



MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA TUBINGULUI FLEXIBIL PENTRU SONDELE DE PETROL ȘI GAZE

Autor: ing. Adrian HAGIANU

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE

Ploiești 2023



MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE MECANICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

*Cercetări privind utilizarea tubingului flexibil pentru
sondele de petrol și gaze*

*Research on the use of flexible tubing for
petroleum and gas*

Autor: ing. Adrian HAGIANU

Conducător științific: Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE

Nr. Decizie 548 din 05.09.2023

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf. univ. dr. ing. Alin DINIȚĂ	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof. univ. habil. dr. ing. Ion NAE	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof. univ. dr. ing. Florin PETRESCU	de la	Universitatea Tehnică de Construcții București
Referent oficial	Prof. univ. habil. dr. ing. Ivona Camelia PETRE	de la	Universitatea Valahia din Târgoviște
Referent oficial	Prof. univ. habil. dr. ing. Răzvan George RÎPEANU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Ploiești 2023

Cuprins

Lista de figuri	i
Lista de tabele	v
Introducere	viii
1. STADIUL ACTUAL PRIVIND CARACTERISTICILE CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALE ALE INSTALAȚIILOR DE TUBING FLEXIBIL	1
1.1. Domeniile de utilizare ale tubingului flexibil	1
1.2. Aspecte referitoare la perspectivele domeniului utilizării tubingului flexibil	2
1.3. Descrierea instalației de tubing flexibil	5
1.3.1. Clasificarea instalațiilor de tubing flexibil și echipamentelor specifice	5
1.3.2. Etapele de lucru specifice instalațiilor de tubing flexibil	9
1.3.3. Descrierea echipamentelor de lucru specifice	12
1.3.4. Caracteristicile tehnice ale instalațiilor de tubing flexibil de 38,1 mm (1 ½ inch)	24
1.3.5. Caracteristicile tehnice ale tubingului flexibil	27
1.4. Concluzii	37
2. STUDII ȘI CERCETĂRI PRIVIND COMPORTAREA MATERIALULUI TUBINGULUI FLEXIBIL ÎN CONDIȚIILE DIN EXPLOATARE	40
2.1. Zonele solicitate ale tubingului flexibil	40
2.2. Analiza solicitărilor mecanice ale tubingului flexibil	41
2.3. Determinarea alungirii tubingului flexibil la solicitări axiale	43
2.4. Determinarea alungirii tubingului flexibil datorată efectelor termice	51
2.5. Determinarea alungirii tubingului flexibil datorită presiunii diferențiale ...	52
2.6. Efectele încărcării ciclice asupra comportării materialului tubingului flexibil	53
2.7. Studii și cercetări privind avarierea tubingurilor flexibile	55
2.8. Analiza solicitărilor mecanice ale tubingului flexibil cu medii de transmisie.....	62
2.8.1. Stabilirea modelului de lucru	62
2.8.2. Dezvoltarea modelului	63
2.9. Concluzii	68
3. STABILIREA PROGRAMULUI CERCETĂRIILOR EXPERIMENTALE	72
3.1. Sistem de monitorizare a instalației cu tubing flexibil	72
3.2. Metodă de monitorizare a tubingului flexibil	76
3.2.1. Principiul metodei	76
3.2.2. Determinarea modelului de lucru	77
3.2.3. Metodă de monitorizare. Aplicație	79
3.2.4. Interpretarea rezultatelor.....	81
3.3. Programul cercetărilor experimentale	82
3.4. Concluzii	85
4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE, TEHNOLOGICE ȘI GEOMETRICE ALE TUBINGULUI FLEXIBIL Φ 38,1 mm (1 ½ inch)	88

4.1.	Cercetări experimentale privind determinarea compoziției chimice.....	89
4.2.	Cercetări experimentale privind analiza macrostructurală și microstructurală	92
4.3.	Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice și tehnologice ale materialului tubingului flexibil	92
4.3.1.	Determinarea durității materialului tubingului flexibil	92
4.3.2.	Încercarea la tracțiune	93
4.3.3.	Încercarea la aplatisare	98
4.4.	Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor geometrice ale tubingului flexibil.....	99
4.4.1.	Metodologia și condițiile tehnice de realizare a încercărilor	99
4.4.2.	Determinări experimentale	101
4.5.	Cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil	108
4.5.1.	Metodologia și condițiile tehnice de realizare a încercărilor	108
4.5.2.	Determinări experimentale	109
4.6.	Concluzii	113
5.	CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND DETERMINAREA CARACTERISTICILOR MECANICE, TEHNOLOGICE ȘI GEOMETRICE ALE TUBINGULUI FLEXIBIL Φ 31,75 mm (1 ¼ inch)	117
5.1.	Cercetări experimentale privind determinarea compoziției chimice	117
5.2.	Cercetări experimentale privind analiza macrostructurală și microstructurală	118
5.3.	Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice și tehnologice ale materialului tubingului flexibil	119
5.3.1.	Determinarea durității materialului tubingului flexibil	119
5.3.2.	Încercarea la tracțiune	119
5.3.3.	Încercarea la aplatisare	122
5.4.	Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor geometrice ale tubingului flexibil	123
5.4.1.	Metodologia și condițiile tehnice de realizare a încercărilor	123
5.4.2.	Determinări experimentale	123
5.5.	Cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil	128
5.5.1.	Metodologia și condițiile tehnice de realizare a încercărilor	128
5.5.2.	Determinări experimentale	128
5.6.	Concluzii	131
6.	CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND SOLICITAREA LA ÎNCOVOIERE CICLICĂ ȘI PRESIUNE INTERIOARĂ A TUBINGULUI FLEXIBIL	134
6.1.	Studii și cercetări privind solicitarea la încovoiere ciclică și presiune interioară a tubingului flexibil	134
6.2.	Testarea în laborator și cu instalații reale a tubingului flexibil	136
6.3.	Cercetări privind solicitarea la încovoiere ciclică și presiune interioară a tubingului flexibil	143
6.3.1.	Descrierea dispozitivului de încercare	143
6.3.2.	Metodologia încercărilor experimentale	147
6.3.3.	Încercări experimentale	149
6.4.	Concluzii	158

7.	ANALIZA CU ELEMENT FINIT A COMPORTĂRII TUBINGULUI FLEXIBIL LA ÎNCOVOIERE CICLICĂ CU PRESIUNE INTERIOARĂ	161
7.1.	Analiza defectelor cercetate	162
7.2.	Cercetări privind efectul defectelor de material asupra solicitărilor la încovoiere ciclică cu presiune interioară	166
7.2.1.	Alegerea datelor de bază pentru simulări	166
7.2.2.	Efectuarea simulărilor	167
7.3.	Compararea rezultatelor cercetărilor experimentale de laborator cu cele obținute prin simulare MEF	181
7.4.	Concluzii	183
8.	CONCLUZII GENERALE, CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	187
8.1.	Concluzii generale	187
8.2.	Contribuții personale	201
8.3.	Direcții viitoare de cercetare	202
	Bibliografie	203
	ANEXE.....	213
	Anexa A1. Caracteristicile fizico-mecanice ale materialului A606 - Extrase din Total Materia	213
	Anexa A2. Buletinele obținute în urma încercărilor la tracțiune - ϕ 38,1 mm ...	224
	Anexa A3. Analiza apei de sondă	226
	Anexa A4. Determinarea pH-ului apei de zăcământ	228
	Anexa A5. Analiza stărilor de tensiuni și de deformații ale tubingului cu defecte...	229

Lista de figuri

Capitolul 1

- Fig. 1.1. Aplicații în industria petrolului ale tubingului flexibil
- Fig. 1.2. Lucrări executate cu instalațiile de tubing flexibil, anul 2019, foraj 29%, [9]
- Fig. 1.3. Instalații de tubing flexibil offshore [10]
- Fig. 1.4. Aria geografică cu cele mai numeroase aplicații ale instalațiilor de tubing flexibil, anul 2019, [9]
- Fig. 1.5. Prognoza costurilor lucrărilor executate cu instalațiile de tubing flexibil, în America, în perioada 2016-2027 (în miliarde USD), [9]
- Fig. 1.6. Numărul zilelor de funcționare ale echipamentelor de tubing flexibil [16]
- Fig. 1.7. Repartizarea numărului instalațiilor de tubing pe diverse arii geografice, la nivelul anului 2005, [30]
- Fig. 1.8. Instalație de intervenție la o sondă de producție, [5]
- Fig. 1.9. Foraj dirijat, [12]
- Fig. 1.10. Categoriile principale ale echipamentelor instalațiilor de tubing flexibil
- Fig. 1.11. Echipamentele principale ale instalațiilor de tubing flexibil [10]
- Fig. 1.12. Instalații de tubing flexibil – criterii de clasificare
- Fig. 1.13. Instalație de tubing flexibil pe autoșasiu [6]
- Fig. 1.14. Platformă remorcabilă [6]
- Fig. 1.15. Instalație de tubing flexibil modulară [15]
- Fig. 1.16. Etape caracteristice de lucru ale instalațiilor de tubing flexibil.
- Fig. 1.17. Etape principale de lucru ale instalațiilor de tubing flexibil
- Fig. 1.18. Etape auxiliare de lucru ale instalațiilor de tubing flexibil
- Fig. 1.19. Cap injector [31]
- Fig. 1.20. Lanț de antrenare [12]
- Fig. 1.21. Sistem de ghidare și fixare a tubingului flexibil [35]
- Fig. 1.22. Arc de ghidare [38]
- Fig. 1.23. Sistem de susținere și ancorare a capului injector, [38]
- Fig. 1.24. Dispozitiv de etanșare (stripper), [30]
- Fig. 1.25. Echipamentul de prevenire a erupțiilor, [46]
- Fig. 1.26. Schema procesului de operare a echipamentului de prevenire a erupțiilor, [45]
- Fig. 1.27. Tipuri de bacuri utilizate în procesul de operare a echipamentului de prevenire a erupțiilor, [50]
- Fig. 1.28. Forfecarea tubingului flexibil, [50]
- Fig. 1.29. Cabina de comandă – vedere de ansamblu, [49]
- Fig. 1.30. Indicator de sarcină (greutate), [48]
- Fig. 1.31. Sistemul de comandă prin care controlează direcția și viteza de deplasare a tubingului flexibil, [48]
- Fig. 1.32. Sistemul de control al echipamentului de prevenire a erupțiilor, [48]
- Fig. 1.33. Toba de înmagazinare a tubingului flexibil, [52]
- Fig. 1.34. Toba de înmagazinare – sistemul de antrenare cu lanț, [36]
- Fig. 1.35. Toba de înmagazinare – mecanismul de bobinare, [36]
- Fig. 1.36. Toba de înmagazinare – cupla rotativă, [36]
- Fig. 1.37. Toba de înmagazinare – dispozitiv de contorizare, [36]
- Fig. 1.38. Efectele solicitărilor de întindere asupra tubingului flexibil, [56]
- Fig. 1.39. Avarii ale tubingului flexibil, [56]
- Fig. 1.40. Tambur de înmagazinare corect încărcat, [57]
- Fig. 1.41. Tambur avariat (pierderea controlului înfășurării tubingului flexibil), [57]
- Fig. 1.42. Material compozit, [30]

- Fig. 1.43. Debitarea foilor de tablă pentru a obține fâșii, [30]
Fig. 1.44. Role de înmagazinare a fâșiilor plate debitate, [30]
Fig. 1.45. Grosime de perete variabilă [adaptare 30]
Fig. 1.46. Îmbinarea prin sudură a fâșiilor de tablă [adaptare 30]
Fig. 1.47. Dispozitiv pentru sudarea înclinată a fâșiilor de tablă, [30]
Fig. 1.48. Sudarea longitudinală a tubingului flexibil, [30]
Fig. 1.49. Debavurarea sudurii tubingului flexibil, [30]
Fig. 1.50. Recoacerea zonei sudate a tubingului flexibil, [86]
Fig. 1.51. Calibrarea tubingului flexibil, [30]

Capitolul 2

- Fig. 2.1. Zonele solícitate ciclic ale tubingului flexibil [62]
Fig. 2.2. Solícitările la care este supus tubingul flexibil [30]
Fig. 2.3. Corespondența forță - deformație [30]
Fig. 2.4. Dependența $\sigma = f(\epsilon)$ [2], [30]
Fig. 2.5. Curba caracteristică teoretică a materialului [91]
Fig. 2.6. Corespondența tensiune (σ) deformație (ϵ) pentru diferite tipuri de materiale [60]
Fig. 2.7. Dependența $R_{p0.2} = f(\epsilon)$
Fig. 2.8. Variația deformației specifice în funcție de forța axială aplicată tubingului flexibil, [30]
Fig. 2.9. Reprezentarea schematică a mecanismului de producere a alungirii tubingului flexibil, cazul $F > Ft$, [30]
Fig. 2.10. Reprezentarea schematică a mecanismului de producere a alungirii tubingului flexibil, cazul $F < Ft$
Fig. 2.11. Schema de producere a îndoirii tubingului flexibil la trecere acestuia peste o zonă curbă, [30]
Fig. 2.12. Diagrama caracteristică a materialului la solícitări ciclice, [96]
Fig. 2.13. Reprezentarea schematică la solícitări ciclice – bucla de histeresis [96]
Fig. 2.14. Dispozitiv de încercare ciclică a tubingului flexibil [30]
Fig. 2.15. Tipuri de încercări ciclice pentru tubingul flexibil, [30]
Fig. 2.16. Clasificarea defectărilor tubingului flexibil, în perioada 1987-1998, [97]
Fig. 2.17. Coroziunea suprafețelor exterioare ale tubingului flexibil [115]
Fig. 2.18. Coroziunea suprafețelor exterioare ale tubingului flexibil după operarea în mediu marin [105]
Fig. 2.19. Coroziune exterioară în zone localizate [114]
Fig. 2.20. Reprezentarea defectărilor cauzate de îmbinările sudate în funcție de diametrul tubingului flexibil (perioada de raportare 2011-2014) [115]
Fig. 2.21. Reprezentarea defectărilor cauzate de îmbinările sudate în funcție de clasa materialului (perioada de raportare 2011-2014) [115]
Fig. 2.22. Reprezentarea ponderilor defectărilor tubingului flexibil (perioada de raportare 2011-2014) [115]
Fig. 2.23. Numărul ciclurilor de oboseală a tubingului flexibil, pentru materialul CT 80, cu diametrul exterior de $D_e = 44,45$ mm și grosimea de perete $t = 4,4$ mm, [97]
Fig. 2.24. Numărul defectărilor (din zonele sudate) cauzate de corozie fluidelor utilizate în timpul operațiunilor de lucru [115]
Fig. 2.25. Numărul defectărilor cauzate de fenomenul de oboseală [115]
Fig. 2.26. Degradarea tubingului flexibil [119]
Fig. 2.27. Dependența dintre grosimea de perete-masa specifică
Fig. 2.28. Dependența dintre grosimea de perete-sarcina de încărcare
Fig. 2.29. Dependența dintre grosimea de perete-rezistența la presiunea interioară
Fig. 2.30. Dependența dintre grosimea de perete - presiune hidraulică de testare

Capitolul 3

- Fig. 3.1. Solícitările în exploatare ale tubingului flexibil
Fig. 3.2. Sistem integrat de monitorizare a tubingului flexibil

- Fig. 3.3. Sub sistemele de monitorizare a tubingului flexibil
- Fig. 3.4. Instalație de tubing flexibil cu sistem integrat
- Fig. 3.5. Cap injector, [93]
- Fig. 3.6. Modelarea contactului tubing flexibil – bac injector [93]
- Fig. 3.7. Caracteristicile geometrice ale epruvetelor

