

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE**  
**UNIVERSITATEA PETROL – GAZE DIN PLOIEȘTI**  
**DOMENIUL FUNDAMENTAL: ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE MECANICĂ**

## TEZA DE DOCTORAT

**“CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURATEI DE EXPLOATARE A  
MATERIALULUI TUBULAR AL CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI  
INSTALAȚII PETROCHIMICE”**

### REZUMAT

DOCTORAND: Ing. Ibrahim Naim RAMADAN

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:  
Prof. univ. dr. ing. Gheorghe ZECHEU

PLOIEȘTI, 2016

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE**  
**UNIVERSITATEA PETROL – GAZE DIN PLOIEȘTI**  
**DOMENIUL FUNDAMENTAL: ȘTIINȚE INGINEREȘTI**  
**DOMENIUL DE DOCTORAT: INGINERIE MECANICĂ**

## TEZA DE DOCTORAT

**“ CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURATEI DE EXPLOATARE A  
MATERIALULUI TUBULAR AL CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI  
INSTALAȚII PETROCHIMICE ”**

### REZUMAT

DOCTORAND: Ing. Ibrahim Naim RAMADAN

**CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:**

Prof. univ. dr. ing. Gheorghe ZECHEU

**PLOIEȘTI, 2016**

În întreaga perioadă de desfășurare a activităților necesare realizării acestei teze de doctorat autorul a beneficiat de îndrumarea competentă și de sprijinul moral al conducătorului științific, prof. univ. dr. ing. Gheorghe ZECHERU, de ajutorul și susținerea cadrelor didactice și a personalului tehnic din Departamentul de Inginerie Mecanică al Facultății de Inginerie Mecanică și Electrică din Universitatea Petrol – Gaze din Ploiești, care l-au ajutat la realizarea programelor experimentale și a aplicațiilor care au necesitat utilizarea unor produse informatice specializate și i-au dat, cu ocazia susținerii rapoartelor de cercetare (referatelor de doctorat), multiple și consistente sugestii privind conținutul tezei și, nu în cele din urmă, de suportul moral și dragostea membrilor familiei sale. Autorul tezei de doctorat adresează tuturor acestora cele mai sincere mulțumiri și îi asigură de întreaga sa recunoștință.

De asemenea, autorul tezei precizează că **pentru efectuarea programelor experimentale a folosit multe dintre echipamentele** (Mașina universală pentru teste statice și dinamice, Walter Bai LF300 cu capacitatea de 300 kN; Mașina de debitat cu disc abraziv și control automat, METACUT A250; Mașina programabilă pentru înglobat probe metalografice, ECOPRESS; Mașina de șlefuit și lustruit probe metalografice, cu cap automat, FORCIPOL 2V; Spectrometrul de laborator Foundry Master Pro / Oxford Instruments; pendulul Charpy Walter+Bai, cu energia inițială  $W_0 = 300$  J, prevăzut cu dispozitivele auxiliare: criostat pentru răcirea epruvetelor și dispozitiv de prelucrare prin mortezare a creștăturilor în V ale epruvetelor; Microdurimetru Vickers DURASCAN 20/EMCOTEST) **existente în Laboratorul de încercări mecanice complexe și în Laboratorul de cercetare științifică pentru controlul inteligent al materialului tubular, care fac parte din**

***Centrul regional de determinare a performanțelor și monitorizare a stării tehnice a materialului tubular utilizat în industria petrolieră, realizat la Universitatea Petrol – Gaze din Ploiești prin derularea proiectului***

**POSCCE-A2-O2.2.1-2009-4/ID 860/cod SMIS - CSNR 14682/252/28.09.2010 cofinanțat prin Fondul European de Dezvoltare Regională.**

## Cuprins

	Pag. <b>teză</b>	Pag. <b>rezumat</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>5</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducere.....</b>	<b>7</b>	<b>7</b>
<b>2. Caracteristicile constructiv-funcționale ale serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice.....</b>	<b>10</b>	<b>10</b>
2.1. Caracteristicile constructive ale cuptoarelor.....	10	10
2.2. Caracteristicile funcționale și mediile de lucru ale cuptoarelor tubulare	13	10
2.3. Caracteristicile constructiv – tehnologice ale serpentinelor.....	14	11
2.3.1. Tipuri de serpentine și componentele acestora.....	14	11
2.3.2. Țevile / Tuburile serpentinelor.....	17	11
2.3.3. Returbenții.....	19	11
2.3.4. Coturile din țeavă.....	21	11
2.3.5. Alte componente ale serpentinelor.....	21	12
2.4. Materialele componentelor serpentinelor.....	23	12
2.4.1. Compoziția chimică a materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor.....	23	12
2.4.2. Microstructura materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinelor.....	25	13
2.4.3. Caracteristicile de rezistență mecanică și de plasticitate ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinelor.....	32	14
2.4.4. Caracteristicile fizico – chimice și tehnologice ale materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor.....	43	16
2.5. Concluzii.....	51	19
<b>3. Cercetări privind soluțiile tehnice de asigurare a durabilității serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice</b>	<b>54</b>	<b>21</b>
3.1. Mecanismele de degradare a tubulaturii cuptoarelor.....	54	21
3.2. Procedura de proiectare a tubulaturii cuptoarelor.....	55	21
3.3. Verificarea comportării la fluaj a tubulaturii cuptoarelor.....	66	22
3.3.1. Estimarea durabilității la fluaj cu ajutorul CDC.....	67	22
3.3.2. Estimarea durabilității la fluaj cu ajutorul SC.....	71	23
3.4. Verificarea comportării la oboseală a tubulaturii cuptoarelor.....	76	25
3.5. Verificarea comportării tubulaturii cuptoarelor la acțiunea combinată a proceselor de degradare.....	82	28
3.6. Concluzii.....	86	30
<b>4. Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin determinării periodice ale compoziției chimice și microstructurii.....</b>	<b>89</b>	<b>32</b>
4.1. Modificări ale compoziției chimice și microstructurii tubulaturii în cursul exploatării cuptoarelor.....	89	32

