunedoara Romania, 26 Sept. 2003 Section V p. 446 – 451
86. STAS 200-87 - Încercările metalelor. Încercarea la tracțiune
87. STAS 10290-75 - Încercările metalelor. Încercarea la tracțiune. Determinarea caracteristicilor elastice
88. STAS 6718-85 - Încercările metalelor. Încercarea la tracțiune a țevilor
89. STAS 1111-76 - Încercări tehnologice ale țevilor din oțel

90. STAS 7511-81 - Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc pe apruvete cu creștătură în V
91. STAS 6833-79 - Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc la temperaturi scăzute
92. STAS 10026-75 - Încercările metalelor. Încercarea de încovoiere prin șoc pe epruvete cu creștătură în U și V. determinarea cristalinității și fibrozității rupturii
93. STAS 5878-77 - Încercările metalelor. Încercarea la oboseală prin încovoiere rotativă
94. STAS 8027-78 - Încercările metalelor. Încercarea la oboseală cu sarcini axiale
95. STAS 10782-76 - Încercările metalelor. Lucrarea probelor din țevi pentru încercări mecanice
96. SR EN 10208 - 2 / 1998 - Țevi din oțel pentru conducte destinate fluidelor combustibile. Partea 2 Țevi în clasa de prescripții B
97. SR EN 10208-1 / 1999 - Țevi din oțel pentru conducte destinate fluidelor combustibile
98. STAS 530/1-87 - Țevi din oțel fără sudură, trase sau laminate la rece.
99. STAS 530/3-87 - Țevi din oțel fără sudură trase sau laminate la rece pentru temperaturi ridicate
100. STAS 7656-90 - Țevi din oțel sudate longitudinal pentru instalații
101. SR 404/1-1998 - Țevi din oțel fără sudură laminate la cald
102. STAS 715/1-80 - Țevi din oțel fără sudură. Țevi de conductă și mufe filetate pentru industria petrolieră
103. STAS 715/2-88 - Țevi de conducte cu capete netede pentru industria petrolieră
104. SR 6698/2-95 - Țevi de oțel sudate elicoidal pentru conducte magistrale de gaze
105. STAS 9760-84 - Încercările metalelor. Determinarea tenacității la rupere în condițiile stării plane de deformare, după metoda K_{Ic}
106. STAS 12803-9 - Determinarea deplasării la deschidere a fisurii δ_c
107. BS 7488 - Part. I: 1991 "Fracture Mechanics Toughness Tests"; Part I Method for Determination of K_{Ic} , Critical CTCD and Critical J Values of Metallic Materials
108. STAS 830/1-82 - Fitinguri pentru industria petrolieră. Țevi curbate
109. STAS 830/2-80 - Fitinguri pentru industria petrolieră. Țevi curbate
110. STAS 11082-80 - Țevi din oțel sudate elicoidal pentru conducte petroliere
111. STAS 777-80 - Încercările metalelor. Încercarea la îndoire
112. API (Institutul American al Petrolului) - *Specification 5L. Specification for line pipe* - Ed. 36 June 30, 1987
113. ASME Code for Pressure piping, Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ANSI / ASME B., 3.8. 1987
114. API RP5L3 - Recommandet practice for conducting dropeight tear test on line pipe
115. ISO Standard 3483 - 1980 - Oil and natural gas industries Steel line pipe
116. American National Standard - Code for Pressure Piping - Liquid Petroleum Transportation Piping Systems ANSI / ASME B.31.4 1980
117. Tuttle R.N. Corrosion; the big problem. Drilling Contractor Feb. 1979