Capitolul 4

- Fig. 4.1. Epruvete pentru determinarea compoziției chimice a materialului tubingului flexibil
- Fig. 4.2. Microdurimetrul Emcotest DuraScan 20, [124]
- Fig. 4.3. Mașină de încercare la tracțiune INSTRON 600LX
- Fig. 4.4. Clasele epruvetelor utilizate pentru încercările la tracțiune
- Fig. 4.5. Încercarea la tracțiune
- Fig. 4.6. Prinderea și fixarea epruvetei de încercare la tracțiune
- Fig. 4.7. Aspectul epruvetelor după încercarea la tracțiune
- Fig. 4.8. Principiul de lucru la încercarea la aplatisare [131]
- Fig. 4.9. Încercarea la aplatisare
- Fig. 4.10. Epruvete deformate prin aplatisare
- Fig. 4.11. Variația diametrului și grosimii de perete a tubingului flexibil la solicitarea la încovoiere ciclică [119]
- Fig. 4.12. Stabilirea mărimilor pentru determinarea caracteristicilor geometrice ale tubingului flexibil
- Fig. 4.13. Stabilirea caracteristicilor geometrice ale epruvetelor de testare
- Fig. 4.14. Măsurarea diametrului exterior
- Fig. 4.15. Măsurarea grosimii peretelui tubingului flexibil
- Fig. 4.16. Variația diametrelor la epruveta P1/0, tubing flexibil nou, zona în care s-a produs ruperea 3-4, tabelul 4.9
- Fig. 4.17. Variația diametrelor la epruveta P2/30, tubing flexibil cu 30 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 2-3, tabelul 4.10
- Fig. 4.18. Variația diametrelor la epruveta P2/30, tubing flexibil cu 30 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 2-3, tabelul 4.11
- Fig. 4.19. Variația diametrelor la epruveta P3/50, tubing flexibil cu 50 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 3-4, tabelul 4.12
- Fig. 4.20. Variația diametrelor la epruveta P3/50, tubing flexibil cu 50 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 2-3, tabelul 4.13
- Fig. 4.21. Variația diametrelor la epruveta P3/50, tubing flexibil cu 50 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 3, tabelul 4.14. Proba cu defect
- Fig. 4.22. Variația diametrelor la epruveta P3/80, tubing flexibil cu 80 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 2-3, tabelul 4.15
- Fig. 4.23. Variația diametrelor la epruveta P3/80, tubing flexibil cu 80 de cicluri, zona în care s-a produs ruperea 2-3, tabelul 4.16
- Fig. 4.24. Epruvete de încercare la coroziune, tubing ϕ 38,1 mm
- Fig. 4.25. Echipament pentru determinarea rezistenței la coroziune [124]
- Fig. 4.26. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil neutilizat
- Fig. 4.27. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil cu 30 de cicluri de funcționare
- Fig. 4.28. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil cu 50 de cicluri de funcționare
- Fig. 4.29. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil cu 80 de cicluri de funcționare
- Fig. 4.30. Diagramele Evans pentru epruvetele noi neutilizate
- Fig. 4.31. Diagramele Evans pentru epruvetele cu 30 de cicluri de lucru
- Fig. 4.32. Diagramele Evans pentru epruvetele cu 50 de cicluri de lucru

Fig. 4.33. Diagramele Evans pentru epruvetele cu 80 de cicluri de lucru

Capitolul 5

- Fig. 5.1. Microstructura $P1$ x100, tubing ϕ 31,75
Fig. 5.2. Microstructura $P2$ x100, tubing ϕ 31,75
Fig. 5.3. Încercarea la tracțiune, tubing ϕ 31,75 [124]
Fig. 5.4. Epruvetă utilizată la încercările la tracțiune, tubing ϕ 31,75
Fig. 5.5. Determinări experimentale epruvete $P1 - \Phi$ 31,75 mm, din tubing flexibil nou (fără cicluri de funcționare)
Fig. 5.6. Determinări experimentale epruvete $P2 - \Phi$ 31,75 mm, din tubing flexibil cu 20 de cicluri de funcționare
Fig. 5.7. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil neutilizat, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm
Fig. 5.8. Variația densității de curent cu potențialul pentru epruvetele din tubing flexibil cu 20 de cicluri de funcționare, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm
Fig. 5.9. Diagramele Evans pentru epruvetele noi neutilizate, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm
Fig. 5.10. Diagramele Evans pentru epruvetele din tubing flexibil cu 20 de cicluri de funcționare, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm

Capitolul 6

- Fig. 6.1. Acumularea solicitărilor tubingului flexibil, pentru diferite evenimente aplicate pe parcursul exploatării [30]
Fig. 6.2. Apariția și propagarea fisurilor în materialul tubingului flexibil [30]
Fig. 6.3. Procentul defectărilor tubingului flexibil în funcție de tipul acestora [148]
Fig. 6.4. Tipuri de defecte ale tubingului [148]
Fig. 6.5. Tipuri de ruperi ale tubingului flexibil în funcție de solicitări [148]
Fig. 6.6. Instalație reală de testare a tubingului flexibil [62]
Fig. 6.7. Dispozitiv de testare la oboseală a tubingului flexibil [30]
Fig. 6.8. Standul de testare la oboseală și tensionare a tubingului flexibil, [30]
Fig. 6.9. Dependența dintre diametrului exterior (D) și numărului total de cicluri până la ruperea tubingului flexibil, [30]
Fig. 6.10. Dependența dintre grosimea de perete (t) și numărului total de cicluri până la ruperea tubingului flexibil, [30]
Fig. 6.11. Dependența dintre clasa de rezistență și numărului total de cicluri până la ruperea tubingului flexibil [30]
Fig. 6.12. Dependența dintre diametrul tobei de înmagazinare a tubingului flexibil și numărului total de cicluri până la rupere [30]
Fig. 6.13. Dependența dintre raza arcului de ghidare și numărului total de cicluri până la ruperea tubingului flexibil [30]
Fig. 6.14. Dispozitiv pentru încercarea tubingului flexibil la încovoiere cu presiune interioară [152]
Fig. 6.15. Dispozitiv pentru încercarea tubingului flexibil la încovoiere cu presiune interioară – vedere de ansamblu [152]
Fig. 6.16. Dispozitiv pentru încercarea tubingului flexibil la încovoiere cu presiune interioară – sistem de prindere și fixare [152]
Fig. 6.17. Poziția relativă a elementelor instalației de tubing flexibil model TC-12540 inch
Fig. 6.18. Epruvetă de încercare la încovoiere ciclică cu presiune interioară
Fig. 6.19. Fixarea mărcilor tensometrice
Fig. 6.20. Monitorizarea indicațiilor manometrului
Fig. 6.21. Înregistrarea tensiunilor mecanice cu ajutorul punții tensometrice
Fig. 6.22. Vizualizarea temperaturii epruvetei în zona de îndoire
Fig. 6.23. Dependența numărului de cicluri până la fisurare în funcție de presiunea interioară
Fig. 6.24. Fisurarea epruvetei $P1/38/0 -$ tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, nou

- (fără funcționare)
- Fig. 6.25. Fisurarea epruvetei P2/38/30 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, care a efectuat 30 de cicluri de funcționare în sondă
- Fig. 6.26. Fisurarea epruvetei P3/38/50 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, care a efectuat 50 de cicluri de funcționare în sondă
- Fig. 6.27. Fisurarea epruvetei P4/38/80 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, care a efectuat 80 de cicluri de funcționare în sondă
- Fig. 6.28. Fisurarea epruvetei P5/31/0 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 31,75$ mm, nou (fără funcționare), $p_i = 10$ MPa
- Fig. 6.29. Defect de tip adâncitură de pe suprafața exterioară a tubingului flexibil – epruveta P6/31/20
- Fig. 6.30. Fisurarea epruvetei P6/31/20 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 31,75$ mm, care a efectuat 20 de cicluri de funcționare în sondă, $p_i = 10$ MPa
- Fig. 6.31. Variația tensiunilor mecanice la încercarea la încovoiere ciclică cu presiune interioară a epruvetei: P1/38/0 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, nou (fără funcționare)

Capitolul 7

- Fig. 7.1. Modelul utilizat în cadrul MEF
- Fig. 7.2. Dispunerea defectelor pe modelul supus solicitărilor cu MEF
- Fig. 7.3. Deplasarea capătului liber al tubingului
- Fig. 7.4. Rezultate simulărilor pentru $F_i = 1500$ N
- Fig. 7.5. Rezultatele simulărilor pentru $F_i = 1100$ N
- Fig. 7.6. Rezultatele simulărilor pentru $F_i = 1200$ N
- Fig. 7.7. Rezultatele simulărilor pentru $F_i = 1300$ N
- Fig. 7.8. Rezultatele simulărilor pentru $F_i = 1400$ N
- Fig. 7.9. Sintetizarea rezultatelor simulărilor
- Fig. 7.10. Valorile maxime ale tensiunilor și deplasărilor cât și numărul ciclurilor maxime și minime de funcționare pentru fiecare tip de defect
- Fig. 7.11. Forma și dimensiunile pentru modelarea defectului tip balonare
- Fig. 7.12. Balonarea pe fibra întinsă în timpul determinărilor experimentale
- Fig. 7.13. Rezultatele obținute pentru modelul cu defect tip balonare
- Fig. 7.14. Deplasarea capătului liber al tubingului – încercări experimentale pe dispozitiv de laborator pentru epruveta P3/38/50

Lista de tabele

Capitolul 1

- Tabelul 1.1. Caracteristicile tehnice pentru diferite tipuri de capete injectoare, [34]
- Tabelul 1.2. Razele de curbură ale arcului de ghidare, [38]
- Tabelul 1.3. Caracteristicile tehnice ale echipamentului de prevenire a erupțiilor, [50]
- Tabelul 1.4. Caracteristicile tehnice ale tobei de înmagazinare, [30]
- Tabelul 1.5. Gama diametrelor nominale de tubing flexibil, [58]
- Tabelul 1.6. Caracteristicile tehnice ale tubingului flexibil, cu diametrul exterior de $\phi 38,1$ mm ($1 \frac{1}{2}$ inch), [58]
- Tabelul 1.7. Caracteristicile tehnice ale injectoarelor model 400 și model 800, [59]
- Tabelul 1.8. Compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale oțelului A606, [80]
- Tabelul 1.9. Compoziția chimică a oțelului A 606 - Stewart & Stevenson Services, [59]
- Tabelul 1.10. Caracteristici mecanice ale oțeluri slab aliate utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [81]
- Tabelul 1.11. Caracteristici mecanice ale oțeluri slab aliate utilizate pentru fabricarea tubingului

	flexibil, [79]
Tabelul 1.12.	Compoziția chimică a aliajelor Cr - Ni utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [85]
Tabelul 1.13.	Caracteristicile mecanice ale aliajelor Cr - Ni utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [85]
Tabelul 1.14.	Compoziția chimică și proprietățile mecanice ale oțelurilor inoxidabile utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [83]
Tabelul 1.15.	Compoziția chimică a aliajelor pe bază de titan utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [33]
Tabelul 1.16.	Caracteristicile mecanice ale aliajelor pe bază de titan utilizate pentru fabricarea tubingului flexibil, [33]

Capitolul 2

Tabelul 2.1.	Determinări experimentale pentru stabilirea caracteristicilor mecanice ale materialului A 606, [92]
Tabelul 2.2.	Stabilirea valorilor deformațiilor elastice ale tubingului flexibil pentru materialul A 606
Tabelul 2.3.	Determinarea razei minime de curbură a arcului de ghidare
Tabelul 2.4.	Determinarea razei minime de curbură a tobei de înmagazinare a tubingul flexibil
Tabelul 2.5.	Caracteristicile tehnice ale țevii de tubingul flexibil, cu diametrul exterior de 38,1 mm, [58]

Capitolul 3

Tabelul 3.1.	Determinări experimentale – caracteristici geometrice – epruveta P3
Tabelul 3.2.	Datele inițiale ale aplicației
Tabelul 3.3.	Elemente de calcul
Tabelul 3.4.	Variația ariei de contact
Tabelul 3.4.	Programul cercetărilor experimentale

Capitolul 4

Tabelul 4.1.	Programul încercărilor experimentale
Tabelul 4.2.	Compoziția chimică a materialului epruvetelor cercetate
Tabelul 4.3.	Interpretarea rezultatelor pentru epruveta P1
Tabelul 4.4.	Interpretarea rezultatelor pentru epruveta P2
Tabelul 4.5.	Valori durități HV determinate experimental
Tabelul 4.6.	Clasele epruvetelor utilizate pentru încercările la tracțiune
Tabelul 4.7.	Valorile caracteristicilor mecanice obținute prin încercarea la tracțiune a materialului tubingului flexibil ϕ 38,1 mm
Tabelul 4.8.	Categoria de ductilitate [129]
Tabelul 4.9.	Determinări experimentale - proba de testare P1/0 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.10.	Determinări experimentale - proba de testare P2/30 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.11.	Determinări experimentale - proba de testare P2/30 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.12.	Determinări experimentale - proba de testare P3/50 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.13.	Determinări experimentale - proba de testare P3/50 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.14.	Determinări experimentale - proba de testare P3/50 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.15.	Determinări experimentale - proba de testare P3/80 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.16.	Determinări experimentale - proba de testare P3/80 ($D = 38.1$ mm)
Tabelul 4.17.	Determinări experimentale – clasa epruvetei de testare și zona de rupere
Tabelul 4.18.	Condiții restrictive privind limitele de încadrare ale diametrului și grosimii de perete ale tubingului flexibil, în funcție de diferite tipuri de defecte [132]
Tabelul 4.19.	Clasificarea epruvetelor utilizate pentru determinarea rezistenței la coroziune
Tabelul 4.20.	Compoziția mediului de lucru (apă de sondă)
Tabelul 4.21.	Rezultatele determinărilor experimentale la coroziune

Capitolul 5

- Tabelul 5.1. Compoziția chimică a materialului epruvetelor cercetate, tubing ϕ 31,75 mm
Tabelul 5.2. Valorile durezzați HV determinate experimental, tubing ϕ 31,75
Tabelul 5.3. Valorile caracteristicilor mecanice obținute la încercarea la tracțiune, tubing ϕ 31,75 mm
Tabelul 5.4. Categoria de ductilitate, tubing ϕ 31,75 [129]
Tabelul 5.5. Determinări experimentale - proba de testare P1/1 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.6. Determinări experimentale - proba de testare P1/2 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.7. Determinări experimentale - proba de testare P1/3 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.8. Determinări experimentale - proba de testare P 2/1 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.9. Determinări experimentale - proba de testare P2/2 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.10. Determinări experimentale - proba de testare P2/3 ($D = 31,75$ mm)
Tabelul 5.11. Determinări experimentale – clasa epruvetei de testare și zona de rupere, tubing flexibil ϕ 31,75 mm
Tabelul 5.12. Condiții restrictive privind limitele de încadrare ale diametrului și grosimii de perete ale tubingului flexibil ϕ 31,75 mm, în funcție de diferite tipuri de defecte [132]
Tabelul 5.13. Clasificarea epruvetelor utilizate pentru determinarea rezistenței la coroziune, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm
Tabelul 5.14. Rezultatele determinărilor experimentale la coroziune, tubing flexibil cu diametrul $D = 31,75$ mm

Capitolul 6

- Tabelul 6.1. Clasele epruvetelor utilizate pentru încercările la încovoiere ciclică cu presiune interioară
Tabelul 6.2. Rezultatele cercetărilor experimentale pentru încercările la încovoiere ciclică cu presiune interioară
Tabelul 6.3. Compararea rezultatelor cercetărilor experimentale pentru încercările la încovoiere ciclică cu presiune interioară, cu alte surse bibliografice [30]
Tabelul 6.4. Variația temperaturii materialului tubingului în timpul încercării epruvetei P1/38/0
Tabelul 6.5. Variația temperaturii materialului tubingului în timpul încercării epruvetei P5/31/0

Capitolul 7

- Tabelul 7.1. Programul simulărilor efectuate
Tabelul 7.2. Tipuri de defecte
Tabelul 7.3. Stabilirea schemei de efectuare a simulărilor
Tabelul 7.4. Rezultatele simulărilor, $F_t = 1100$ N

1. Importanța și actualitatea temei

În instalațiile de foraj tubulatura este unul dintre elementele de bază. Atingerea unor adâncimi mari de foraj, realizarea de foraje dirijate, intervențiile rapide de curățare/decolmatare au demonstrat că tubulatura segmentată, cu filet tradițional folosită la începuturile exploatarei petrolului nu mai poate fi utilizată cu același succes, în condițiile reducerii costurilor.

Utilizarea tehnologiei tubingului flexibil de peste 60 de ani în întreaga lume, dovedește că aceasta poate fi folosită pentru mai multe operații cum ar fi: foraj, carotaj, curățarea, acidificarea, curățarea găurilor de sondă, stimularea fracturării, denivelări cu azot, controlarea nisipului, îndepărtarea apei sau a condensului de la nivelul sondei, cimentarea sondelor, lărgirea găurii de sondă, operații de instrumentație după scule căzute în sondă, echiparea sondei petroliere pentru punerea în producție și stimulări ale stratelor productive etc.

Denumirea de tubulatură flexibilă (coiled tube) a provenit din ingineria conductelor submarine din timpul celui de-al doilea război mondial.

La începutul anilor 1960, tehnologia „tubulaturii flexibile” era deja utilizată în multe aplicații din industria petrolieră. Dezvoltarea științei și tehnologiei moderne a determinat modernizarea și perfecționarea tehnologiei de fabricare și funcționare a tubingului flexibil.

În anii '90, tubingul flexibil a fost denumit ca fiind "echipament de operare universal" și a început a fi utilizat pe scară largă în domenii inclusiv de foraj, de intervenție, de producție de petrol etc.