4.2. Principiile și criteriile evaluării stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza compoziției chimice și microstructurii.....	91	33
4.3. Metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza compoziției chimice și microstructurii.....	97	33
4.3.1. Metoda nivelurilor / gradelor (claselor) de degradare.....	97	33
4.3.2. Metoda aplicării teoriei cinetice modificate, bazată pe utilizarea parametrilor microstructurali.....	102	35
4.3.3. Metoda bazată pe utilizarea atlaselor metalografice.....	104	37
4.3.4. Metoda parametrului Z.....	108	38
4.4. Concluzii.....	111	39
<b>5. Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice...</b>	<b>113</b>	<b>41</b>
5.1. Modificările proprietăților mecanice ale tubulaturii în cursul exploatării cuptoarelor.....	113	41
5.2. Principiile și criteriile evaluării stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice.....	114	41
5.3 Metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice.....	117	41
5.3.1. Încercarea la tracțiune.....	118	42
5.3.2. Încercarea la încovoiere prin șoc.....	121	44
5.3.3. Determinarea durității materialului tubular.....	123	45
5.3.4. Încercarea la aplatisare.....	127	47
5.3.5. Încercarea la oboseală.....	136	49
5.3.6. Încercarea materialului tubular pe dispozitivul dorn – inel	138	50
5.4. Concluzii.....	144	53
<b>6. Concluzii. Contribuții originale. Direcții de continuare a cercetărilor.....</b>	<b>145</b>	<b>54</b>
6.1. Concluzii.....	145	54
6.2. Contribuții originale.....	151	60
6.3. Direcții de continuare a cercetărilor.....	154	62
<b>7. Bibliografie.....</b>	<b>155</b>	<b>64</b>
<b>8. Anexe.....</b>	<b>164</b>	<b>-</b>
Anexa 1 - Tipuri de cuptoare utilizate în rafinării și instalații petrochimice.....	164	-
Anexa 2 - Materiale de adaos – MA pentru sudarea serpentinelor cuptoarelor.....	165	-
Anexa 3 - Principalele caracteristici tehnice ale unor oțeluri folosite la fabricarea serpentinelor cuptoarelor.....	174	-
Anexa 4 - Principalele caracteristici ale ansamblului dorn – inel folosit pentru testarea inelelor prelevate din materialul tubular al cuptoarelor.....	183	-

## Abstract

The present PhD thesis, with the topic “***STUDIES ABOUT INCREASING THE SERVICE LIFE OF TUBULAR MATERIAL FROM FURNACES IN REFINERIES AND PETROCHEMICAL PLANTS***”, aimed to analyze and resolve the most important issues regarding the description of degradation processes, the highlight of its main factors, the rational selection regarding the quality of the steels used for furnace tubes, the selection of optimal exploitation regimes, the development of certain methods for monitoring the technical condition during operation and the establishment of the methods for the characterization of technical condition and estimation of remaining service life of furnace coil elements. The research results help to increase operational safety, reduce the risk of accidents and obtain significant economical benefits.

Furnaces in oil refineries and petrochemical plants are oversized complex equipments with an important functional role in oil processing and petrochemicals production. The phrase “*tubular material*” refers to both the furnace coils, made of pipes, return-bends, elbows, as well as other auxiliary components such as tubular plates, supports and suspensions.

In the **first chapter** of the thesis - ***Introduction*** – the basic concepts that describe the general framework of the thesis are defined, the proposed goals of the research and the ways of achieving it being mentioned.

The **second chapter** of the thesis, with the title ***Constructive-functional characteristics of furnace coils in refineries and petrochemical plants***, presents the research on the aspects regarding the specific environments and working conditions of the technological processes inside furnaces, the presentation of the main components of furnace coils (pipes/tubes, return-bends, elbows, tubular plates, supports and suspensions) and their manufacturing technologies with the complex characterization of the materials used for their fabrication, based on: chemical composition, mechanical strength, toughness and plasticity, microstructure, physicochemical characteristics and features of weldability and welding behavior.

In the **third chapter**, with the title ***Researches concerning the technical solutions to ensure the durability of furnaces coils in refineries and petrochemical plants*** the damage mechanisms of furnace coils during use are analyzed, being established that the main degradation process for coil components is creep, that can interact with fatigue degradation mechanisms (due to pressure cyclic fluctuations of the fluid circulated through the coils and cyclic temperature variations in furnace coils components during operation) and with the action of the working environment (with effects caused by corrosion or changes of chemical composition - structure - physical and mechanical properties). Moreover a procedure is proposed for the design of furnace coils, transposed in a software product which enables the operative specific dimensions of the tubes: nominal diameter and wall thickness and various procedures and software products for in-service behavior verification of the designed furnace coils are developed, taking into account the separate action of creep and fatigue processes, as well as their interaction; the way of usage of the procedures and software products for the design and verification of furnace coils being suggestive illustrated using case studies.

In the **fourth chapter** of the PhD thesis, with the title ***Evaluation of technical condition and remaining service life of furnaces tubes by regular determinations of chemical composition and microstructure*** the main aspects related to damage evaluation

of tubes characteristics due to previous exploitation campaigns by highlighting chemical composition and microstructural changes are presented and analyzed. Several methods are proposed in order to assess the technical condition of furnaces tubes based on measurements of chemical composition and microstructure: damage levels / grades method, the method based on modified kinetic theory, the method based on the use of metallographic atlases and Z parameter method; the methods are transposed into working procedures, with software products for operative use that are suggestively exemplified in case studies.

The **fifth chapter** of the thesis aims at the *Evaluation of technical condition and remaining service life of furnaces tubes through mechanical and technological tests* based on the main principles and criteria for assessing the technical state of tubes during furnaces exploitation. Several evaluation methods of the technical state of furnace tubes, based on determining the size features (diameter and wall thickness) of the tubes, based on defining the mechanical characteristics and based on technological tests, are proposed. The main technological tests (which are carried out on samples taken from new or used tubes) proposed, analyzed and applied using the devices designed and made by the author of the PhD thesis are: the flattening test and the expansion test.

The **sixth chapter** of the thesis contains *Conclusions. Original contributions. Directions for further research*. The proposed strategy regarding the increase of durability (service life) of furnace tubes in refineries and petrochemical plants is highlighted in the thesis: a. the design, based on the proposed procedures, considering the action of creep and thickness changes caused by damage mechanisms due to aggressive working environments; b. monitoring of the working parameters (temperature - pressure - processed fluids aggression) during furnace exploitation, estimating over time damage and scheduling maintenance work; c. periodical evaluation of tubes technical state and the correction of the features used in the software products for damage evaluation; d. establishment of future exploitation programs of furnaces coils based on ascertainments from the evaluation of technical state of furnace tubes.

The main original contributions in the thesis are related to: a. creation of a database containing the physical and mechanical characteristics of steels used for the fabrication of furnace coils; b. development of various procedures and software products for the projection and in-service behavior verification of furnace coils; c. development of various procedures and software products for evaluating the technical state of tubular material based on chemical composition and microstructure determinations and on mechanical and technological tests, made on periodic technical revisions; d. devising a coherent strategy for increasing the service life of furnace coils in refineries and petrochemical plants, aiming at the optimal design, continuous in service monitoring, periodic verification of technical state and rational planning for maintenance works.

**Keywords:** *refineries and petrochemical plants; fired heater / furnaces; tube / pipe coils; materials (steels and super alloys) for tubes / pipes; mechanisms of damage: creep, fatigue and corrosion; service and design life for tube / pipe coils; calculation of heater-tube thickness; procedure for creep assessment; methods for fatigue life estimation; assessment of technical state of tube / pipe by: chemical composition and metallographical examination, mechanical and technological tests; technical strategy for maintenance of heater / furnaces*

## 1. INTRODUCERE

Prezenta teză de doctorat, cu tema “**CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURATEI DE EXPLOATARE A MATERIALULUI TUBULAR AL CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI INSTALAȚII PETROCHIMICE**”, și-a propus să analizeze și să soluționeze o parte importantă a problemelor vizând descrierea proceselor de degradare a materialului tubular al cuptoarelor din instalațiile tehnologice de prelucrare a petrolului și produselor petroliere, evidențierea factorilor principali de influență ai proceselor de degradare, alegerea rațională a calității țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor, stabilirea regimurilor optime de exploatare a cuptoarelor, care asigură maximizarea durabilității materialului tubular și minimizarea posibilității de producere a unor accidente tehnice care impun oprirea neprogramată a cuptoarelor, dezvoltarea unor metode fundamentate științific de monitorizare a stării tehnice a serpentinelor pe parcursul funcționării cuptoarelor și stabilirea metodelor de caracterizare a stării tehnice și de estimare a duratei de viață remanente pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor cuptoarelor, pe baza unor determinări experimentale, distructive sau nedistructive, care se efectuează cu ocazia reviziilor tehnice periodice ale cuptoarelor. Atingerea acestor obiective contribuie la creșterea siguranței în funcționare a cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice, la reducerea riscului de producere a accidentelor tehnice în cursul exploatării acestora și la avantaje economice importante, deoarece componentele materialului tubular al cuptoarelor sunt realizate din materiale scumpe, tehnologiile lor de fabricare sunt complexe și costisitoare, iar implicațiile financiare ale opririi intempestive a cuptoarelor sunt foarte mari.

Așa cum este cunoscut, cuptoarele din rafinăriile de petrol și din instalațiile petrochimice sunt utilaje complexe, de mare gabarit cu un rol funcțional de importanță majoră pentru realizarea proceselor tehnologice de prelucrare a petrolului și/sau de obținere a produselor petrochimice: încălzirea materiilor prime sau a produselor intermediare în scopul aducerii lor la temperaturile care să permită facilitarea proceselor fizico – chimice care se desfășoară în celelalte echipamente (coloane, reactoare etc.) din instalațiile tehnologice pe care le deserveșc. În rafinării și instalații petrochimice se utilizează un număr important de tipuri constructiv – funcționale de cuptoare, dar în prezenta teză de doctorat au fost considerate, în scopul găsirii soluțiilor tehnice care să permită atingerea obiectivelor expuse mai înainte, numai cuptoarele din instalațiile uzinelor petrochimice care mai funcționează în prezent în România (instalațiile de distilare atmosferică sau în vid, instalațiile de cracare termică sau catalitică, instalațiile de cocsare etc.). Sintagma „material tubular”, utilizată în titlul tezei de doctorat și în capitolele acesteia, se referă atât la serpentinele cuptoarelor, alcătuite din țevi, curbe, coturi, returbenți etc., cât și la componentele auxiliare ale acestor serpentine, cum sunt plăcile tubulare, suporturile și suspensiile, folosite pentru susținerea serpentinelor și care, având regimuri termice de lucru asemănătoare acestora, trebuie realizate din materiale asemănătoare celor din care sunt confecționate elementele serpentinelor.

Condițiile tehnice de utilizare a materialului tubular din cuptoarele rafinăriilor de petrol și instalațiilor petrochimice se pot caracteriza sintetic astfel:

a. temperaturi de lucru ridicate, situate în domeniul 400...700 °C în cazul cuptoarelor din rafinării și care pot ajunge în domeniul 700...900 °C în cazul cuptoarelor din unele instalații petrochimice (cum este instalația de piroliză);



b. mediu de lucru activ, care interacționează intens (datorită naturii lor chimice și temperaturilor de lucru ridicate) cu componentele materialului tubular și produce modificarea (superficială sau chiar în volum, în cazul duratelor de funcționare foarte îndelungate) a compoziției chimice și structurii acestor componente: a.1. carburarea la interior și diminuarea treptată a gradului de aliere a componentelor serpentinei; a.2. oxidarea / arderea la exterior a componentelor care vin în contact cu atmosfera cuptoarelor;

c. încărcări / sarcini mecanice importante (presiunea mediului de lucru vehiculat prin serpentinele cuptoarelor, încărcările masice, solicitările de natură termică etc.), al căror efect de generare a tensiunilor mecanice se intensifică datorită temperaturilor de lucru ridicate și datorită variațiilor repetate ale parametrilor principali ai regimului de funcționare a cuptoarelor: temperatura și presiunea mediului de lucru vehiculat prin serpentinele cuptoarelor.

Complexitatea și severitatea condițiilor tehnice de utilizare a materialului tubular al cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice determină complexitatea și severitatea proceselor prin care se pot degrada / deteriora componentele acestuia în cursul exploatării: a. modificarea caracteristicilor de rezistență mecanică și de tenacitate ale componentelor (datorită modificărilor în timp ale compoziției chimice și structurii); b. fluajul (datorită temperaturilor de lucru ridicate și duratelor de exploatare îndelungate); c. oboseala (datorită solicitărilor mecanice și termice cu caracter variabil). În aceste condiții, modelarea proceselor de degradare, combinarea efectelor acestora, evaluarea cantitativă pertinentă și cu un nivel de încredere acceptabil a gradului de degradare în timp a materialului tubular al cuptoarelor și estimarea rezistenței mecanice remanente și duratei de viață reziduale a acestuia este foarte dificilă. La dificultățile menționate, privind complexitatea științifică a temei s-au adăugat și cele legate de realizarea cercetărilor experimentale propuse a fi efectuate în cadrul programului de pregătire și elaborare a tezei de doctorat; cu ocazia activităților de documentare și colaborare la rafinăriile de petrol din zona industrială a municipiului Ploiești (Petrotel LUKOIL și Petrobrazi – OMV PETROM – v. câteva secvențe sugestive în fig.1.1), care au urmărit și achiziționarea de probe de material tubular (nou și utilizat) pentru efectuarea analizelor, examinărilor și încercărilor prevăzute în programul de cercetare experimentală, au fost făcute următoarele constatări:



**Fig.1.1.** Colectivul de cercetare de la Universitatea Petrol Gaze din Ploiești, împreună cu specialiștii de la Petrobrazi – OMV PETROM, la verificarea stării tehnice a unui cuptor aflat în revizie

a. istoricul regimurilor de lucru ale serpentinelor cuptoarelor, caracterizat prin valorile înregistrate continuu sau la anumite intervale de timp ale temperaturilor și presiunilor de lucru (în zonele cu regim termic distinct ale serpentinelor) și prin duratele de lucru ale fiecărei componente de material tubular, nu este disponibil.