În acest context, subiectul tezei de doctorat cu titlul „Cercetări privind utilizarea tubingului flexibil pentru sondele de petrol și gaze” este de actualitate, prin abordarea și implicarea în rezolvarea unor probleme ale unui sector important, cel energetic, în care dezvoltarea științei și tehnologiei au determinat modernizarea și perfecționarea echipamentelor de lucru, a planificării și monitorizării parametrilor de funcționare, a tehnologiei de fabricare și exploatare a tubingului flexibil (coiled tubing).

2. Obiectivele propuse

Lucrarea are ca **obiectiv principal** realizarea cercetărilor experimentale efectuate prin testarea tubingului flexibil, în scopul determinării caracteristicilor mecanice, tehnologice, geometrice și de coroziune care contribuie la monitorizarea parametrilor pe durata de exploatare.

Pentru îndeplinirea obiectivului principal, au fost abordate următoarele **obiective secundare**:

- cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice, tehnologice și geometrice ale tubingului flexibil;
- cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil;
- cercetări experimentale privind solicitarea la încovoiere ciclică și presiune interioară a tubingului flexibil;
- modelarea și simularea prin metoda elementului finit, a încercării tubingului flexibil la solicitarea de încovoiere cu presiune interioară, pentru diferite tipuri de defecte care apar suprafața exterioară a acestuia.

Cercetările experimentale și testările tubingului flexibil au fost efectuate în Departamentul de Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, utilizând aparate și dispozitive de încercare specifice.

3. Rezumatul tezei

Teza de doctorat cu titlul „Cercetări privind utilizarea tubingului flexibil pentru sondele de petrol și gaze” a fost structurată în opt capitole cuprinzând bibliografie, anexe și index pentru figuri și tabele.

În primul capitol al tezei de doctorat denumit „Stadiul actual privind caracteristicile constructiv-funcționale ale instalațiilor de tubing flexibil” se evidențiază construcția, funcționarea și caracteristicile instalațiilor de tubing flexibil. Studiul bibliografic efectuat a urmărit sistematizarea și analiza informațiilor din literatura de specialitate referitoare la stadiul actual privind caracteristicile tehnice ale instalațiilor de tubing flexibil, precum și evoluția tendințelor actuale și de perspectivă din domeniu. Studiului bibliografic a permis evidențierea principalelor avantaje pe care le prezintă utilizarea echipamentelor pentru tubingurile flexibile, în comparație cu instalațiile de foraj/intervenții convenționale, precum și direcțiile de cercetare referitoare la perfecționarea acestor echipamente.

- S-a efectuat o prezentare generală a principalelor tipuri de echipamente utilizate pentru manevrarea tubingului flexibil pe baza următoarelor criterii principale: locație, aplicație (lucrări efectuate) și aria geografică (regiune);

- S-au analizat, lucrările efectuate cu instalațiile de tubing flexibil, care s-au extins considerabil datorită abordării următoarelor aspecte: *a*) utilizarea acestora la adâncimi de lucru de aproximativ (5000 ... 7000) m; *b*) efectuarea rapidă a lucrărilor pentru sondele înclinate; *c*) abordarea lucrărilor în medii de lucru corozive și erozive folosind tubing de dimensiuni mai mari (cu diametru exterior de 168 mm); *d*) extinderea lucrărilor pe platformele marine.

- Pentru o înțelegere mai bună a condițiilor de lucru (exploatare) ale instalațiilor de tubing flexibil, s-a efectuat o analiză a etapelor de lucru, necesară pentru determinarea solicitărilor tubingului flexibil. Din analiza efectuată, s-a constatat că pentru realizarea diverselor operații la sondă (de foraj, punere în producție, intervenții, cimentări, combaterea aglomerărilor de nisip etc.) se parcurg o serie de etape caracteristice care se divizează în două categorii: *a*) etape principale care au rolul de a efectua deplasarea prin introducerea/extragerea tubingului flexibil, în și din sondă; *b*) etape auxiliare care au rolul de a efectua operațiile efective de lucru, conform programului sondei.

- Au fost prezentate principalele caracteristici tehnice și funcționale ale instalațiilor de tubing flexibil cu diametrul exterior de ϕ 38,1 mm (1 ½ inch), respectiv ϕ 31,75 mm (1 ¼ inch), Acest tip de instalații – disponibile la SIRCOSS - Sucursala de Servicii la Sonde a Societății Naționale de Gaze Naturale ROMGAZ – constituie modelul pentru efectuarea determinărilor experimentale din cadrul lucrării de cercetare.

- Au fost analizate caracteristicile tehnice ale tubingului flexibil, stabilindu-se două direcții principale, care se referă la tipul materialului din care se confecționează și tehnologia de fabricație. Direcțiile principale sunt corelate cu cerințele din exploatare impuse tubingului flexibil, referitoare la: caracteristicile de rezistență ale materialului tubingului flexibil, caracteristicile geometrice ale tubingului flexibil, caracteristicile de rezistență la coroziune și

la acțiunea factorilor fragilizanți ai materialului tubingului flexibil, caracteristicile tehnice de funcționare ale instalației de lucru.

- Din punct de vedere al tendințelor actuale și de perspectivă referitoare la materialele utilizate pentru fabricarea tubingurilor flexibile au fost prezentate și analizate, conform studiului bibliografic, diferite materiale, cum ar fi: oțeluri (cu diferite caracteristici de rezistență), aliaje de titan, aliaje de nichel, materiale compozite etc. Condițiile tehnice, clasele de rezistență și caracteristicile fizico-mecanice ale oțelurilor utilizate la fabricarea tubingului flexibil sunt reglementate prin specificațiile API RP 5C7, echivalente cu standardul SREN 10208-2:2009. În cadrul lucrării elaborate, cercetările experimentale au fost efectuate pe oțelul A 606, rezistent la coroziune atmosferică. În condițiile, în care materialele utilizate, existente sunt predispuse la acțiunea factorilor corozivi, în mod normal, se decide schimbarea tipului materialului și selectarea materialelor alternative pentru a se adapta la condițiile specifice din exploatare. Astfel, au fost prezentate aliajele rezistente la coroziune din industria petrolului și gazelor care includ gradul oțelului: 13Cr, Super 13Cr, 22Cr duplex, 25Cr duplex, 28Cr oțel inoxidabil, 825 aliaj de nichel, 625 aliaj de nichel, 2550 aliaj de nichel și C276 aliaj de nichel. Pe baza studiului bibliografic efectuat, au fost analizate trei tipuri de oțeluri inoxidabile speciale utilizate pentru rezolvarea problemelor de coroziune din industria petrolului și gazelor, cu gradul: LDX 2101, 254 SMO și 654 SMO. Oțelurile inoxidabile de calitate supraustenitică (254 SMO și 654 SMO), au demonstrat, o rezistență superioară la coroziunea sub tensiune, pe baza indicatorului PRE, care prezintă valorile de 43 (pentru oțelul 254 SMO) și 56 (pentru oțelul 654 SMO).

Al doilea capitol al tezei cu titlul „*Studii și cercetări privind comportarea materialului tubingului flexibil în condițiile din exploatare*” prezintă analiza solicitărilor mecanice, precum și influența acestora asupra comportării în exploatare a tubingului flexibil. De asemenea, sunt elaborate aplicații proprii referitoare la determinarea alungirii tubingului flexibil la solicitări axiale, datorită efectelor termice și datorită presiunii diferențiale, în conformitate cu condițiile de exploatare din sondă. Au fost analizate, conform datelor din literatura de specialitate, etapele încărcării ciclice și modul în care se comportă materialul tubingului flexibil la aceste solicitări.

Concluziile desprinse din studiul efectuat în acest capitol sunt următoarele:

- Tubingul flexibil este supus, unor solicitări complexe, care determină degradarea acestuia, uzura și scăderea duratei de utilizare. Combinațiile solicitărilor la care este supus tubingul flexibil în timpul exploatării sunt: tracțiunea cu presiunea interioară; încovoiere cu presiune interioară, compresiune cu presiune interioară, presiune de contact la contactul cu ghidajul injectorului. Alături de acestea, se adaugă (datorită mediilor de lucru – apa de zăcământ) procesul de coroziune, eroziune, precum și acțiunile mecanice din procesul de exploatare (frecări, degradări mecanice, temperatura etc.).

- Principalii factori ce influențează durata de viață a tubingului flexibil sunt:
a) factori constructivi: lungime, secțiune, grosimi de perete; *b)* factori de mediu: CO₂, H₂S, particule abrazive; *c)* factori de proces: presiune, viteza fluidului, temperatura de lucru; *d)* factori privind calitatea materialelor: tipuri de materiale, starea materialului (compoziție, tratament termic, structură, starea suprafeței, acoperiri).

- Din analiza condițiilor de lucru (exploatare) ale instalațiilor de tubing flexibil, conform ciclului de lucru, rezultă că materialul din care este confecționat tubingul flexibil, este supus la stări complexe de solicitări: *a)* solicitări de încovoiere conform ciclului de lucru

specificat, prin îndoirea repetată a tubingului flexibil; b) solicitări de tracțiune, respectiv compresiune, datorită greutății proprii a tubingului flexibil, a greutății eventualelor scule de foraj introduse în sondă, precum și unele solicitări axiale la tracțiune induse de presiunea interioară; c) solicitări mecanice cauzate de forțele de frecare dintre tubing și pereții sondei, de presiunea de contact dintre bacurile capului injector, precum și a contactului dintre spirele tubingului flexibil la înfășurarea pe toba de înmagazinare; d) solicitări la presiune exterioară, datorită fluidului vehiculat prin spațiul inelar dintre tubingul flexibil și coloana de exploatare; e) solicitări datorate constrângerilor provocate de existența unor gradienti termice sau de alte cauze, care pot conduce la flambaj. Concomitent cu aceste solicitări funcționale, pot să se manifeste și acțiuni ale mediilor de lucru, sub forma fenomenelor de coroziune și de fragilizare (CO_2 , H_2S , particule abrazive). Ca urmare, din punct de vedere al caracteristicilor materialului, starea de tensiuni generată de solicitările prezentate, trebuie să fie limitată în domeniul elastic pentru a nu se produce deformații permanente.

- Au fost efectuate încercări experimentale proprii la tracțiune pe epruvete prelevate din materialul A 606 din care este confecționat tubingul flexibil, pentru a se stabili delimitarea domeniului elastic de cel plastic, utilizând dependența $R_{p0,2} = f(\varepsilon)$. Epruvetele de încercare au fost prelevate din trei categorii de tubinguri flexibile, caracterizate astfel: a) *P1* – epruvetă confecționată din tubing flexibil nou (fără ore de funcționare); b) *P2* – epruvetă confecționată din tubing flexibil care a efectuat 20 de operații în sondă; c) *P3* – epruvetă confecționată din tubing flexibil care a efectuat 50 de operații în sondă. Caracteristicile mecanice obținute sunt prezentate în tabelul 2.1. Corespunzător valorilor deformațiilor elastice, calculate în tabelul 2.2, pe baza relației (2.3), s-au trasat dependențele $R_{p0,2} = f(\varepsilon)$ pentru cele trei tipuri de epruvete *P1*, *P2*, *P3* (figura 2.7). În acest mod, se poate delimita domeniul elastic de cel plastic în funcționarea tubingului flexibil. Rezultatele obținute conform tabelului 2.2, respectiv figura 2.7, permit următoarele interpretări: a) pentru epruveta *P1* – epruvetă confecționată din tubing flexibil nou (fără funcționare), pentru intervalul $\varepsilon = (0..3400) \times 10^{-6} \%$, materialul din care este confecționat tubingul flexibil A 606 se comporta elastic; b) pentru epruveta *P2* – epruvetă confecționată din tubing flexibil care a efectuat 20 de operații în sondă, pentru intervalul $\varepsilon = (0..2800) \times 10^{-6} \%$, materialul din care este confecționat tubingul flexibil A 606 se comporta elastic; c) pentru epruveta *P3* – epruvetă confecționată din tubing flexibil care a efectuat 50 de operații în sondă, pentru intervalul $\varepsilon = (0..2300) \times 10^{-6} \%$, materialul din care este confecționat tubingul flexibil A 606 se comportă elastic. De asemenea, se constată că pe măsură ce tubingul flexibil are mai multe ore de funcționare, valorile modului de elasticitate scad (tabelul 2.2) ceea ce înseamnă că materialul devine mai rigid, fiind astfel susceptibil la solicitările la oboseală.

- Pe baza datelor din literatura de specialitate, prin sistemele de măsurare a adâncimii de introducere a tubingului flexibil, s-a constatat că se produc alungiri permanente ale materialului tubingului flexibil sub acțiunea forțelor axiale. În acest context, au fost efectuate aplicații numerice proprii considerând un material cu modul de elasticitate $E = 186 \text{ GPa}$ și limita de curgere $R_{p0,2} = 509 \text{ MPa}$. Din datele din exploatare, s-a constatat că alungirea aparentă a tubingului flexibil pentru fiecare operație de introducere, respectiv extragere, a acestuia, din gaura de sondă, la o adâncime de 3048 m (10000 ft), având sarcina de încărcare 148,545 kN (tabelul 1.6) a fost de aproximativ 3 m (10 ft), [30].

- S-a elaborat un model de calcul prin care s-a determinat *alungirea tubingului flexibil datorită încărcării axiale – Aplicația A1*. Datele de bază ale modelului sunt:

materialul din care este confecționat tubingul flexibil este A 606; diametrul exterior al tubingului flexibil: $D_e = 38,1$ mm (1,5 inch); diametrul interior al tubingului flexibil: $D_i = 32,58$ mm; grosimea de perete a tubingului flexibil: $t = 2,76$ mm (0,109 inch); limita de curgere a materialului din care este confecționat tubingul flexibil, $R_{p0,2} = 509$ MPa (tabelul 2.2); lungimea de exploatare a tubingului flexibil, $L = 3048$ m (10000 ft); raza de îndoire a tubingului flexibil (corespunzătoare arcului de ghidare) $R_b = 2,1336$ m ($R_b = 48$ inch) (tabelul 1.4); modulul de elasticitate al materialului tubingului flexibil, $E = 148,267$ GPa (tabelul 2.2); valoarea forței axiale de încărcare, $F = 148,454$ kN (tabelul 1.6). Rezultatul obținut în aplicația efectuată, la care valoarea alungirii reziduale este $\Delta L_r = 2,74$ m, concordă cu datele precizate în literatura de specialitate [30], unde alungirea reziduală măsurată are valoarea de circa 3 m, pentru o adâncime de 3048 m (10000 ft), având sarcina de încărcare 148 kN.

- S-a elaborat un model de calcul prin care s-au determinat valorile razelor minime de curbură ale arcului de ghidare în funcție de diametrul tubingului flexibil utilizat – *Aplicația A2*. Rezultatele obținute demonstrează că tubingul flexibil este solicitat în domeniul elastic, deoarece valorile razelor de curbură, R_{recom} recomandate ale arcului de ghidare sunt mai mici decât valorile razelor de curbură R_{calc} calculate, $R_{recom} < R_{calc}$ conform relației (2.11). În mod similar, s-au determinat valorile razelor minime de curbură ale arcului de ghidare în funcție de diametrul tubingului flexibil utilizat (tabelul 2.4). Interpretarea rezultatelor și în acest caz, demonstrează că tubingul flexibil este solicitat în domeniul elastic deoarece, $R_{recom} < R_{calc}$ conform aplicației A2.

- S-a elaborat un model de calcul pentru a stabili modificarea lungimii tubingului flexibil din cauza efectelor termice, *aplicația A3*. Lungimea de exploatare a tubingului flexibil, este corelată cu variația temperaturii, cunoscând faptul că la fiecare 33 m, temperatura crește cu un grad celsius [30]. De asemenea, solicitările mecanice cauzate de forțele de frecare dintre tubing și pereții sondei pot conduce la creșterea temperaturii în zonele de contact. Analizând valoarea obținută a alungirii tubingului flexibil determinată din încărcării axiale ($\Delta L_r = 2,74$ m), respectiv datorită variației de temperatură ($\Delta L_T = 2,81$ m), rezultatele sunt comparativ egale, pentru condițiile de bază similare.

- S-a elaborat un model de calcul referitor la modificarea lungimii tubingului flexibil din cauza presiunii diferențiale care se manifestă pe perețele tubingului flexibil – *aplicația A4*. Mecanismul principal pentru această modificare a lungimii este datorat efectului Poisson. Modelul arată, prin rezultatul obținut ($\Delta L_p = -0,171$ m), că lungimea tubingului flexibil se micșorează. În comparație cu lungimea de calcul considerată ($L = 3048$ m), modificarea produsă asupra lungimii tubingului flexibil este nesemnificativă.

Capitolul al treilea al tezei de doctorat denumit „**Stabilirea programului cercetărilor experimentale**” prezintă planul pentru stabilirea încercărilor de determinare a caracteristicilor materialului tubingului flexibil, în scopul determinării numărului de cicluri de funcționare în condiții de siguranță.