b. nu există un sistem de monitorizare continuă a securității tehnice a serpentinelor prin corelarea regimurilor de lucru (temperaturi și presiuni), cu duratele de lucru și cu mărimea degradării cumulate a componentelor serpentinelor, care să furnizeze informațiile necesare estimării intervalelor de timp dintre lucrările de mentenanță (revizii tehnice, reparații curente etc.).

c. cu ocazia reviziilor tehnice se efectuează verificarea stării tehnice a materialului tubular din cuptoare prin examinarea vizuală a tuturor componentelor acestuia și prin determinarea grosimilor de perete ale țevilor, curbilor și coturilor serpentinelor; componentele sau părțile componentelor care prezintă deteriorări accentuate (grosimi de perete diminuate semnificativ, ovalizări sau încovoieri, bombaje, fisuri etc.) sunt înlocuite, dar nu este uzuală expertizarea tehnică a componentelor care au fost înlocuite pentru a se determina nivelul efectiv al degradărilor și a se estima cauzele care le-au determinat.

Pentru realizarea programelor de cercetări experimentale care au condus la rezultatele prezentate în cadrul tezei de doctorat s-au utilizat echipamentele existente în laboratoarele aparținând *Catedrei de Inginerie Mecanică și Centrului regional de determinare a performanțelor și monitorizare a stării tehnice a materialului tubular utilizat în industria petrolieră*, realizat la Universitatea Petrol – Gaze din Ploiești prin derularea proiectului POSCCE – A2 – O2.2.1 – 2009 – 4, cofinanțat prin Fondul European de Dezvoltare Regională, care au permis efectuarea următoarelor tipuri de analize, examinări și încercări, pe eșantioane, probe sau epruvete prelevate din componente (noi sau utilizate) de material tubular: determinarea compoziției chimice; examinarea structurii prin microscopie optică și electronică; determinarea durtății; încercarea la tracțiune la temperatura ambiantă și ridicată, (până la 650 °C); încercări de mecanica ruperii (în principal pentru determinarea caracteristicilor de amorsare a fisurilor și vitezelor de propagare sub acțiunea solicitărilor variabile); încercări la încovoiere rotativă pentru determinarea curbilor de durabilitate și/sau rezistențelor la oboseală la temperatura ambiantă și ridicată (până la 650 °C); încercări tehnologice, de tipul încercărilor de aplatizare sau de expandare.

Desfășurate în contextul prezentat, cercetările realizate în vederea elaborării tezei de doctorat au condus la atingerea obiectivelor propuse și la dezvoltarea unor proceduri originale, aplicabile în cadrul programelor de mentenanță ale instalațiilor tehnologice din rafinăriile de petrol, vizând: a. monitorizarea continuă a stării tehnice a materialului tubular al cuptoarelor și stabilirea fundamentată a intervalelor de timp dintre lucrările de mentenanță (revizii tehnice, reparații curente și reparații capitale); b. evaluarea stării tehnice și estimarea cu un nivel ridicat de încredere a duratei de viață reziduală a componentelor materialului tubular; c. stabilirea regimurilor de exploatare recomandate pentru exploatarea în siguranță, fără riscul apariției unor cedări intempestive a materialului tubular după fiecare lucrare de mentenanță.

## 2. CARACTERISTICILE CONSTRUCTIV-FUNCȚIONALE ALE SERPENTINELOR CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI INSTALAȚII PETROCHIMICE

### 2.1. Caracteristicile constructive ale cuptoarelor

Prin *cuptor* se înțelege, în tehnică sau în industrie, instalația folosită pentru încălzirea sau tratarea termică a substanțelor (petrol brut, produse petroliere, substanțe chimice, etc.) și materialelor (metale, sticlă, ceramică, etc.) în vederea modificării caracteristicilor lor fizico-chimice sau fizico-mecanice.

*Cuptoarele tubulare* (v. fig. 2.1. și Anexa 1) sunt acele cuptoare al căror *spațiu de lucru* este alcătuit din una, două sau mai multe camere, echipate cu *serpentine* (sau *fascicule cu elemente tubulare*), prin interiorul cărora sunt vehiculate medii tehnologice fluide, la care încălzirea se realizează în mod indirect [ 97, 104, 184].

Schema funcțională a cuptoarelor tubulare este dată în figura 2.2, părțile componente principale ale unui astfel de cuptor sunt redată în figura 2.3, iar principalele zone funcționale și elementele structurale ale celor mai utilizate tipuri de cuptoare tubulare sunt prezentate în figurile 2.4 și 2.5.

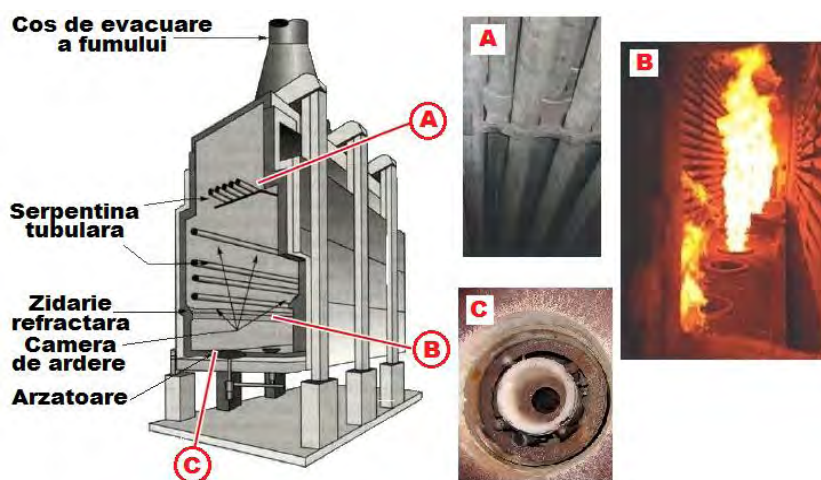


Fig. 2.3. Principalele elemente componente ale unui cuptor tubular [104]

### 2.2. Caracteristicile funcționale și mediile de lucru ale cuptoarelor tubulare

Parametrii și mediile de lucru pentru principalele procese tehnologice (din rafinăriile de petrol și combinatele petrochimice) în care sunt utilizate cuptoare tubulare se prezintă astfel [126, 170, 171]:

**A. Distilarea țițeiului și a păcurii** implică următoarele procese tehnologice:

a) Desalinarea; b) Distilarea atmosferică; c) Distilarea în vid.

**B. Procesele de descompunere termică**, dintre care se evidențiază:

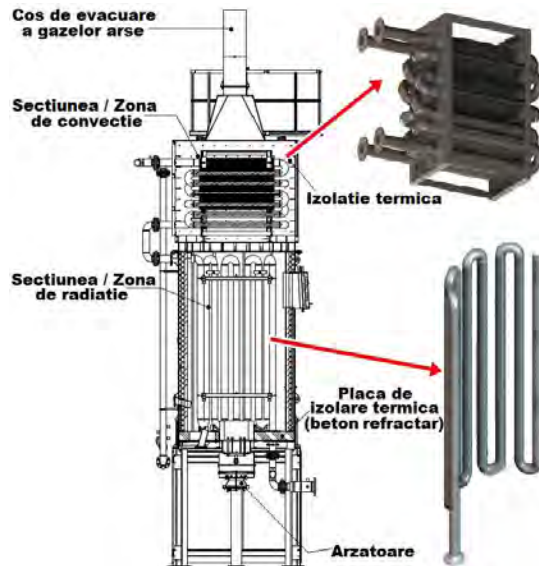
a) Cracarea; b) Reducerea de vâscozitate; c) Cocsarea.

**C. Piroliza.**

## 2.3. Caracteristicile constructiv – tehnologice ale serpentinei

### 2.3.1. Tipuri de serpentine și componentele acestora

**Serpentina tubulară**, este un ansamblu de elemente și dispozitive: țevi sau tuburi, returbenți sau cutii de întoarcere, coturi sau colaci de întoarcere, elemente fasonate de îmbinare și/sau racordare, plăci tubulare, suporturi, suspensii.



**Fig. 2.7.** Serpentinele din zonele de convecție și radiație ale cuptoarelor tubulare

### 2.3.2. Țevile / Tuburile serpentinei

Țevile / Tuburile sunt elementele componente principale ale serpentinei, prin interiorul cărora se vehiculează fluidele (în principal amestecuri de hidrocarburi) care trebuie încălzite în vederea prelucrării în instalația tehnologică din care face parte cuptorul; acestea reprezintă componenta cea mai importantă a materialului tubular utilizat în cuptoarele instalațiilor tehnologice din rafinăriile de petrol și combinatele petrochimice, fiind obiectul principal al cercetărilor din prezenta teză de doctorat.

Tipodimensiunile țevilor / tuburilor recomandate a fi utilizate la confecționarea serpentinei cuptoarelor sunt precizate în tabelele 2.1 și 2.2, în conformitate cu prevederile standardului [167].

### 2.3.3. Returbenții

Returbenții sunt dispozitive de întoarcere a țevilor tubulaturii serpentinei, de obicei orizontale, ale cuptoarelor, care asigură o îmbinare semidemontabilă, etanșă și durabilă la unghiuri de 180° sau 90°.

### 2.3.4. Coturile din țevă

Coturile (de întoarcere) sunt, ca și returbenții, dispozitive / componente care asigură schimbarea direcției de curgere în țevile serpentinei cuptoarelor; coturile, cu unghiul de 180° sau 90°, se assemblează cu țevile serpentinei prin îmbinări nedemontabile, în mod obișnuit, prin îmbinări sudate cap la cap [97].

### 2.3.5. Alte componente ale serpentinelor

Pe lângă componentele de bază (țevile / tuburile, returbenții și coturile), pentru realizarea serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice se mai folosesc: plăci tubulare, suporturi și elemente de suspendare.

## 2.4. Materialele componentelor serpentinelor

### 2.4.1. **Compoziția chimică** a materialelor **pentru țevile și** celelalte componente ale serpentinelor

Țevile / Tuburile și celelalte componente (returbenți, coturi, suporturi etc.) din care sunt realizate serpentinele cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice sunt supuse unor **condiții de utilizare severe**: a. **temperatură ridicată**; b. **încărcări mecanice multiple**; c. **mediu de lucru activ**.

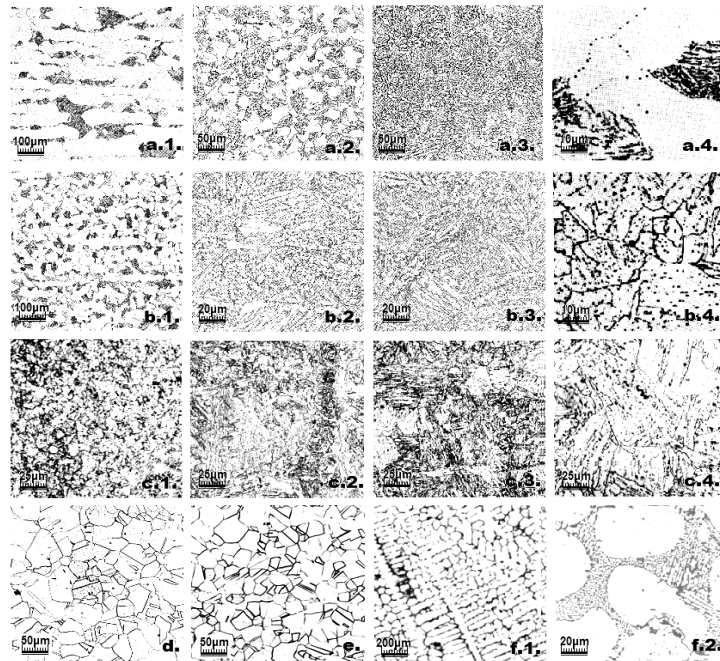
**Tabelul 2.4.** Principalele tipuri de materiale utilizate pentru fabricarea țevile și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor

Tipul materialului	Simbolizarea mărcilor conform:		Grupa de material <sup>a)</sup>	Werkstoffnr.
	EN 10216-2,5	Grade – ASTM		
Oțel C–Mn	P195GH, P235GH, P265GH	A–A 106	1.1	1.0348, 1.0345, 1.0425
Oțel ½Mo	16Mo3	T1,T1a,T1b–A 209 P1–A 335	1.2	1.5415
Oțel ¼Cr–½Mo	10CrMo5–5	T11–A 213 P11–A 335	5.1	1.7338
Oțel ¾Cr–1Mo	10CrMo9–10	T22–A 213 P22–A 335	5.2	1.7380
Oțel 5Cr–½Mo	X11CrMo5	T5,T5b,T5c–A 213 P5,P5b,P5c–A 335	5.3	1.7362
Oțel 9Cr–1Mo	X11CrMo9–1	T9–A 213 P9–A 335	5.4	1.7386
Oțel 9Cr–1Mo–V	X10CrMoVNB9–1	T91–A 213 P91–A 335	6.4	1.4903
Oțel 12Cr–1Mo–V(W)	X20CrMoV12-1	409,410–A 268	7.1	1.4922
Oțel 18Cr–8Ni	X6CrNi18–10	304,304H–A 312	8.1	1.4301, 1.4948
Oțel 16Cr–12Ni–2Mo	X6CrNiMo17–13–2	316,316H–A 312	8.1	1.4401, 1.4919
Oțel 18Cr–10Ni–Ti	X7CrNiTi18–10	321,321H–A 312	8.1	1.4541, 1.4878
Oțel 18Cr–10Ni–Nb	X7CrNiNb18–10	347,347H–A 312	8.1	1.4550, 1.4961
Oțel turnat centrifugal 25Cr–20Ni	GX40CrNi25–20 <sup>b)</sup>	HK–40–A 351	8.2	1.4848
Aliaj Ni–Fe–Cr	X8NiCrAlTi32–21 <sup>c)</sup>	8800,8810, 8811–B407	8.2	1.4876,1.4958, 1.4959