- S-a elaborat un sistem integrat de predicție a duratei de viața operațională a tubingului flexibil, care corelează valorile datelor inițiale de proiectare ale procesului de operare cu valorile măsurate și calculate pe baza datelor din exploatare din cadrul instalației. Datele din exploatare sunt obținute prin informațiile colectate de traductorii utilizați pentru supravegherea și monitorizarea operațiilor de lucru în șantier (fig. 3.2).

- S-a proiectat și s-a realizat în condiții de laborator, un dispozitiv (fig. 3.4) pentru detectarea defectelor de suprafață ale tubingului flexibil: adâncituri datorită loviturilor accidentale, amprenări datorită străngerii bacurilor etc. Dispozitivul este de forma unui manșon care îmbracă tubingul flexibil și are 2 sisteme de roți de ghidare, unul în față și altul în spate, sisteme care au câte 3 roți dispuse la 120 grade. Dispozitivul (fig. 3.4, c) este compus din trei senzori piezoelectrice flexibili de tip LDT1-028K. Sensorii piezoelectrice de tipul LDT1-028K (fig. 3.4, d), sunt multifuncționali pentru detectarea fenomenelor fizice, precum vibrații sau impact. Realizarea dispozitivului s-a făcut în tehnologia de printare 3D, pentru testarea în laborator.

- Sistemul inteligent de evaluare a duratei de viață a tubingului flexibil analizat, face obiectul unei propuneri de brevet de invenție depusă la OSIM, *Sistem inteligent de evaluare a duratei de viață a tubingului flexibil folosit în industria extracției petrolului și gazelor naturale*, înregistrată cu nr. A 00359, 13.06.2019 (în evaluare), [123].

- S-a constatat, conform datelor din exploatare, că influența cea mai importantă asupra predicției duratei de viață a tubingului flexibil este dictată de caracteristicile fizico-mecanice și geometrice ale materialului tubingului flexibil. În consecință, prin planul de determinări experimentale, s-au realizat încercări pentru: a) determinarea compoziției chimice a materialelor utilizate la fabricarea tubingului flexibil; b) cercetarea microstructurii materialelor; c) determinarea caracteristicilor de rezistență mecanică prin încercări la tracțiune și aplatisare, pe epruvete tip țevă; d) cercetarea caracteristicilor geometrice prin măsurători efectuate pe epruvete pentru determinarea diametrului nominal al tubingului flexibil, grosimii peretelui și ovalitatea diametrului exterior; e) cercetări privind comportarea materialului tubingului flexibil la încovoiere cu presiune interioară; f) încercări de rezistență la coroziune a materialului tubingului flexibil; g) cercetarea stării de tensiuni și de deformații ale tubingului flexibil prin metoda elementului finit.

- S-a elaborat un model de calcul propriu pentru determinarea condiției de bună funcționare a instalației de tubing flexibil. Funcționare normală a instalației este determinată de condiția susținerii de către capul injector a greutatea maxime a tubingului flexibil care este introdus în sondă. Susținerea tubingului flexibil, se realizează prin sistemul de forțe care se dezvoltă la contactul dintre suprafața exterioară a tubingului și suprafața activă a bacului de prindere (fig. 3.6, [93]).

- Pentru model de calcul realizat, s-au efectuat cercetări experimentale proprii necesare pentru determinarea caracteristicilor geometrice (diametrul tubingului flexibil, grosimea de perete, ovalitatea, excentricitatea) și de rezistență (limita de curgere, limita de elasticitate, alungirea la rupere, duritatea) ale materialului tubingului flexibil studiat. Determinările experimentale ale caracteristicilor de rezistență s-au efectuat pe baza încercărilor la tracțiune, pe epruvete prelevate din materialul din care este confecționat tubingul flexibil (fig. 3.7). Caracteristicile mecanice obținute sunt prezentate în tabelul 2.1. Epruvete prelevate pentru încercări sunt de trei tipuri fiind prelevate din tubinguri cu un număr de ore de funcționare diferit: P1 – epruvetă (fără ore de funcționare); P2 – epruvetă care a efectuat 20 de operații în sondă; P3 – epruvetă care a efectuat 50 de operații în sondă. În conformitate cu tipurile epruvetelor cercetate (fig. 3.7) și condițiile de exploatare (tabelul 2.1) specificate, s-au determinat caracteristicile geometrice ale tubingului flexibil – diametrul exterior, grosimea de perete, ovalitatea, excentricitatea.

- Conform relației (3.2) care descrie condiția de bună funcționare a instalației, se constată că factorul important este aria de contact (A_r). Aria de contact depinde de geometria bacului de prindere, de numărul de bacuri utilizate și de ovalitatea tubingului flexibil. Ovalitatea tubingului flexibil, prin micșorarea ariei de contact poate influența condiția de bună funcționare a instalației. Astfel, dacă se consideră acoperiri diferite ale ariei de contact ($0,1 \times A_r$, $0,2 \times A_r$, $0,3 \times A_r$, $0,4 \times A_r$ – tabelul 3.4), atunci condiția de bună funcționare este îndeplinită când se realizează contactul pe 40% din aria totală de contact.

- Din interpretarea rezultatelor care modelează condiția de bună funcționare a instalației, în tabelul 3.3, pentru grosimea de perete a tubingului flexibil $t = 2,74$ mm și coloana de tubing cu masa de încărcare de 16276 kg, rezultă valoarea forței axiale, $F_A = 159667$ N $<$ $F_f = 488731$ N, ceea ce înseamnă o încărcare de 33% și o rezervă suplimentară de 64%. Rezerva de încărcare este utilizată pentru cazuri speciale, de exemplu, prinderea tubingului flexibil în sondă, ceea ce conduce la creșterea forței de axiale (de tragere a capului injector).

Capitolul patru al tezei denumit „**Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice, tehnologice și geometrice ale tubingului flexibil Φ 38,1 mm (1½ inch)**” prezintă cercetările experimentale proprii efectuate pentru determinarea compoziției chimice, analiza macrostructurală și microstructurală, caracteristicilor mecanice și tehnologice, caracteristicile geometrice, cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil. Obiectivul principal al cercetărilor efectuate în cadrul acestui capitol îl reprezintă verificarea corespondenței dintre caracteristicile efective mecanice, tehnologice și geometrice ale materialului tubingului flexibil Φ 38,1 mm și specificațiile prevăzute în normativele specifice.

Studiile și cercetările efectuate, conduc la formularea următoarelor concluzii:

- Pentru verificarea corespondenței dintre caracteristicile efective mecanice, tehnologice și geometrice ale materialului tubingului și specificațiile prevăzute în normativele specifice, s-a considerat materialul de bază A606 ASTM B704 [85], respectiv dimensiunile geometrice ca fiind: diametrul exterior $D_e = 38,1$ mm (1 ½ inch), grosimea de perete $t = 2,76$ mm (0,109 inch).

- Compoziția chimică s-a determinat pe epruvete de tip inel prelevate din materialul tubingului flexibil. S-au cercetat două tipuri de epruvete, stabilite în funcție de numărul de cicluri de funcționare a tubingului flexibil: $P1$ – epruvetă confecționată din tubing flexibil nou (neutilizat) și $P2$ – epruvetă confecționată din tubing flexibil cu 80 de cicluri de funcționare ((locația ROMGAZ).

- S-a constatat, din determinările efectuate prin analiza compoziției chimice, că materialul tubingului flexibil, este un oțel slab aliat, care are în compoziție pe lângă C, Mn și alte elemente de aliere. Valorile obținute pentru materialul studiat, corespunzătoare pentru conținutul de C și Mn se încadrează în valorile prevăzute în standard (A 606). De asemenea materialul cercetat are în compoziție Co și procente mai mari de Cr, Ni, Cu, Ti, care îi conferă o rezistență mai ridicată la coroziune, ceea ce conduce la creșterea duratei de exploatare a tubingului.

- Din analiza macrostructurii s-a constatat că material nu prezintă concavități, supraînălțări sau defecte exterioare (cratere, fisuri etc). La interiorul tubingului, în zona supraînălțării cusăturii materialul prezintă depuneri mari de impurități, zona fiind mai greu de curățat. Se observă zone cu coroziune pronunțată.

- Microstructura indică orientarea grăunților în șirurile de laminare. În zona rădăcinii sudurii, spre cusătură nu mai apare orientarea grăunților în șirurile de laminare. Spre rădăcina cusăturii se păstrează o ușoară orientare a grăunților în șiruri de laminare; nu se disting zonele îmbinării sudate.

- Din analiza microstructurilor s-a constatat ca structura materialului epruvetelor este bifazică, ferito-perlitică, foarte fină, uniform distribuită, cu porțiuni ușor orientate în șiruri de laminare, având mărimea grăunțului punctaj (9 ... 9,5) conform EN ISO 643 și ASTM E112.

- La probele examinate cu îmbinare sudată, s-a observat că nu există material de adaos, îmbinarea fiind executată fără material de aport.

- S-au efectuat încercări de determinare a caracteristicilor geometrice ale materialului tubingului flexibil. Pentru încercări s-au utilizat epruvete tip țevă, grupate în patru clase, care țin seama de numărul de cicluri de funcționare ale tubingului flexibil în exploatare, (tabelul 4.6), astfel: *P1/0* – tubing flexibil nou (fără funcționare); *P2/30* – tubing flexibil care a efectuat 30 de cicluri de funcționare în sondă; *P3/50* – tubing flexibil care a efectuat 50 de cicluri de funcționare în sondă; *P4/80* – tubing flexibil care a efectuat 80 de cicluri de funcționare în sondă. Determinările experimentale s-au realizat prin măsurători pe zone de măsurare longitudinale și transversale, marcate pe epruvetele de încercare, unde se măsoară diametrul și grosimea de perete (fig. 4.13). S-au efectuat măsurători în cinci plane de măsurare (1, 2, 3, 4, 5), egal distanțate pe generatoarea tubingului flexibil (la distanța $2D$, unde D reprezintă diametrul exterior al tubingului flexibil, $D = 38,1$ mm). În fiecare plan de măsurare s-au efectuat măsurători circumferențiale (fig. 4.13). S-au măsurat (fig. 4.13) diametrul exterior al materialului tubular (D) în fiecare plan de măsurare (1, 2, 3, 4, 5) și pe fiecare poziție circumferențiară marcată (A-E, B-F, C-G, D-H) și, de asemenea, grosimea de perete (t) – conform tabelelor 4.9 - 4.16. Cu ajutorul mărimilor astfel determinate, s-a calculat excentricitatea (E) și ovalitatea (O) conform relațiilor prezentate în tabelele 4.9 - 4.16. În conformitate cu valorile măsurate ale diametrelor pentru cele 8 epruvete de încercare, s-au trasat variațiile diametrelor corelate cu fiecare plan de măsurare (1, 2, 3, 4, 5) și pe fiecare poziție circumferențiară marcată (A-E, B-F, C-G, D-H). Reprezentările grafice obținute sunt redată în figurile 4.16 – 4.23. Determinarea caracteristicilor geometrice ale materialului tubingului flexibil are implicații, asupra comportării în exploatare a tubingului, prin identificarea zonelor în care apar creșteri sau descreșteri ale diametrului exterior, respectiv micșorarea grosimii de perete. Astfel, la încercarea la tracțiune a tubingului flexibil, s-a constatat experimental că epruveta *P1/0* (tabelul 4.9), care a fost supusă la încercarea la tracțiune, s-a rupt în zona marcată 3-4, zonă în care atât variația diametrului exterior cât și a grosimii de perete au fost minime.

- S-au efectuat încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și tehnologice ale materialului tubingului flexibil, care au vizat determinarea durității, încercări la tracțiune și încercarea la aplatizare. Scopul acestor determinări a constat în verificarea caracteristicilor obținute prin încercări cu cele precizate în normativele de material (A606, API RP5C7), precum și modul cum evoluează indicatorii obținuți în funcție de numărul de cicluri de exploatare a tubingului flexibil.

- Determinarea durității materialului tubingului flexibil, s-a efectuat prin stabilirea durității Vickers, utilizând pentru încercări 2 tipuri de epruvete, *P1* – confecționată din tubing flexibil nou (fără cicluri de funcționare) și *P2* – confecționată din tubing flexibil cu 80 cicluri de funcționare. Din analiza datelor obținute, prin indicatorii de duritate determinați, se confirmă că

materialul tubingului flexibil se încadrează în specificațiile API RP5C7, max. HRC < 22, valoarea medie obținută experimental fiind HV = 242 (HRC = 20). Pentru epruveta P2 cu 80 cicluri de funcționare, se remarcă o ușoară tendință a creșterii durtății, ceea ce semnifică faptul că ductilitatea materialului scade, odată cu creșterea numărului ciclurilor de funcționare.

- Încercarea la aplatisare s-a realizat prin deformarea plastică la rece a epruvetei până când suprafețele interioare au luat contact una cu cealaltă. S-a examinat vizual zonele de la extremitățile îndoite (zonele 3 și 9) și nu au fost observate fisuri sau crăpături ale materialului (fig. 4.10).

- Încercarea la tracțiune, a avut ca obiectiv, determinarea caracteristicilor mecanice ale materialului tubingului flexibil: limita de curgere convențională $R_{p0,2}$; rezistența de rupere la tracțiune R_m ; modulul de elasticitate longitudinală, E ; alungirea procentuală după rupere A_r (tabelul 4.7). În acest mod, se pot efectua interpretări calitative și cantitative privind proprietățile de elasticitate și plasticitate ale materialului tubingului flexibil. Pentru încercările la tracțiune s-au utilizat patru clase de epruvete, clasificate în funcție de numărul de cicluri de funcționare a tubingului flexibil în exploatare, (tabelul 4.6): P1/0 – tubing flexibil nou (fără funcționare); P2/30 – tubing flexibil care a efectuat 30 de cicluri de funcționare în sondă; P3/50 – tubing flexibil care a efectuat 50 de cicluri de funcționare în sondă; P4/80 – tubing flexibil care a efectuat 80 de cicluri de funcționare în sondă. Totuși, comportarea fragilă sau ductilă la rupere, nu reprezintă, întotdeauna o caracteristică specifică a fiecărui material metalic. Modul de comportare la rupere poate fi influențat de parametrii care definesc condițiile solicitării mecanice: a) temperatura materialului în timpul solicitării; b) viteza de solicitare (viteza de aplicare a sarcinilor și/sau viteza de deformare a materialului); c) gradul de triaxialitate al stărilor de tensiuni generate în materialul supus solicitării.

- Din informațiile prezentate în sursa bibliografică [129], în absența unei specificații tehnice unificate (standard european sau acord tehnic european) se admit, categoriile de ductilitate în funcție de alungirea la rupere A_r , precum și de raportul $R_m/R_{p0,2}$ (rezistența la tracțiune/limita de curgere) în conformitate cu tabelul 4.8. Prin interpretarea datelor prezentate în tabelul 4.7 (asociate în tabelul 4.8) se stabilește că, materialul cercetat al tubingului flexibil se încadrează în categoria de ductilitate C, care prevede valorile raportului $1,5 \leq R_m/R_{p0,2} \leq 1,35$, iar $A_r = \text{min. } 16 \%$.

- Din punct de vedere a comparării caracteristicilor de rezistență măsurate (tabelul 4.7) ale materialului tubingului flexibil, cu caracteristicile standardizate (tabelele 1.8, 1.9, 1.10) se constată următoarele aspecte: a) rezistența de rupere la tracțiune este $R_m = 645$ MPa (tabelul 4.7) pentru proba de tubing flexibil neutilizată (P1/0), iar pentru materialele standardizate valoarea cea mai apropiată este $R_m = 620$ MPa – grad CT 80 (tabelul 1.10), ceea ce reprezintă o creștere de 4%; b) limita de curgere convențională este $R_{p0,2} = 509$ MPa (tabelul 4.7) pentru proba de tubing flexibil neutilizată (P1/0), iar pentru materialele standardizate valoarea cea mai apropiată este $R_{p0,2} = 483$ MPa - grad CT 70 (tabelul 1.10), ceea ce reprezintă o creștere de 51%; c) încercarea de rupere la tracțiune a evidențiat, că pe măsură ce crește gradul de utilizare al materialului tubingului flexibil (epruvetele P2, P3, P4) caracteristicile de rezistență scad (tabelul 4.7).

- Cercetările experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil s-au efectuat pe un număr de 12 epruvete tip plăcuță, dintre care: 3 epruvete (P1) au fost prelevate din tubingul flexibil nou (fără funcționare), 3 epruvete (P2) din tubingul flexibil având 30 de cicluri de funcționare, 3 epruvete (P3) din tubingul flexibil având 50 de cicluri de funcționare și 3 epruvete (P4) din tubingul flexibil având 80 de cicluri de funcționare.

Epruvetele au fost prelevate atât din zona cordonului de sudură cât și din cea fără cordon de sudură. Prelevarea din tubingul flexibil cât și prelucrarea s-au realizat cu regimuri puțin intensive pentru a nu modifica structura materialului și/sau a introduce eforturi remanente. S-a folosit ca mediu de lucru apa de sondă. Pentru încercări s-a utilizat un potențostat VoltaLab PGZ 100 și o celulă electrochimică respectându-se ASTM G5, din dotarea Laboratorului de coroziune al UPG Ploiești. S-au trasat curbele de polarizare și diagramele Evans cu dreptele lui Tafel și s-au determinat: potențialul de coroziune (E_{corr}), densitățile de curent de coroziune (I_{corr}) și viteza de coroziune (C_{rr}).

- Deoarece, o rolă de tubing flexibil este utilizată, în medie pe an, la 80 cicluri a câte 12 ore în mediu de lucru, iar în timpul cât nu funcționează tubingul, acesta este supus unei coroziuni atmosferice, s-a determinat analitic viteza de coroziune în condiții atmosferice, obținându-se o valoare $C_{rr \text{ aer}} = 0,1551 \text{ mm/an}$. Ținând seama de durata funcționării tubingului în apa de zăcământ și de durata cât este supus coroziunii atmosferice, utilizând în calcul valoarea medie a vitezelor de coroziune în apa de zăcământ (tabelul 4.21), $C_{rr \text{ medie}} = 0,3133 \text{ mm/an}$ și $C_{rr \text{ aer}} = 0,1551 \text{ mm/an}$, s-a obținut o viteză de coroziune a tubingului: $C_{rr \text{ tubing}} = 0,1724 \text{ mm/an}$.

- Se constată, că apa de zăcământ rămasă pe pereții tubingului are o influență mare asupra vitezei de coroziune în aer. Pentru reducerea acesteia, se recomandă, insuflarea cu azot pentru eliminarea peliculei de apă de zăcământ de pe pereții tubingului.

- Viteza de coroziune obținută este importantă, în calcul duratei de viață a tubingului ținându-se cont că se poate astfel determina micșorarea grosimii de perete în timp, iar împreună cu stabilirea numărului maxim de cicluri de solicitare se va evalua durata de viață a tubingului.

În capitolul cinci denumit „**Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice, tehnologice și geometrice ale tubingului flexibil Φ 31,75 mm (1 ¼ inch)**” se prezintă cercetările experimentale proprii efectuate în scopul verificării corespondenței dintre caracteristicile efective mecanice, tehnologice și geometrice ale materialului tubingului flexibil Φ 31,75 mm și specificațiile prevăzute în normativele specifice.

Studiile și cercetările abordate, permit formularea următoarelor concluzii:

- Pentru verificarea corespondenței dintre caracteristicile efective mecanice, tehnologice și geometrice ale materialului tubingului și specificațiile prevăzute în normativele specifice, s-a considerat materialul de bază A606 ASTM B704 [85], respectiv tubingul flexibil cu dimensiunile geometrice: diametrul exterior $D_e = 31,75 \text{ mm}$ (1 ¼ inch), grosimea de perete $t = 2,54 \text{ mm}$ (0,1 inch).

- Compoziția chimică s-a determinat pe epruvete de tip inel prelevate din materialul tubingului flexibil. S-au cercetat două tipuri de epruvete, stabilite în funcție de numărul de cicluri de funcționare a tubingului flexibil: $P1$ – epruvetă confecționată din tubing flexibil nou (neutilizat) și $P2$ – epruvetă confecționată din tubing flexibil cu 20 de cicluri de funcționare ((locația ROMGAZ).

- Din analiza macrostructurii s-a constatat că materialul nu prezintă concavități, supraînălțări. Analizând compozițiile din tabelul 5.1 cu valorile din standardul A606 se constată că atât materialul epruvetei $P1$, cât și al epruvetei $P2$, este oțel slab aliat, care are în compoziție pe lângă C, Mn și alte elemente de aliere. Valorile obținute pentru C și Mn se încadrează în valorile prevăzute în standard A606. Materialul epruvetei $P2$, are în compoziție N și procente mai mari de Mn, Cr, Ni, Mo, care îi conferă o bună rezistență la coroziune.

- Din analiza microstructurilor (fig. 5.1, 5.2) s-a constatat că structura materialului epruvetelor este bifazică, ferito-perlitică (ferita albă, perlita neagră), foarte fină, uniform distribuită, cu porțiuni ușor orientate în șiruri de laminare, având mărimea grăuntelui punctaj (9 ... 9,5) conform EN ISO 643 și ASTM E112.

- S-au efectuat încercări de determinare a caracteristicilor geometrice ale materialului tubingului flexibil. Pentru încercări s-au utilizat epruvete tip țevă, grupate în două clase, care țin seama de numărul de cicluri de funcționare a tubingului flexibil în exploatare, astfel: *P1/0* – tubing flexibil nou (fără funcționare); *P2/20* – tubing flexibil care a efectuat 20 de cicluri de funcționare în sondă. În conformitate cu valorile diametrelor măsurate pentru cele 6 probe prelevate din tubing flexibil s-au trasat variațiile diametrelor corelate cu fiecare plan de măsurare (1, 2, 3, 4, 5) și pe fiecare poziție circumferențiară marcată (A-E, B-F, C-G, D-H). Epruvetele măsurate au fost solicitate la încercarea la tracțiune. S-a constatat, că ruperea s-a produs în majoritatea cazurilor în zonele 2 și 3, respectiv 1 și 2, marcate pe epruvetele cercetate (tabelul 5.11).

- Determinările experimentale s-au realizat prin măsurători în zone de măsurare longitudinale și transversale, marcate pe epruvetele de încercare, unde se măsoară diametrul și grosimea de perete. Cu ajutorul mărimilor astfel determinate, s-a calculat excentricitatea (*E*) și ovalitatea (*O*) conform relațiilor prezentate în tabelele 5.5 – 5.10. Reprezentările grafice obținute sunt redată în tabelul 5.11. Determinarea caracteristicilor geometrice ale materialului tubingului flexibil are implicații, asupra comportării în exploatare a tubingului, prin identificarea zonelor în care apar creșteri sau descreșteri ale diametrului exterior, respectiv micșorarea grosimii de perete. Astfel, la încercarea la tracțiune a tubingului flexibil, s-a constatat experimental că epruveta *P1/1* (tabelul 5.11), care a fost supusă la încercarea la tracțiune, s-a rupt în zona marcată 2-3, zonă în care atât variația diametrului exterior cât și a grosimii de perete au fost minime.

- S-au efectuat încercări pentru determinarea caracteristicilor mecanice și tehnologice ale materialului tubingului flexibil, care au vizat determinarea durtății, încercări la tracțiune și încercarea la aplatizare. Scopul acestor determinări a constat în verificarea caracteristicilor obținute prin încercări cu cele precizate în normativele de material (A606, API RP5C7), precum și modul cum se comportă indicatorii obținuți în funcție de numărul de cicluri de exploatare a tubingului flexibil.

- Determinarea durtății materialului tubingului flexibil, s-a efectuat prin stabilirea durtății Vickers, utilizând pentru încercări 2 tipuri de epruvete, *P1* – confecționată din tubing flexibil nou (fără cicluri de funcționare) și *P2* – confecționată din tubing flexibil cu 20 cicluri de funcționare. Din analiza datelor obținute, prin indicatorii de duritate determinați, se confirmă că materialului tubingului flexibil se încadrează în specificațiile API RP5C7, max. HRC < 22, valoarea medie obținută experimental fiind HV = 221 (HRC = 18). Pentru epruveta *P2* cu 20 cicluri de funcționare, se remarcă o ușoară tendință a creșterii durtății, ceea ce semnifică faptul că ductilitatea materialului scade, odată cu creșterea numărul ciclurilor de funcționare.

- Încercarea la aplatizare s-a realizat prin deformarea plastică la rece a epruvetei până când suprafețele interioare au luat contact una cu cealaltă. S-a examinat vizual zonele de la extremitățile îndoite (zonele 3 și 9) și nu au fost observate fisuri sau crăpături ale materialului (fig. 4.10).

- Încercarea la tracțiune, a avut ca obiectiv, determinarea caracteristicilor mecanice ale materialului tubingului flexibil: limita de curgere convențională $R_{p0,2}$; rezistența de rupere la tracțiune R_m ; modulul de elasticitate longitudinală, E ; alungirea procentuală după rupere A_r

(tabelul 5.3). În acest mod, se pot efectua interpretări calitative și cantitative privind proprietățile de elasticitate și plasticitate ale materialului tubingului flexibil. Pentru încercările la tracțiune s-au utilizat două tipuri de epruvete, $P1$ – confecționată din tubing flexibil nou (fără cicluri de funcționare) și $P2$ – confecționată din tubing flexibil cu 20 cicluri de funcționare.

- Prin interpretarea datelor prezentate în tabelul 5.4 (asociate în tabelul 5.3) se stabilește că, materialul cercetat al tubingului flexibil se încadrează în categoria de ductilitate C, care prevede valorile raportului $1,5 \leq R_m/R_{p0,2} \leq 1,35$, iar $A_r = \text{min. } 16 \%$.

Din punct de vedere a comparării caracteristicilor de rezistență măsurate (tabelul 5.3) ale materialului tubingului flexibil, cu caracteristicile standardizate (tabelele 1.8, 1.9, 1.10) se constată următoarele aspecte: a) rezistența de rupere la tracțiune este $R_m = 687 \text{ MPa}$ (valoare medie – tabelul 5.3) pentru proba de tubing flexibil neutilizată ($P1/0$), iar pentru materialele standardizate valoarea cea mai apropiată este $R_m = \text{min. } 689 \text{ MPa}$ – grad CT 90 (tabelul 1.10), ceea ce reprezintă o scădere de 1 %; b) limita de curgere convențională este $R_{p0,2} = 596 \text{ MPa}$ ((valoare medie – tabelul 5.3) pentru proba de tubing flexibil neutilizată ($P1/0$), iar pentru materialele standardizate valoarea cea mai apropiată este $R_{p0,2} = \text{min. } 620 \text{ MPa}$ - grad CT 90 (tabelul 1.10), ceea ce reprezintă o scădere de 39 %; c) încercarea de rupere la tracțiune a evidențiat, că pe măsură ce crește gradul de utilizare al materialului tubingului flexibil (epruvetele $P1$, $P2$) caracteristicile de rezistență scad (tabelul 5.3).

- Cercetările experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil s-au efectuat pe un număr de 4 epruvete tip plăcuță (tabelul 5.14), dintre care: 2 epruvete ($P1$) au fost prelevate din tubingul flexibil nou (fără funcționare), 2 epruvete ($P2$) din tubingul flexibil având 20 de cicluri de funcționare. Epruvetele au fost prelevate atât din zona cordonului de sudură cât și din cea fără cordon de sudură. S-au trasat curbele de polarizare și diagramele Evans cu dreptele lui Tafel și s-au determinat: potențialul de coroziune (E_{corr}), densitățile de curent de coroziune (I_{corr}) și viteza de coroziune (C_{rr}). Valoarea medie a vitezelor de coroziune în apa de zăcământ (tabelul 5.14), $C_{\text{rr}_{\text{medie}}} = 0,4985 \text{ mm/an}$ și în aer $C_{\text{rr}_{\text{aer}}} = 0,1284 \text{ mm/an}$, au condus la obținerea unei viteze de coroziune a tubingului: $C_{\text{rr}_{\text{tubing}}} = 0,1689 \text{ mm/an}$.

- Se constată că viteza de coroziune ($C_{\text{rr}_{\text{tubing}}} = 0,1689 \text{ mm/an}$), a materialului tubingului flexibil cu diametrul $D = 31,75 \text{ mm}$ este mai mică decât cea a materialului tubingului $D = 38,1 \text{ mm}$ ($C_{\text{rr}_{\text{tubing}}} = 0,1724 \text{ mm/an}$ – capitolul 4), deoarece materialul epruvetelor $P1$ și $P2$, au în compoziție procente mai mari de Mn, Cr, Ni, Mo, care îi conferă o bună rezistență la coroziune.

În capitolul șase denumit „*Cercetări experimentale privind solicitarea la încovoiere ciclică și presiune interioară a tubingului flexibil*” se prezintă metodologia și testele efectuate pentru încercarea la solicitarea ciclică cu presiune interioară, în condiții de laborator. Scopul acestor determinări a fost stabilirea numărului total de cicluri la care rezistă tubingul flexibil care este supus la acțiunea cumulată a solicitărilor de încovoiere și presiune interioară.

Din punct de vedere practic, fisurarea materialului tubingului flexibil este pusă în evidență, prin scăderea presiunii fluidului din interiorul tubingului, aceasta fiind indicată de manometrul dispozitivului de încercare.

Studiile și cercetările abordate, în acest capitol, permit formularea următoarelor concluzii:

- În scopul determinării durabilității tubingului flexibil au fost inițiate și s-au dezvoltat numeroase tipuri de încercări pentru a stabili numărul total de cicluri de lucru până la rupearea/fisurarea acestuia. În literatura de specialitate [30, 62], s-au conturat două categorii

principale de încercări ale tubingului flexibil. Prima categorie se referă la încercări efectuate în condiții reale de exploatare cu ajutorul instalațiilor tubing flexibil. A doua categorie constă în încercarea tubingului flexibil cu ajutorul unor dispozitive/standuri care reproduc condițiile de exploatare ale tubingului flexibil.

- Testele experimentale proprii au fost efectuate, în condiții de laborator, utilizând echipamentul existent la Departamentul Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești [152] și au constatat în încercări la încovoiere prin cicluri complete de îndoire/îndreptare, tubingul flexibil fiind supus la presiune interioară (fig. 6.14, [152]).

- Construcția dispozitivului a fost îmbunătățită prin modificarea sistemului de prindere și fixare. Astfel, au fost proiectate și s-au confecționat, game diverse de bușe care să permită prinderea și fixarea diferitelor tipodimensiuni ale tubingului flexibil. Pentru controlul și înregistrarea parametrilor de monitorizare s-a realizat montajul unui contor de numărare a numărului de cicluri. De asemenea, s-a înregistrat temperatura zona de îndoire a tubingului flexibil folosind o cameră de termoviziune.

- Pentru realizarea solicitării la încovoiere a tubingului flexibil, similar cu raza de curbura a arcului de ghidare sau raza tobei de înmagazinare (fig. 6.17), s-a adoptat soluția deformării prin îndoire/îndreptare a tubingului flexibil în jurul unui ghidaj curb (poziția 2, din figura 6.15), având raza corespunzătoare construcțiilor uzuale ale instalațiilor de tubing flexibil.

- Cercetările experimentale s-au efectuat pe un număr de 18 epruvete de încercare, grupate în șase clase de epruvete, fiind clasificate în funcție de următoarele condiții: a) diametrul exterior al tubingului flexibil ($D_e = 38,1$ mm; $D_e = 31,75$ mm); b) grosimea de perete a tubingului flexibil ($t = 2,76$ mm; $t = 2,54$ mm); c) numărul de cicluri de funcționare a tubingului flexibil în exploatare (tabelul 6.1): P1/38/0 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, nou (fără funcționare); P2/38/30 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, care a efectuat 30 de cicluri de funcționare în sondă; P3/38/50 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm, care a efectuat 50 de cicluri de funcționare în sondă; P4/38/80 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 38,1$ mm care a efectuat 80 de cicluri de funcționare în sondă; P5/31/0 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 31,75$ mm, nou (fără funcționare); P6/31/20 – tubing flexibil cu diametrul $D_e = 31,75$ mm, care a efectuat 20 de cicluri de funcționare în sondă.

- Din analiza rezultatelor testelor de laborator efectuate cu dispozitivul de testare la oboseală, s-a constatat că numărul total de cicluri la care se produce fisurarea tubingului flexibil, scade cu: a) creșterea presiunii interioare a fluidului; b) micșorarea grosimii peretelui tubingului flexibil; c) scăderea caracteristicilor mecanice ale materialului; d) creșterea numărului de cicluri de funcționare în sondă.

- S-a constatat că fisurarea epruvetei s-a produs, la o distanță de (0,3...0,5) m față de dispozitivul de prindere și fixare (fig. 6.24).

- S-a constatat că amorsarea fisurii, în principiu, se propagă de la interiorul tubingului flexibil și este amplificată prin efectul de îndoire ciclică. La interiorul tubingului flexibil fenomenul de coroziune se manifestă mai accentuat, ceea ce conduce la amorsarea și propagarea fisurii mai rapid. În același timp, efectul presiunii interioare a fluidului de lucru se manifestă prin accentuarea propagării fisurii, micșorând astfel durabilitatea tubingului flexibil.