a) în conformitate cu CR ISO 15608; b) EN 10295 – Heat resistant steel castings; c) alte denumiri: Incolloy 800, 800H, 800HP sau Nicrofer 3220H, 3220HP

### 2.4.2. Microstructura materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinelor

Gama de materiale destinate fabricării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice s-a dezvoltat și se dezvoltă continuu, prin modificarea și ajustarea rețetelor de aliere ale materialelor prezentate în tabelele 2.4...2.7.



**Fig. 2.14.** Structura metalografică (la temperatura ambiantă), în stările uzuale, a țevilor și componentelor serpentinelor fabricate din diverse materiale [56, 99, 115, 130]:  
 a) Oțel  $1\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$  : a.1. A ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 10$  min, cuptor la  $500^\circ\text{C} \rightarrow$  aer) – ferită și perlită / 146HV; a.2. N ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 10$  min; aer) – ferită și bainită / 237HV; a.3. N ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 10$  min; aer venilat) – ferită și bainită / 265HV; a.4. N ( $t_i = 930^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 10$  min; aer) + T ( $t_i = 700^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 1$  h; aer) – ferită, bainită și particule de carburi; b) Oțel  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ : b.1. A ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 10$  min, cuptor la  $500^\circ\text{C} \rightarrow$  aer) – ferită și perlită / 160HV; b.2. N ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 10$  min, aer) – bainită și o cantitate mica de ferită proeutectoidă/ 256HV; b.3. N ( $t_i = 920^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 10$  min, aer) – bainită și puțină martensită (fără ferită proeutectoidă) / 340HV; b.4. N ( $t_i = 930^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 10$  min, aer) + T ( $t_i = 750^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 2$  h, aer) – ferită and particule de carburi globulare / 175HV; c) Oțel  $9\text{Cr}-1\text{Mo}-\text{V}$ : c.1. N ( $t_i = 1040^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 2$  h; aer) + T ( $t_i = 690^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 2$  h aer) – martensită de revenire; c.2. N ( $t_i = 1040^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 2$  h; aer) + T ( $t_i = 745^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 8$  h, aer) – martensită de revenire; c.3. N ( $t_i = 1040^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 4$  h; aer) + T ( $t_i = 725^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 2$  h, aer) – martensită de revenire; c.4. N ( $t_i = 1040^\circ\text{C}$ ;  $\tau_m = 8$  h; aer) + T ( $t_i = 790^\circ\text{C}$ ,  $\tau_m = 20$ h, aer) – grăunți de ferită și particule de carburi globulare; d) Oțel  $18\text{Cr}-8\text{Ni}$  – austenită; e) Oțel  $16\text{Cr}-12\text{Ni}-2\text{Mo}$  – austenită; f) Oțel turnat centrifugal  $25\text{Cr}-20\text{Ni}$ : f.1. structura de turnare – structură dendritică cu carburi într-o matrice austenitică; f.2. structura de turnare – matrice austenitică cu eutectic de carburi interdendritice

Pentru aplicațiile în care componentele serpentinelor sunt supuse la acțiunea unor fluide cu acțiune corozivă, se recomandă utilizarea oțelurilor în una din stările A, I, N sau NT, cu structură de echilibru ferito – perlitică, deoarece dacă se utilizează în starea QT (cu structură de sorbită de revenire, alcătuită din carburi globulare fine, uniform distribuite într-o masă de ferită) și sunt menținute timp îndelungat la temperatură ridicată, suferă fenomene de sferoidizare (coalescență) a carburilor, însoțite de creșteri de volum, generatoare de tensiuni reziduale, care determină creșterea tendinței de fisurare și micșorarea rezistenței la coroziune [8, 31, 39, 64, 68, 73, 169].

Microstructurile corespunzătoare stărilor metalurgice care se obțin în cursul și/sau la sfârșitul fabricării țevilor și celorlalte componente ale serpentinilor cuptoarelor din materialele anterior precizate sunt prezentate în figura 2.14 [56, 99, 115, 130]. Pentru țevile și componentele din oțeluri C–Mn și Cr–Mo, care au transformări de fază în stare solidă, structurile care definesc aceste stări, obținute prin aplicarea unor tratamente termice de tip A; I, N, N/Q + T, se pot deduce analizând diagramele de transformare la răcire continuă (continuous cooling transformations diagram) – CCTD, de tipul celor prezentate pentru exemplificare în figura 2.15 [92, 56, 115].

### 2.4.3. Caracteristicile de rezistență mecanică și de plasticitate ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinilor

Materialele utilizate pentru fabricarea țevilor și celorlalte componente ale serpentinilor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice trebuie să aibă garantate atât caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate și tenacitate) la temperatura ambiantă, cât și caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate, tenacitate, comportare la fluaj, comportare la oboseală) în domeniul temperaturilor (ridicate) de exploatare a serpentinilor.

Caracteristicile mecanice la tracțiune (limita de curgere aparentă  $R_e$  sau convențională  $R_{p0,2}$ ; rezistența la tracțiune / rupere  $R_m$ ; alungirea procentuală după rupere  $A$ ) și caracteristica de tenacitate (energia de rupere  $KV$  la încercarea la încovoire prin șoc), la temperatura ambiantă  $t_a$ , pentru principalele oțeluri destinate fabricării țevilor și celorlalte componente ale serpentinilor cuptoarelor (v. tabelul 2.4), sunt prezentate în tabelul 2.8.

Datele privind caracteristicile anterior nominalizate, existente în documentele normative actuale [156, 167] și în literatura de specialitate [102, 159, 174, 198], au fost prelucrate de autorul prezentei lucrări în sensul exprimării lor într-o formă analitică generală, care să poată fi preluată și utilizată cu ușurință în cadrul produselor informatice dezvoltate pentru proiectarea, construirea și monitorizarea în exploatare a serpentinilor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice.