- Existența pe suprafața exterioară a tubingului flexibil a unor defecte mecanice cum ar fi lovituri, adâncituri, zgârieturi favorizează apariția și dezvoltarea fisurilor în zona respectivă (fig. 6.26).

- S-a constatat din analiza comparativă a rezultatelor cercetărilor experimentale proprii, cu datele prezentate în alte surse bibliografice [30, 33, 37], o împrăștiere a valorilor obținute, care variază cu creșteri de până la 32% a numărului de cicluri până la fisurare pentru încercări proprii (NCR_p) față de numărul de cicluri, prezentate în alte surse (NCR_s), respectiv cu scăderi de până la 1 % – tabelul 6.3. Aceste diferențe constatate se explică prin complexitatea condițiilor și fenomenelor care se produc în exploatare, și de asemenea, prin posibilitățile limitate de modelare a încercărilor în condiții de laborator. Astfel, din diversitatea factorilor care influențează condițiile de încercare se pot aminti: dimensiunile tubingului, grosimea de perete, lungimile rolor de tubing, tipurile de materiale, diametrele tobei de înmagazinare, razele arcului de ghidare, tipurile de operațiuni întreprinse, fluidul de lucru etc.).

- S-au efectuat determinări experimentale pentru stabilirea stării de tensiuni a materialului tubingului flexibil prin metoda tensometriei rezistive. Mărcile tensometrice au fost montate pe suprafața exterioară a tubingului flexibil corespunzător modului de înregistrare a tensiunilor pe fibra întinsă, respectiv pe cea comprimată la realizarea ciclului de îndoire/îndreptare pe standul de încercare (fig. 6.34). Se constată că valorile tensiunilor mecanice înregistrate sunt mai mici decât limita de rupere a materialului tubingului flexibil ($\sigma_{\max} = 616 \text{ MPa} < R_m = 645 \text{ MPa}$ și $\sigma_{\min} = 537 \text{ MPa} < R_m = 645 \text{ MPa}$), dar este depășită limita de curgere, ceea ce demonstrează că s-a ajuns în domeniul elasto-plastic ($\sigma_{\min} = 537 \text{ MPa} > R_{p0.2\%} = 509 \text{ MPa}$). Creșterea tensiunilor mecanice peste limita de curgere a materialului tubingului flexibil ($R_{p0.2\%} = 509 \text{ MPa}$) este de 17 % ($\sigma_{\max} = 616 \text{ MPa}$).

- S-a determinat temperatura care se dezvoltă în procesul de îndoire ciclică cu o cameră de termoviziune. Înregistrările arată valori de circa 60 °C, la încercarea care s-a desfășurat timp de 105 min. Această încălzire locală, sub acțiunea forțelor axiale, provoacă alungirea tubingului flexibil sau sub acțiunea presiunii interioare, mărirea diametrului exterior.

Capitolul șapte denumit „**Analiza cu element finit a comportării tubingului flexibil la încovoiere ciclică cu presiune interioară**” prezintă modul în care diferitele tipuri de defecte de pe suprafața exterioară a tubingului flexibil influențează numărul de cicluri total până la ruperea acestuia. Utilizarea metodei elementului finit permite o modelare a discontinuităților structurale cât mai apropiată de cea reală, din exploatare, dacă este ales corespunzător tipul de element finit utilizat în simulare, cât și adoptarea corespunzătoare a legăturilor și a încărcărilor.

S-au cercetat următoarele probleme: a) forma și dimensiunile defectului de pe suprafața exterioară a tubingului flexibil; b) adâncimea de pătrundere a defectului; c) amplasarea defectului pe generatoarea tubingului flexibil, la diferite intervale de lungime, pe fibra întinsă, respectiv pe cea comprimată, în cazul solicitărilor la încovoiere ciclică.

Pentru a efectua modelarea cu elemente finite s-a utilizat software SOLIDWORKS, care a permis introducerea caracteristicilor obținute experimental pentru materialul tubingului flexibil cât și simularea încercării la oboseală și încovoiere a tubingului flexibil, solicitări care contribuie, în mare parte, la scoaterea din uz a acestuia.

S-au adoptat diverse variante pentru modelarea tipurilor de defecte care apar în exploatarea tubingului flexibil: creștături, scobituri, coroziuni, lovituri, adâncituri, amprente cu vârf rotunjit, amprente cu vârf ascuțit, umflături, turtiri, striviri locale, gătuiri. Aceste forme ale defectelor, influențează cele două caracteristici geometrice principale ale tubingului flexibil: diametrul exterior (prin mărirea/micșorarea dimensiunii inițiale) și grosimea de perete (prin micșorare).

S-au considerat ca date de bază pentru efectuarea simulărilor următoarele mărimi: a) diametrul exterior, $D_e = 38,1$ mm (1 ½ inch); b) grosimea de perete $t = 2,76$ mm (0,109 inch); c) lungimea epruvetei, $L = 1500$ mm; lungimea epruvetei este tronsonată la: $d_1 = 300$ mm, $d_2 = 500$ mm și $d_3 = 700$ mm față de capătul fix al acesteia; d) tipul defectului: sferă; con; trunchi de piramidă (TP); real: e) mărimea forței de încovoiere: $F_i = (1100; 1200; 1300; 1400)$ N; f) valoarea presiunii interioare: $p_i = 10$ MPa; g) tipul materialului: A 606.

S-a realizat sintetizarea rezultatelor obținute prin simulare, pe categorii de defecte, ce permite formularea următoarelor concluzii:

- pentru defectul tip sferă: a) valoarea maximă a tensiunii atât pe fibra comprimată ($\sigma_{c,max} = 523$ MPa) cât și pe cea întinsă ($\sigma_{i,max} = 478,5$ MPa) se obține pentru 2 defecte situate la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei; b) numărul minim de cicluri de funcționare ($NRC_{min} = 204$ cicluri) s-a obținut pentru $F_i = 1400$ N, cu un defect situat la $d_1 = 300$ mm de capătul fix al epruvetei pe fibra întinsă; c) deplasarea maximă ($l_{max} = 84,13$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 300$ mm, $d_2 = 500$ mm, $d_3 = 700$ mm, indiferent de fibra pe care se găsește; d) deplasarea minimă ($l_{min} = 66,12$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1100$ N indiferent de numărul defectelor și poziția acestora.

- pentru defectul de tip con: a) valoare maximă a tensiunii ($\sigma_{c,max} = 472,9$ MPa) se întâlnește pentru $F_i = 1400$ N, în cazul unui defect situat la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra comprimată; b) numărul minim de cicluri de funcționare ($NRC_{min} = 204$ cicluri) s-a obținut pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 300$ mm, $d_2 = 500$ mm, $d_3 = 700$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra întinsă; c) numărul minim de cicluri de funcționare crește, pe măsură ce scade forța de încovoiere; d) deplasarea maximă ($l_{max} = 84,11$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 300$ mm, $d_2 = 500$ mm, $d_3 = 700$ mm indiferent de fibra pe care se găsește; e) deplasarea minimă ($l_{min} = 66,12$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1100$ N, indiferent de numărul defectelor și poziția acestora.

- pentru defectul trunchi de piramidă: a) valoare maximă a tensiunii ($\sigma_{c,max} = 521,2$ MPa) se întâlnește la $F_i = 1400$ N pentru un defect situat la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra comprimată și pentru 2 defecte situate la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei; b) numărul minim de cicluri de funcționare ($NRC_{min} = 212$ cicluri) se întâlnește pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 300$ mm, $d_2 = 500$ mm, $d_3 = 700$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra întinsă, dar și pentru un defect situat la $d_1 = 500$ mm pe fibra comprimată și 2 defecte situate la $d_1 = 300$ mm de capătul fix al epruvetei; c) numărul minim de cicluri de funcționare crește, pe măsură ce scade forța de încovoiere; d) deplasarea maximă ($l_{max} = 84,11$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1400$ N, indiferent numărul defectelor și poziția acestora; e) deplasarea minimă ($l_{min} = 66,12$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1100$ N, indiferent de numărul defectelor și poziția acestora.

- pentru defectul real: a) valoare maximă a tensiunii ($\sigma_{c,max} = 528,2$ MPa) se întâlnește pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra comprimată; această valoare este și cea mai mare care s-a înregistrat pentru toate tipurile de încercări; b) numărul minim de cicluri de funcționare ($NRC_{min} = 204$ cicluri) se întâlnește pentru $F_i = 1400$ N, un defect situat la $d_1 = 500$ mm, de capătul fix al epruvetei pe fibra întinsă; c) numărul minim de cicluri de funcționare, crește pe măsură ce scade forța de încovoiere; d) deplasarea maximă ($l_{max} = 84,13$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1400$ N, cu un defect situat la $d_1 = 300$ mm, de capătul fix al epruvetei indiferent de fibră; e) deplasarea

minimă ($l_{min} = 66,12$ mm) se înregistrează pentru $F_i = 1100$ N, un defect situat la $d_l = 700$ mm, de capătul fix al epruvetei indiferent de fibră;

S-a realizat un model care permite compararea rezultatelor obținute pentru determinările experimentale de laborator (metoda experimentală de laborator – MEL, conform capitolului 6), cu modelarea prin element finit (metoda elementului finit – MEF) a defectelor tubingului flexibil. Defectul adoptat este de tip balonare (umflare), asemănător cu cele care a apărut în timpul încercării la oboseală pe dispozitivul de încercare de laborator.

S-a încărcat modelul cu $p_i = 12$ MPa, $F_i = 1400$ N și s-au efectuat simulări prin poziționarea unui defect tip balonare pe fibra întinsă și pe cea comprimată a tubingului flexibil, la diferite distanțe ($d_l = 300$ mm; $d_2 = 500$ mm; $d_3 = 700$ mm) de la capătul fix al epruvetei.

Analiza rezultatelor obținute prin cele două tipuri de determinări (metoda elementului finit – MEF și metoda experimentală de laborator – MEL), au condus la formularea următoarelor concluzii:

- poziția defectului este aceeași în cazul ambelor metode studiate, fiind plasat pe fibra întinsă la distanța $d_l = 300$ mm, de la capătul fix al epruvetei;

- deplasarea capătului liber al epruvetei în cazul metodei experimentale de laborator este $d_{MEL} = 80$ mm, iar prin MEF, $d_{MEF} = 81,59$ mm, eroarea față de metoda experimentală de laborator, fiind de 2%.

- numărul de cicluri până la fisurare, determinat prin metoda experimentală de laborator este $NCR_{MEL} = 196$ cicluri, iar prin MEF, $NCR_{MEF} = 181$ cicluri, eroarea față de metoda experimentală de laborator, fiind de 7%. După cum se constată rezultatele obținute sunt foarte apropiate. Totuși rezultatele care se obțin prin metoda elementului finit trebuie validate printr-o metoda experimentală.

4. Contribuții personale

Pe baza studiilor și cercetărilor efectuate în cadrul tezei de doctorat se evidențiază următoarele aspecte care constituie contribuția personală a autorului.

A. Studiul bibliografic

- Analiza critică a stadiului actual privind caracteristicile constructiv-funcționale ale instalațiilor de tubing flexibil, precum și direcțiile de cercetare referitoare la perfecționarea acestor echipamente.

- Analiza critică a rezultatelor cercetărilor teoretice și experimentale privind modul de comportare în exploatare a tubingului flexibil, care are ca scop evidențierea mecanismelor de cedare a acestora și ponderea lor.

B. Aplicații. Model de calcul

- Elaborarea unui model de calcul prin care s-a determinat alungirea tubingului flexibil datorită încărcării axiale – Aplicația A1.

- Elaborarea unui model de calcul prin care s-au determinat valorile razelor minime de curbura ale arcului de ghidare în funcție de diametrul tubingului flexibil utilizat – Aplicația A2

- Elaborarea unui model de calcul pentru a stabili modificarea lungimii tubingului flexibil din cauza efectelor termice, aplicația A3.

- Elaborarea unui model de calcul referitor la modificarea lungimii tubingului flexibil din cauza presiunii diferențiale care se manifestă pe peretele tubingului flexibil – aplicația A4.
- Elaborarea unui model de calcul pentru determinarea condiției de bună funcționare a instalației de tubing flexibil.
- Conceperea și elaborarea unui sistem integrat de predicție a duratei de viață operațională a tubingului flexibil. Sistemul inteligent de evaluare a duratei de viață a tubingului flexibil prezentat în cadrul tezei constituie obiectul unei propuneri de brevet de invenție depusă la OSIM, *Sistem inteligent de evaluare a duratei de viață a tubingului flexibil folosit în industria extracției petrolului și gazelor naturale*.

C. Cercetări experimentale

- Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice, tehnologice și geometrice ale tubingului flexibil cu diametrul ϕ 38,1 mm.
- Cercetări experimentale privind determinarea caracteristicilor mecanice, tehnologice și geometrice ale tubingului flexibil cu diametrul ϕ 31,75 mm.
- Cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil cu diametrul ϕ 38,1 mm.
- Cercetări experimentale privind rezistența la coroziune a materialului tubingului flexibil cu diametrul ϕ 31,75 mm.
- Cercetări experimentale privind solicitarea la încovoiere ciclică și presiune interioară a tubingului flexibil, pe dispozitiv de încercare de laborator.

D. Conceperea, proiectarea, modernizarea dispozitivelor de încercare

- Proiectarea și construcția, unui dispozitiv pentru detectarea defectelor de suprafață ale tubingului flexibil, în condiții de laborator.
- Îmbunătățirea construcției dispozitivului de încercare la încovoiere prin cicluri complete de îndoire/îndreptare a tubingul flexibil, la presiune interioară, existent la Departamentul Inginerie Mecanică din Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

E. Modelare, simulare

- Modelarea și simularea prin metoda elementului finit, a încercării tubingului flexibil la solicitarea de încovoiere cu presiune interioară, pentru diferite tipuri de defecte (crestături, scobituri, adâncituri, amprente cu vârf rotunjit, amprente cu vârf ascuțit) care apar suprafața exterioară a acestuia.

F. Diseminarea rezultatelor

Diseminarea unor rezultate obținute, în cadrul tezei de doctorat, s-a realizat prin publicarea unui articol indexat WOS [93], un articol indexat SCOPUS [167], o cerere de brevet de invenție [123], echivalentă cu un articol indexat WOS și o participare la expoziția Internațională de Invenții [168].

5. Direcții viitoare de cercetare

Cercetările efectuate și rezultatele obținute, permit abordarea unor direcții de cercetare noi, care pot fi evidențiate prin:

- cercetări experimentale privind influența amprentării suprafeței exterioare a tubingului flexibil asupra duratei de funcționare a acestuia;
- monitorizare durabilității tubingului flexibil pe baza înregistrării parametrilor reali de funcționare cu ajutorul unui sistem inteligent de monitorizare;
- cercetări privind modelarea și simularea solicitărilor din zonele de îndoire/îndreptare (arcul de ghidare, toba de înmagazinare) ale tubingului flexibil.

Bibliografie

1. *** https://en.wikipedia.org/wiki/Coiled_tubing
2. *** <https://services.tacrom.ro/ro/servicii/>;
3. *** https://en.wikipedia.org/wiki/China_National_Petroleum_Corporation;
4. *** <http://www.franklinwell.com/equipment/coil-tubing.php>;
5. *** <http://www.drillingformulas.com/introduction-to-coiled-tubing-ct-in-oil-and-gas/>;
6. *** <http://go.jereh.com/Product/LGT450-Trailer-Mounted-Coiled-Tubing-Unit-9.html>;
7. Michael, J., Loughlin, M., *History of and Applications for a Coil-Tubing-Conveyed, Inflatable, Selective Injection Straddle Packer*, Paper presented at the European Petroleum Conference, Paper Number: SPE-50655-MS, The Hague, Netherlands, October, 1998, <https://doi.org/10.2118/50655-MS>, Published: October 20, 1998;
8. Doe Thomas, Lacazette Alfred, Dershowitz William, Knitter Clifford, *Evaluating the Effect of Natural Fractures on Production from Hydraulically Fractured Wells Using Discrete Fracture Network Models*, Unconventional Resources Technology Conference, DOI: 10.1190/urtec2013-172, August 2013;
9. *** <https://www.fortunebusinessinsights.com/industry-reports/coiled-tubing-service-market-101343>;
10. *** https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-complete-guide/?expand_article=1;
11. *** <https://www.alliedmarketresearch.com/coiled-tubing-market>;
12. *** https://www.academia.edu/11259878/Coiled_Tubing_The_Next_Generation;
13. *** <https://www.academia.edu/25270084/>;
14. Goodrich, G. T., Smith, B. E., Larson, E. B., *Coiled Tubing Drilling Practices at Prudhoe Bay*, Paper presented at the IADC/SPE Drilling Conference, New Orleans, Louisiana, Paper Number: SPE-35128-MS, <https://doi.org/10.2118/35128-MS>, Published: March 12, 1996;
15. *** <http://krawfordinc.com/coiled-tubing-equipment-for-sale/>;
16. *** <https://www.romgaz.ro/unitate-tubing-flexibil>;
17. *** <https://energynow.ca/2018/11/copper-tip-adds-brand-new-high-capacity-conventional-coiled-tubing-unit-to-their-fleet/>;
18. Ackert, D., Beardsell, M., Corrigan, M., Newman, K., *The coiled tubing revolution*. Oilfield Review, 1, 1989;
19. Afghoul, A. C., Amaravadi, S., Boumali, A., Calmeto, N., Lima, J., Lovell, J., Staal, T. *Coiled tubing: the next generation*. Oilfield Review, 6(4), 1994;

20. Fultz, J., Pittard, F., *Openhole drilling using coiled tubing and a positive displacement mud motor*, Paper presented at the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1990;
21. *** *Directional Drilling*, Baker Hughes INTEQ, course manual, 1994;
22. *** *Forajul sondelor. Carnet tehnic*, Ediția I, S.C. PETROSTAR Ploiești, 1997;
23. *** *Composite Catalog of Oilfield Equipment and Services, cataloage World Oil*, 1994... 2004;
24. *** *Carnet de șantier. Foraj*, Editura Tehnică, București, 1958;
25. Tatu, G., *Forarea sondelor. Carnet Tehnic*, Editura Tehnică, București, 1983;
26. Rașeev, D., Ulmanu, V., Georgescu, G., *Construcția și exploatarea garniturii de foraj*, Editura Tehnică, București, 1986;
27. Darcing, D. W., *Drilling Directional Holes Having Constant Curvature*, Paper SPE 3508, the 46-th SPE-AIME Annual Fall Meeting, New Orleans, oct., 1971;
28. *** https://petrowiki.org/images/0/08/Devol2_1102final_Page_696_Image_0001.png;
29. *** United States Patent Goddard US0093.99.895B2 (10) Patent No.: US 9,399,895 B2 (45), Date of Patent: Jul. 26, 2016;
30. *** *Coiled Tubing Manual*, NOV CTES, 3770 Pollok Drive Conroe, <https://www.drillingmanual.com/wp-content/uploads/2022/05/Coil-tubing-manual-nov-pdf-free.pdf> , 2007 – 2013;
31. *** <https://www.reasontek.com/oilfield-equipment/coiled-tubing-injector-chain-assembly/>;
32. Zisopol, D. G., *Cercetări privind construcția tubingului flexibil utilizat în industria petrolului*, Teză de doctorat, Universitatea Petrol - Gaze din Ploiești, 2000;
33. Trifan, N. C., *Cercetări privind tehnologiile de creștere a durabilității tubingului flexibil*, Teză de doctorat, Universitatea Petrol - Gaze din Ploiești, 2012;
34. *** *Coiled tubing units*, Science & Technology Management Department, China National Petroleum Corporation, 2013, <https://www.cnpc.com.cn/cnpc/gcdx/201407/94b4ad680ad94ea19a553675d70239c6/files/b2bf08a011e140648261b522f12ae7e6.pdf>;
35. *** <https://www.nov.com/Segments/Completion and Production Solutions/Intervention and Stimulation Equipment/Coiled Tubing/Hydra Rig/Coiled Tubing Equipment/Coiled Tubing Injectors.aspx>;
36. *** <https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-reel-components-mechanism-capacity/>;
37. Zhao-Ming Zhou , Jin-Song Tan, Bo Peng, *Improvement and determination of the influencing factors of coiled tubing fatigue life prediction*, *Advances in Mechanical Engineering*, <https://doi.org/10.1177/1687814019880131>, 2019;
38. *** https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc741954/m2/1/high_res_d/793217.pdf;
39. *** <https://parveen.in/wp-content/uploads/2019/12/Side-Loading-Stripper-Packer11.pdf>;
40. Lukin, N., Moura, R.T., Alves, M., Brüning, M., Driemeier, L., *Analysis of API S-135 steel drill pipe cutting process by blowout preventer*, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 195, art. no. 107819, 2020, doi: [10.1016/j.petrol.2020.107819](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107819), <http://www.sciencedirect.com/science/journal/09204105/81>;
41. Tulimilli, B. R., Naik, P., Chakraborty, A., Sawant, S., Whooley, A., Weiss, R., *Experimental and numerical investigation of BOP shear ram performance*, *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic*

- Engineering, 2014, <http://www.asmedl.org/journals/doc/ASMEDL-home/proc/ISBN:978-079184538-7>, doi: 10.1115/OMAE2014-24714;
42. Liu, B., Li, T., Zhao, Y., *Evaluation of Fracture Sectional Raised Height of the Sheared Drill Pipe in Shear Ram Blowout Preventer*, Gongcheng Kexue Yu Jishu/Advanced Engineering Sciences, 2019;
43. Lukin, N., Brüinig, M., Driemeier, L., *Metamodeling of structural failure: Case study of API S-135 steel tube cut in BOP*, Geoenergy Science and Engineering 225,211485, 2023,
<https://1a1017cxy-y-https-www-scopus-com.z.e-information.ro/record/display.uri?eid=2-s2.0-85159696637&origin=resultslist&sort=plf-f&cite=2-s2.0-85159696637&refeid=2-s2.0-84911401688&src=s&imp=t&sid=1abc661e6b78eb843004957f88f9d37e&sot=cite&sd t=a&sl=0&relpos=0&citeCnt=0&searchTerm;>
44. Abdulkadir Tekin, Changhyok Choi, Taylan Altan, Hamit Adin, *Estimation of shear force for blind shear ram blowout preventers*, Online Publication Date: 17 Feb 2015, URL: <http://www.jresm.org/archive/resm2014.02st1225.html> DOI: <http://dx.doi.org/10.17515/resm2014.02st1225>, Journal Research on Engineering Structures and Materials (RESM), 2015;
45. Arturo Magana-Mora, Michael Affleck, Mohamad Ibrahim, *Well Control Space Out: A Deep-Learning Approach for the Optimization of Drilling Safety Operations*. May 2021, DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3082661,
https://www.researchgate.net/publication/351792668_Well_Control_Space_Out_A_Deep-Learning_Approach_for_the_Optimization_of_Drilling_Safety_Operations [accessed Jul 15 2023];
46. Abernethy, R., *Shear ram blowout preventer forces required*. Case Study, Barringer & Associates Inc Florida, U.S., 2010;
47. *** <https://www.f-e-t.com/products/completions/well-intervention/pressure-control-equipment/blowout-preventer/quad-blowout-preventer/>;
48. *** <https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-power-pack-unit/>;
49. *** <http://crwlp.com/products/control-cabins/>;
50. *** *Coiled Tubing BOP & Pressure Control Equipment Guide*, 2022-05-10,
<https://www.drillingmanual.com/coiled-tubing-bop-pressure-control-equipment/>;
51. Abubaker Saeed, Saudi Aramco, Jarl André Fellinghaug and Brett Bouldin, *Wireless Coiled Tubing Disrupts the Industry by Enabling Use of Conventional Coil Tubing for Access and Matrix Acidizing of Multilaterals and Extended Reach Carbonate Reservoirs*, Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Society of Petroleum Engineers SPE-208116-MS, 15 – 18 November, 2021;
52. *** <http://midlandoiltools.com/coiled-tubing-midland.html>;
53. Adam, Jr., Bourgoyne. T., *Applied Drilling Engineering*, SPE Textbook Series, Vol 2, Edition. Society of Petroleum Engineers, 1986;
54. J.J. Azar, *Drilling Engineering*. Edition. PennWell Corp, 2007;
55. G. E. King., *Coiled Tubing Introduction*,
http://gekengineering.com/Downloads/Free_Downloads/Coiled_Tubing_Surface_Equipment.pdf. 2009;
56. *** <https://dokumen.tips/documents/coiled-tubing-units.html>;
57. *** <http://docshare01.docshare.tips/files/29333/293334076.pdf>;
58. *** <https://www.nov.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=28541>;

59. *** *Operation/Maintenance Manual, Coiled Tubing Unit, Model TC-12540 Truck-Mounted-* Stewart & Stevenson Petroleum Equipment Division;
60. Feechan, M., Makselon, C., & Nolet, S., *Field experience with composite coiled tubing*. Paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Houston, Texas, 2003;
61. Reem Roufail, Vamegh Rasouli, *Material substitution of coil tubes in CT drilling technology for hard rocks*, Conference: PETROLEUM 2012, Volume: 81, December, 2012, DOI: [10.2495/PMR120121](https://doi.org/10.2495/PMR120121)
<https://www.researchgate.net/publication/271417519> *Material substitution of coil tubes in CT drilling technology for hard rocks*;
62. Yongqiang Li, X. L. Gao, L. D. Ni, Y. A. Xin, *Fatigue of Coiled Tubing and its Influencing Factors: A Comparative Study*, Conference ASME 2016, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, November 2016, DOI: [10.1115/IMECE2016-65972](https://doi.org/10.1115/IMECE2016-65972)
<https://www.researchgate.net/publication/313625185> *Fatigue of Coiled Tubing and its Influencing Factors A Comparative Study*;
63. Hillis, R., *Coiled tubing drilling and real-time sensing—Enabling ‘prospecting drilling’ in the 21st Century*. Paper presented at the ASEG Extended Abstracts 2015: 24th International Geophysical Conference and Exhibition, 2015;
64. Avakov, V., Foster, J., & Smith, E., *Coiled tubing life prediction*. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 1993;
65. Nielsen, L. F., *Composite materials: properties as influenced by phase geometry*. Lyngby, Denmark: Springer, 2015;
66. Ong, J., *An improved technique for the prediction of axial fatigue life from tensile data*, International journal of fatigue, 15(3), 213-219, 1993;
67. Padron, T., & Craig, S.H., *Past and present coiled tubing string failures – history and recent new failures mechanisms*. Society of Petroleum Engineers – SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition 2018, <https://doi.org/10.2118/189914-MS>;
68. Poberezhny, L., Hrysanichuk, A., & Grytsuliak, H., *Influence of the gas hydrates on the corrosion rate of gas gathering pipelines*. Procedia Structural Integrity, (16), 141-147, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2019.07.033>;
69. Siamak Mishani, *Investigation of fatigue failure in composite versus steel coiled tube for application in mine site drilling*, Thesis, Faculty of Science and Engineering, Department of Petroleum Engineering, Curtin University, 2017, <https://nla.gov.au/nla.obj-731600675/view>
70. Starbuck, J. M., & Eberle, C., *Analytical solution for the design of spoolable composite tubing*, Mechanics of Materials, 3, 2000;
71. Newman, K., Kelleher, P., & Gunby, B., *Optimizing CT material properties for extended reach operations*. Society of Petroleum Engineers – SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition 2017, <https://doi.org/10.2118/184749-MS>;
72. Wei, X, Dong, J., Chen, N., Yadav, A.P., Ren, Q., Wei, J., & Ke, W., *Effects of bentonite content on the corrosion evolution of low carbon steel in simulated geological disposal environment*. Journal of Materials Science & Technology, (66), 46-56, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.04.071>;
73. J.Y. Julian, B.J. McLellan, and B.J. McNerlin, *Field Trial of QT-16Cr Chrome Coiled Tubing Used as a Workstring on the North Slope*, Alaska, SPE 100167, Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition 2006 Proceedings, Houston, Texas,

- April 4 – 5, 2006;
74. R.E. Domann, M.D. Kalman, and A. Sharma, *Development of a Tapered-OD Coiled-Tubing System*, SPE 99892, Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition 2006 Proceedings, Houston, Texas, April 4 – 5, 2006;
75. S.M. Tipton, G.H. Carlson, and J.R. Sorem, U., *Fatigue Integrity Analysis of Rotating Coiled Tubing*, SPE 100068, Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition 2006 Proceedings, Houston, Texas, April 4 – 5, 2006;
76. S.M. Tipton, L.G. Neuharth, and J.R. Sorem, *Influence of Prior Cycling on Fatigue Damage Caused by Defects in Coiled Tubing*, SPE 100199, Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition 2006 Proceedings, Houston, Texas, April 4 – 5, 2006;
77. Mao, H., & Mahadevan, S., *Fatigue damage modelling of composite materials. Composite structures*, Volume 58, nr. 4, December 2002, Pages 405-410, 2002, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(02\)00126-5](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(02)00126-5);
78. *** https://www.zycarbonsteel.com/about_us_1362747.html;
79. *** <https://standards.globalspec.com/std/14328573/api-spec-5st>;
80. *** ASTM A 606 - *Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance*;
81. *** *Quality Tubing Inc. Coiled Tubing Technical Data*, Houston, Texas, 2006;
82. Lekan Taofeek Popoola, Alhaji Shehu Grema, Ganiyu Kayode Latinwo, Babagana Gutti & Adebori Saheed Balogun, *Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation*, International Journal of Industrial Chemistry, volume 4, Article number: 35, 2013, <https://link.springer.com/article/10.1186/2228-5547-4-35>;
83. Johansson, E., Pettersson, R., Alfnsson, E., Weisang-Hoinard F., *Specialty stainless for solving corrosion problems in the oil and gas industry*, Offshore World, 2010;
84. Williams, E., Sas-Jaworsky, A., *Composite spoilable pipe development, advancements, and limitations*. Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2000;
85. *** ASTM B704, Edition 2019, November 1, 2019;
86. Donald Gibeaut, *Progress in inline seam annealing for small-diameter tube, pipe producers*, Tube and Pipe Journal, July 20, 2021;
87. Gibson, R. F., *Principles of composite material mechanics*. USA: McGraw-Hill, Inc., 2011;
88. Harris, B., *Engineering composite materials*. London, UK: Institute of metals London, 1986;
89. Hashin, Z., *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Journal of Applied Mechanics, 47(2), 329-334, 1980;
90. Jones, R. M., *Mechanics of composite materials* (Second ed.), Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 1998;
91. Mocanu, F., *Elemente de plasticitate*, Universitatea "Al. I. Cuza" Iași, 2012, <https://mec.tuiasi.ro/diverse/FMEP.pdf>;
92. **Hagianu, A.**, *Cercetări teoretico-experimentale privind caracteristicile constructiv-funcționale ale tubingului flexibil utilizat la sondele de petrol și gaze*, Raport de cercetare nr. 2, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiesti, aprilie, 2020;
93. **Hagianu, A.**, Nae, I., Ionescu, G.C., Rîpeanu, R.G., *Research on mechanical and geometrical characteristics of materials used for flexible tubing production*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 724, Number 1, (2020)

- 012004, IOP Publishing doi:10.1088/1757-899X/724/1/012004, <https://iopscience.iop.org/journal/1757-899X>, 2020;
94. Crudu, I., *Fiabilitatea și calitatea sistemelor mecanice*, Editura S.C. F&F International S.R.L., Gheorgheni, 2003;
95. Tudor, A., ș. a., *Durabilitatea și fiabilitatea transmisiilor mecanice*, Editura Tehnică, București, 1988;
96. Radeș, M., *Rezistența materialelor II*, Editura Printech, București, 2007 <http://www.resist.pub.ro/wp-content/uploads/2019/01/Rades/02%20M%20Rades%20-%20Rezistenta%20materialelor%202.pdf>;
97. Roderic Stanley, *Problems Associated with Coiled Oilfield Tubing*, International Petroleum Technology Conference, December 2019, https://www.researchgate.net/publication/337926684_Problems_Associated_with_Coiled_Oilfield_Tubing;
98. Christie, R., Liu, Z., Stanley, R., *Monitoring and managing coiled tubing integrity*, May 2015, *Oilfield Review* 27, nr. 1, 2015;
99. Newman, K. R., Newburn, D. A., *Coiled-tubing-life modeling*. In: SPE annual technical conference and exhibition, Dallas, TX, 6-9 October 1991, Richardson, TX: OnePetro;
100. Liu Lei, Huang Xiaying, Han Jun, et al., *Research and field test of internal anti-corrosion process for offshore coiled tubing*, *China offshore oil and gas*, 31 (6): 132–137, 2019;
101. Zhao, W., Xiao, J., Saiood, H. A., Otaibi, A. B., Huang, J., Chang, F. F., *Chemical solution to ESP packer penetrator corrosion problem*, International Petroleum Technology Conference, <https://doi.org/10.2523/iptc-19633-abstract>, 2020;
102. Akid, R., Dmytrakh, I. M., Gonzalez-Sanchez, J., *Fatigue damage accumulation: The role of corrosion on the early stages of crack development*, *Corrosion Engineering Science and Technology*, 41(4), 328-335. <https://doi.org/10.1179/174327806X139108>, 2006;
103. Myatt, J., Lynn, S., Craig, S., Murphy, S., Correa, P., & Padron, T., *Challenging conventional fluid practices for coiled tubing drilling*, Society of Petroleum Engineers – Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, 317-330, 2015, <https://doi.org/10.2118/173661-MS>;
104. Tipton, S. M. *Coiled-tubing surface characteristics and effects on fatigue behavior*. *SPE Drill Complet* 2000; 15: 63–66.
105. Shaohu Liu, Liu Yuanliang, Zhong Hong, Zou Jiayan, Yang Dong, *Experimental study on corrosion resistance of coiled tubing welds in high temperature and pressure environment*, *Journal Plos One*, Published: January 22, 2021, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244237> ;
106. Syrotyuk, A. M., & Dmytrakh, I. M., *Methods for the evaluation of fracture and strength of pipeline steels and structures under the action of working media*. Part I. influence of the corrosion factor. *Materials Science*, 50(3), 324-339, 2014, <https://doi.org/10.1007/s11003-014-9724-5>;
107. Crabtree, A. R., Gavin, W., *CT in Sour Environment-Theory and Practice*, SPE Drilling & Completion, 20(01), 71–80, 2005;
108. Shaohu Liu, Xiao Hui, Guan Feng, et al., *Coiled tubing failure analysis and ultimate bearing capacity under multi-group load*, *Engineering Failure Analysis*, 79 (9): 803–811, 2017;
109. Sun Fuyang, *Study on corrosion and fatigue behavior of coiled tubing*, Xi'an