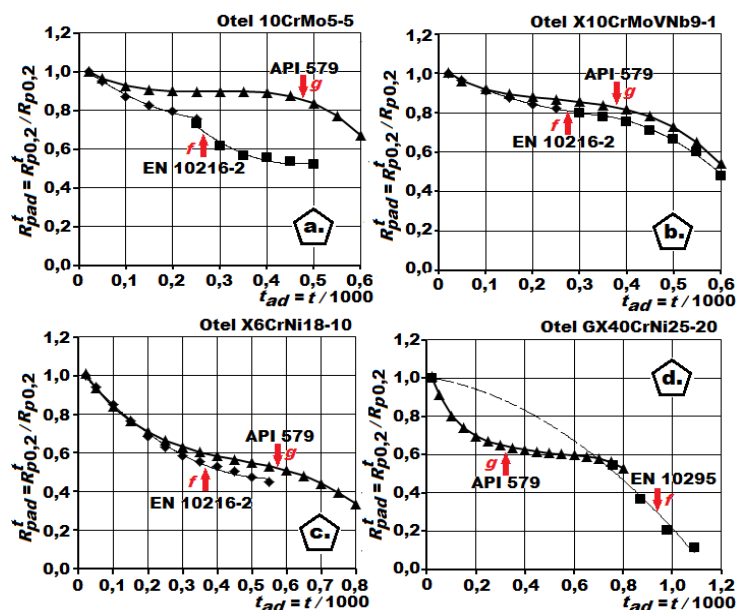


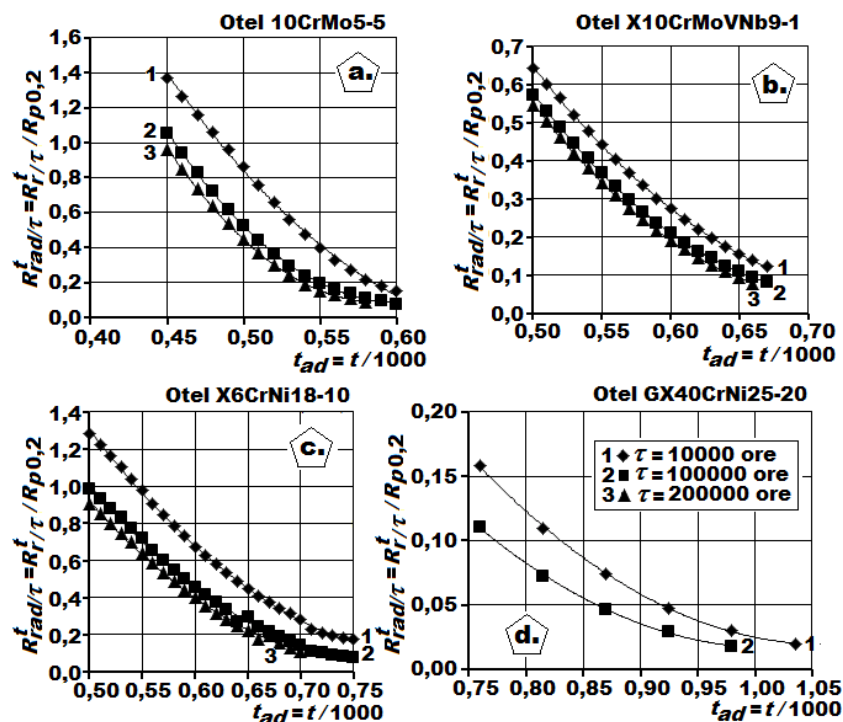
Fig. 2.19. Comparație între configurațiile funcțiilor  $R_{pad}^t = f(t_{ad})$  și  $R_{pad}^t = g(t_{ad})$  pentru câteva oțeluri reprezentative folosite la realizarea materialului tubular al serpentinilor cuptoarelor

**Tabelul 2.10.** Valorile constantelor  $B_0, B_1 \dots B_5$ , necesare pentru determinarea  $R'_{p0,2}$ , la diferite temperaturi, a oțelurilor folosite la fabricarea materialului tubular al serpentinilor cuptoarelor

Grupa de materiale	Domeniul pentru $t$ , °C	$B_0$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$
M1	$[t_a; 600]$	0,037934	-1,8639	6,6947	-18,2518	23,1521	-12,2947
M2	$[t_a; 600]$	0,033804	-1,7355	8,3264	-21,1472	32,9875	-26,9330
M3	$[t_a; 600]$	0,043811	-2,1715	12,1748	-38,9316	64,3532	-47,1715
M4	$[t_a; 800]$	0,064056	-2,7937	4,3540	-3,7166	3,9209	-4,3184
M5	$[t_a; 800]$	0,036295	-1,6264	0,6777	0,8409	3,5187	-5,6693
M6	$[t_a; 800]$	0,027488	-1,2554	1,1958	-4,8052	11,1949	-9,5132
M7	$[t_a; 800]$	0,088596	-4,3564	15,8095	-33,0172	36,5797	-16,5924

**Tabelul 2.11.** Valorile constantelor  $C_0, C_1 \dots C_5$ , necesare pentru determinarea  $R'_m$ , la diferite temperaturi, a oțelurilor folosite la fabricarea materialului tubular al serpentinilor cuptoarelor

Grupa de materiale	Domeniul pentru $t$ , °C	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$
M1	$[t_a; 600]$	0,035584	-0,8875	-4,5211	46,7964	-107,882	63,8793
M2	$[t_a; 600]$	0,056340	-2,5467	4,8303	14,0155	-38,5657	14,7717
M3	$[t_a; 600]$	0,033595	-1,5954	4,1903	3,2131	-21,4742	9,8535
M4	$[t_a; 800]$	0,069778	-3,3325	12,0868	-22,8840	25,0349	-14,8927
M5	$[t_a; 800]$	0,070782	-3,3189	14,4955	-27,7818	24,2415	-10,6233
M6	$[t_a; 800]$	0,067045	-3,6242	28,9322	-108,234	189,076	-124,630
M7	$[t_a; 800]$	0,082539	-4,2380	17,1532	-28,5726	18,7825	-5,1180

**Fig. 2.20.** Configurațiile funcțiilor  $R'_{rad/\tau} = q(t_{ad})$  pentru câteva oțeluri reprezentative folosite la realizarea materialului tubular al serpentinilor cuptoarelor



**Tabelul 2.12.** Valorile constantelor  $D_0$ ,  $D_1$  și  $D_2$ , necesare pentru determinarea  $R'_{p1}$ , la diferite temperaturi, a oțelurilor austenitice folosite la componentele serpentinelor cuptoarelor