- University of Petroleum, 2015;
110. Xianning Jiangfang, Rongming et al., *Corrosion and protection of coiled tubing in acid environment and research progress*, Natural gas industry, 31 (04): 113–116, 2011;
 111. Van, Adrichem, W. P., Larsen, H. A., *Coiled-tubing failure statistics used to develop CT performance indicators. SPE Drill Complet* 17: 159–163, 2002;
 112. Zhu Chenglong, Zhao Guoxian, *Effect of temperature on Corrosion Behavior of QT-900 in CO₂ environment*, Corrosion and protection, 34 (03): 232–235, 2013
 113. Shaohu Liu, Guan Feng, Wu Xianjin, et al., *Theoretical and experimental research of bearing capacity and fatigue life for CT under internal pressure*. Engineering Failure Analysis, 104: 1133–1142, 2019;
 114. Sheehan, Alex., *Coiled tubing: Preventive maintenance and corrosion failure mitigation. Recommendations and treatment options to avoid premature failure*, Maintenance & Safety, July 10, 2017, <https://www.piprocessinstrumentation.com/maintenance-safety/article/15563762/coiled-tubing-preventive-maintenance-and-corrosion-failure-mitigation>;
 115. Tomas Padron, *Coiled Tubing Research and Engineering (CTRE), Coiled Tubing Bias Welds Recent Failures Trend*, ICoTA Roundtable, Calgary, Canada, October 29th, 2014, <http://www.icota-canada.com/Resources/Documents/ICoTA%202014%20Roundtable%20Presentations/Coiled-Tubing-Bias-Welds-Recent-Failures-Trend.pdf>;
 116. Shaohu Liu, Yuanliang Liu, Hong Zhong, *Corrosion Failure and Electrochemical Corrosion Behavior of Coiled Tubing*, Materials Science, Journal of Failure Analysis and Prevention, DOI:10.1007/s11668-020-01007-4, 2020, <https://www.semanticscholar.org/paper/Corrosion-Failure-and-Electrochemical-Corrosion-of-Shaohu-Yuanliang/2adf980c1f2e52942d8f7cc856758ecd37d4be84>
 117. Li, L., Shen, Z. X., & Wang, P., *Research the coiled tubing deformation under internal pressure and cyclic bending*, Applied Mechanics and Materials, vol. (421), 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.421.62>;
 118. Tipton, S. M., *Coiled-Tubing Deformation Mechanics: Diametral Growth and Elongation*, SPE Prod & Fac 13 (03): SPE-50966-PA, 194–199, august 01, 1998 <https://doi.org/10.2118/50966-PA>;
 119. Tipton, S. M., Smalley, E. and Van Arnam, D., *Influence of a Straightener on Coiled Tubing Fatigue*, Proceedings of SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, Society of Petroleum Engineers, Paper ID: SPE-154057-MS, 2012;
 120. Xiaohua Zhu, Qinglong Lei, Yu Meng, Xiaoxuan Cui, *Analysis of tensile response of flexible pipe with ovalization under hydrostatic pressure*, Applied Ocean Research, volume 108, March, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102451>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141118720310105>;
 121. Andrei, T., Stancu, St., *Statistica. Teorie și Aplicații*, Editura ALL, 1995;
 122. Gafițeanu, M., ș.a., *Organe de mașini, vol. I*, Editura Tehnică București, 1981;
 123. Ionescu, G.C., Nae, I., **Hagianu, A.**, Minescu, M., Rîpeanu, R.G., Ionescu, O.N., Isbășoiu, Gh. D., *Sistem inteligent de evaluare a duratei de viață a tubingului flexibil folosit în industria extracției petrolului și gazelor naturale*. Cerere Brevet de invenție Oficiul de stat pentru invenții și mărci, București, Nr. RO133985 A0 (51) E21B 44/00 (2006.01); E21B 47/00 (2006.01) RO-BOPI 03/2020, București, 2020;

124. *** Utilaje și instalații din dotarea departamentului Inginerie Mecanică, Facultatea Inginerie Mecanică și Electrică, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2022;
125. *** ISO 6507-2: 2018, *Materiale metalice - Test de duritate la Vickers - Partea 1: Metoda de încercare*, 2018;
126. *** SR EN 10002-1:2002, *Materiale metalice. Încercarea la tracțiune. Partea 1: Metoda de încercare la temperatura ambiantă*, 2002;
127. *** SR EN ISO 6892-1:2010 - *Materiale metalice. Încercare la tracțiune. Partea 1: Metodă de încercare la temperatura ambiantă*, 2010;
128. Zecheru, Gh., Grăghici, Gh., *Elemente de știința și ingineria materialelor*, ILEX, Editura Universității din Ploiești, 2001;
129. *** *Specificația tehnică privind produse din oțel utilizate ca armături: cerințe și criterii de performanță*, indicativ ST 009-2011, Reglementări tehnice din 10 aprilie 2012, <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/138125>;
130. *** SR EN ISO 8492:2014, *Materiale metalice. Țevi. Încercarea la aplatizare*, 2014;
131. *** https://sim.utcluj.ro/stm/download/tehnologie/LucrariLab_TM.pdf;
132. Ulmanu, V., *Material tubular petrolier*, Editura Tehnică, București, 1992;
133. *** <https://www.nov.com/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=28541>;
134. Ghiasi, H., *Evaluation of microstructural effects on mechanical properties of CT80 grade coiled tubing steel*. Scientia Iranica, 25(4), 2155-2161, 2018, <https://doi.org/10.24200/sci.2018.20677>;
135. Zhou, L., Jiang, B., Li, M., Yuan, F., Zhang, C., & Liu, Y., *Microstructure control of nonquenched and tempered CT 80 grade coiled tubing steel*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 27(3), 464-468, 2014, <https://doi.org/10.1007/s40195-014-0063-1>;
136. Dmytrakh, I. M., Smiyan, O. D., & Syrotyuk, A. M., *Experimental study of fatigue crack growth in pipeline steel under hydrogenating conditions*. 18th European Conference on Fracture: Fracture of Materials and Structures from Micro to Macro Scale, 2010;
137. Hua, Y., Barker, R., & Neville, A., *Effect of temperature on the critical water content for general and localised corrosion of X65 carbon steel in the transport of supercritical CO₂*. International Journal of Greenhouse Gas Control, (31), 48-60, 2014, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.09.026>;
138. Abdulridha, A. A., Allah, M. A. A .H., Makki S.Q. et al., *Corrosion inhibition of carbon steel in H₂SO₄ using new Azo Schiff compound: Electrochemical, gravimetric, adsorption, surface and DFT studies*, Journal of Molecular Liquids, 315, 113690, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.09.026>;
139. Yue Qian Bei, Sun Guohao, Wang Gang, Liu Jubao, Yang Ming, Zhang Qiang, *Experimental study on the influence of bending and straightening cycles for non-destructive and destructive coiled tubing*, Engineering failure analysis, Volume: 123, Article Number: 105218, DOI: 10.1016/j.engfailanal.2021.105218, Published: may, 2021;
140. Yingchun Chen, Shimin Zhang, Wenming Wang and Minghao Xiong, *Experimental study on axial load transfer behavior of a coiled tubing stuck in a marine riser*, Institution Mechanical engineers, December 18, 2014, <https://doi.org/10.1177/1475090214563858>;
141. Newman, K., McSpadden, A., *Modified CT Limits Analysis for Practical Well Intervention Design*, Paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing Conference and Exhibition, Paper Number: SPE-74828-MS, Published: April 09 2002, Houston, Texas, april, 2002, <https://doi.org/10.2118/74828-MS>;
142. Traugott D. A., Richardson, T. X., *Utilizing a wall thickness measurement device to*

- improve the accuracy of coiled tubing fatigue calculations.* In: SPE/ICoTA coiled tubing and well intervention conference and exhibition, The Woodlands, 24–25 March, 2015, OnePetro, 2015;
143. Ju Liu, Qiao Wang, Wei Zhang, Zhihong Zhou Wenzhong Hu, Yan Wang, *Fatigue Life Analysis of Coiled Tubing in Deep Well Jet Plugging Removal*, World Journal of Engineering and Technology, Vol.11 No.1, February, 2023, DOI: [10.4236/wjet.2023.111005](https://doi.org/10.4236/wjet.2023.111005);
144. Shaohu, L, Hui, X., Feng, G., et al., *Coiled tubing failure analysis and ultimate bearing capacity under multi-group load.* *Eng Fail Anal* ; 79: 803–811, 2017;
145. Chunsheng, H. E, Liu, J., Yue, Q, et al., *Prediction of the low-cycle fatigue life of the coiled tubing based on ovality and wall thickness parameter*, *Oil Drill Prod Tech*; 35: 15–18, 2013;
146. Kilambi Sreelatha, Tipton Steven M., *Numerical Evaluation of Plastic Strains in Coiled Tubing Surface Flaws for Comparison to Analytical and Emperical Models*, Conference: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, DOI:[10.2118/191583-MS](https://doi.org/10.2118/191583-MS), september, 2018;
147. Sherman, S., Majko, S. M., & Otto, J., *High strength coiled tubing – how is fatigue life affected by slip damage?* Society of Petroleum Engineers – SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition 2020. <https://doi.org/10.2118/199859-MS>;
148. Yiwei Zhang, Qiang Luo, Haibao Wang, Xiaoxiang Gong, Long-Long Guo, *Residual Life Study of Coiled Tubing for Erosion Wear*, Journal of Failure Analysis and Prevention volume 21, pages320–328, 2021, <https://link-springer-com.am.e-nformation.ro/article/10.1007/s11668-020-01065-8>;
149. Newman, K.R., Stein, D., and Ackers, M., *Rotation of Coiled Tubing*, SPE 60737, SPE/ICoTA Coiled Tubing, Roundtable held in Houston, TX, 5-6 April, 2000;
150. Joanne, Ishak., *30 defects in coiled tubing*, February 2017, DOI: 10.13140/RG.2.2.34295.62889, https://www.researchgate.net/publication/317179205_Numerical_evaluation_of_cyclic_strains_in_physically_small_defects_in_coiled_tubing;
151. Joanne Ishak., Murilo, A., Santos, A., Steven, M., Tipton., *Numerical and Experimental Analysis of Cyclic Strains in Coiled Tubing Surface Defects for Fatigue Life Assessment*, Conference: SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, DOI: [10.2118/184761-MS](https://doi.org/10.2118/184761-MS), March 2017;
152. Zisopol, D., G., Trifan, C., *Dispozitiv de încercare la oboseală a tubingului flexibil*, Departamentul Inginerie Mecanică, Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești, 2000
153. Jijia Zhong, Guanghui Zhao, Qingfeng Jiang, Litong Wang, Yi HE, Sihai HU, *Experimental and Numerical Study on LCF Crack Propagation of Coiled Tubing Steel*, MECHANIKA, Volume 28(5): 351–357, ISSN 1392–120, 2022;
154. Burgos, R, Pozo, R. F. M., Bulloch, S., *Delivering value for tracking coiled-tubing failure statistics*, In: SPE/ICoTA coiled tubing and well intervention conference and exhibition, Houston, TX, 20–21 March 2007, Richardson, TX: OnePetro;
155. Kaveh Yekta, *Application of Finite Element Method in Coiled Tubing Services*, Paper presented at the SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition, Virtual, March 2021.Paper Number: SPE-204429-MS, <https://doi.org/10.2118/204429-MS>, Published: March 15, 2021;
156. Ionuț Lambrescu, Dragoș Gabriel Zisopol, *Complex analysis of collapse strength for tubulars used in the oil and gas industry*, Journal of Petroleum Science and Engineering 221:1...13, DOI: [10.1016/j.petrol.2022.111275](https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.111275), February, 2023;
157. Ji, Ya Feng, Hong Zhang, Qing Quan Duan, and Yan Bin Cao, *Research on the*

- Analysis of Coiled Tubing Fatigue Life*, Applied Mechanics and Materials 66–68: 1173–78. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.66-68.1173>, July, 2011;
158. Newman, K. R., *Development of a new CT life tracking process*. In: SPE/ICoTA coiled tubing and well intervention conference and exhibition, The Woodlands, TX, 26–27 March 2013, Richardson, TX: OnePetro;
159. Burgos, R, Pozo, R. F. M., Bulloch, S., *Delivering value for tracking coiled-tubing failure statistics*. In: SPE/ICoTA coiled tubing and well intervention conference and exhibition, Houston, TX, 20–21 March 2007, Richardson, TX: OnePetro;
160. Shang, D.G., Wang, D.K., Li, M., et al., *Local stress–strain field intensity approach to fatigue life prediction under random cyclic loading*, International Journal of Fatigue, 2001; 23: 903–910;
161. Paul Brown, Brian Gunby, Carlos Torres, Bharath Rao, *Remote Monitoring and Modeling of Coiled Tubing Operations in Real Time*, Publisher: Society of Petroleum Engineers (SPE), Paper presented at the SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition, March 26–27, 2019, Paper Number: SPE-194277-MS, <https://doi.org/10.2118/194277-MS>;
162. Vanesa Vera, Carlos Torres, Eduardo Delgado, Carlos Pacheco, Monica Torres, Josue Higuera, *Successful Coiled Tubing Fishing Operation Uses Hybrid Cable Connected Tools to Evaluate/Validate Downhole, Data in Real-Time: A Case Study in the Eastern Foothills of Colombia*, Paper presented at the SPE/ICoTA Well Intervention Conference and Exhibition, The Woodlands, Texas, USA, March 2019, Paper Number: SPE-194260-MS, <https://doi.org/10.2118/194260-MS>;
163. J., Lee, J., Yeung, C., Williams, T. Graham-Wright, K., Elliott, *Optimization of Coiled Tubing (CT) Performance with the Use of Rapid Tapered Section*, Publisher: Society of Petroleum Engineers (SPE), Paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition, March 22–23, 2016, Paper Number: SPE-179062-MS, <https://doi.org/10.2118/179062-MS>;
164. John Yeung, Steve Opel, Ed. Smalley, *Optimizing CT Milling Efficiency with the Use of Real-Time CT Modeling Software*, Paper presented at the SPE/ICoTA Coiled Tubing & Well Intervention Conference & Exhibition, Paper Number: SPE-173668-MS <https://doi.org/10.2118/173668-MS>, The Woodlands, Texas, USA, March, 2015;
165. ASTM G5-14e1, *Standard Reference Test Method for Making Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, <https://www.astm.org.;>
166. NACE SP0775-2018-SG "Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations" NACE International, 15835 Park Ten Place, Houston, TX 77084, <https://www.nace.org/home;>
167. **Hagianu A.**, Nae I., Ionescu G.C., Rîpeanu R.G., Diniță A., Ramadan I.N., *Research and studies on flexible tubing wearing*, Proceedings on Engineering Science, 16th International Conference on Tribology, 15 – 17 May, 2019, <https://www.serbiatrib.mYg.rs/>, Vol. 1, No. 1 (2019), ISSN: 2620-2832 pp.321-329, Kragujevac, Serbia, 2019;
168. Ionescu G.C, **Hagianu A.**, Minescu M., Rîpeanu R.G., Ionescu O.N., Isbășoiu G.D., *Sistem inteligent de evaluare an duratei de viață a țevilor flexibile utilizate în industria extracției de petrol și gaze, a 24 - a Expoziție Internațională de Invenții*, INVENTICA 2020, 29 – 31 iulie 2020, pp.110, ISSN 1844-7880, Iași, 2020.