Marca oțelului	Domeniul pentru $t$ , °C	$R_{p1}$ , MPa	$D_0$	$D_1$	$D_2$	Coefficientul corelației (2.7) $r^2$
X6CrNi18-10	$[t_a; 550]$	225	1,0073	-1,8241	1,7030	0,9911
X6CrNiMo17-13-2	$[t_a; 550]$	240	1,0288	-1,6874	1,5335	0,9963
X7CrNiTi18-10	$[t_a; 550]$	220	1,0075	-1,4042	1,4330	0,9890
X7CrNiNb18-10	$[t_a; 500]$	240	1,0163	-1,6686	1,9044	0,9929
X8NiCrAlTi32-21	$[t_a; 550]$	200	1,0077	-2,0441	2,0262	0,9914

#### 2.4.4. Caracteristicile fizico – chimice și tehnologice ale materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor

Proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice implică cunoașterea următoarelor **caracteristici fizice** ale materialelor din care sunt confecționate, pentru domeniul de temperaturi în care acestea se prelucrează sau se utilizează [167]:

➤ modulele de elasticitate longitudinală (Young)  $E$  (la  $t_a$ ) și  $E'$  (la  $t > t_a$ ) și transversală  $G$  (la  $t_a$ ) și  $G'$  (la  $t > t_a$ ) și coeficientul contracției transversale (Poisson)  $\mu$  (la  $t_a$ ) și  $\mu'$  (la  $t > t_a$ ), cu precizarea că între aceste caracteristici există relațiile [ ]:

$$E = 2G(1+\mu) ; E' = 2G'(1+\mu') ; \quad (2.16)$$

- densitatea  $\rho$  (la  $t_a$ ) și  $\rho'$  (la  $t > t_a$ );
- coeficientul de dilatare termică  $\alpha$ , (instantaneu) la  $t_a$  și  $\alpha'$ , (mediu) în diferite intervale de temperatură ( $t_a; t'$ );
- conductivitatea termică  $\lambda$  (la  $t_a$ ) și  $\lambda'$  (la  $t > t_a$ );
- căldura specifică  $c_p$  (la  $t_a$ ) și  $c_p'$  (la  $t > t_a$ );
- difuzivitatea termică  $a_{te}$  (la  $t_a$ ) și  $a_{te}'$  (la  $t > t_a$ ), cu formula de definire:  $a_{te} = \lambda/(\rho c_p)$ .

**Tabelul 2.16.** Valorile constantelor  $A_{E0}$ ,  $A_{E1}$  și  $A_{E2}$ , necesare pentru determinarea  $E'$ , la diferite temperaturi, al oțelurilor folosite la materialul tubular al serpentinelor cuptoarelor

Grupa de materiale <sup>a)</sup>	Domeniul pentru $t$ , °C	$E$ , GPa	$A_{E0}$	$A_{E1}$	$A_{E2}$	Coefficientul corelației (2.17) $r^2$
G1	$(t_a; 550]$	202	0,9866	0,0998	-1,1648	0,9941
G2	$(t_a; 600]$	200	0,9821	0,1544	-1,2806	0,9950
G3	$(t_a; 700]$	204	0,9992	-0,1614	-0,3745	0,9980
G4	$(t_a; 700]$	210	0,9977	-0,1488	-0,3869	0,9973
G5	$(t_a; 700]$	213	0,9978	-0,1809	-0,2929	0,9966
G6	$(t_a; 600]$	201	0,9814	0,0425	-0,9352	0,9870
G7	$(t_a; 700]$	195	0,9943	-0,1923	-0,3307	0,9916
G8	$(t_a; 750]$	196	1,0022	-0,2148	-0,1117	0,9992

a) Grupele de materiale au următoarea alcătuire: G1 conține oțelurile C-Mn; G2 conține oțelurile 1/2Mo; G3 conține oțelurile 1/4Cr-1/2Mo; G4 conține oțelurile 2/4Cr-1Mo; G5 conține oțelurile 5Cr-1/2Mo; 9Cr-1Mo; G6 conține oțelurile 12Cr-1Mo-V(W); G7 conține oțelurile 18Cr-8Ni; 16Cr-12Ni-2Mo; 18Cr-10Ni-Ti; 18Cr-10Ni-Nb; G8 conține aliajele Ni-Fe-Cr

Proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a serpentinei cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice implică, de asemenea, cunoașterea unor **proprietăți chimice** ale materialelor din care sunt confecționate, pentru domeniul de temperaturi în care acestea se utilizează, privind în special rezistența acestora la acțiunea mediilor cu care vin în contact: atmosferele din cuptoare și fluidele tehnologice vehiculate prin serpentine. Caracteristicile principale cu care se operează pentru alegerea adecvată a materialelor țevilor și celorlalte componente ale serpentinei cuptoarelor sunt vitezele de coroziune  $v_{co}$ , exprimate prin micșorarea anuală a grosimii (mm/an) sau prin pierderile masice anuale pe suprafața unitară de contact dintre mediul coroziv și serpentine (mg/(cm<sup>2</sup>·an)) sau vitezele de carburare (superficială și, uneori, chiar în volum) a serpentinei. Diagramele prezentate în figurile 2.22...2.25 ilustrează sugestiv modalitățile în care valorile acestor caracteristici pot să constituie criterii importante pentru alegerea materialelor țevilor și celorlalte componente ale serpentinei [58, 149, 174].

**Tabelul 2.17.** Valorile constantelor  $A_{\alpha 0}$ ,  $A_{\alpha 1}$  și  $A_{\alpha 2}$ , necesare pentru determinarea  $\alpha'$ , la diferite temperaturi, al oțelurilor folosite la materialul tubular al serpentinei cuptoarelor

Grupa de materiale <sup>a)</sup>	Domeniul pentru $t$ , °C	$\alpha$ , (mm/mm)/°C	$A_{\alpha 0}$	$A_{\alpha 1}$	$A_{\alpha 2}$	Coefficientul corelației (2.18) $r^2$
G1	( $t_a$ ;825]	$11,5 \cdot 10^{-6}$	0,9891	0,6416	-0,2502	0,9990
G2	( $t_a$ ;825]	$11,5 \cdot 10^{-6}$	1,0156	0,3724	-0,1427	0,9883
G3	( $t_a$ ;825]	$10,5 \cdot 10^{-6}$	1,0016	0,3504	0,0020	0,9918
G4	( $t_a$ ;825]	$10,6 \cdot 10^{-6}$	1,0135	0,3590	-0,1793	0,9863
G5	( $t_a$ ;825]	$15,3 \cdot 10^{-6}$	1,0018	0,5787	-0,3135	0,9927
G6	( $t_a$ ;825]	$14,7 \cdot 10^{-6}$	1,0090	0,3913	-0,1305	0,9916

a) Grupele de materiale au următoarea alcătuire: G1 conține oțelurile C–Mn; ½Mo; ¼Cr–½Mo; 2¼Cr–1Mo; G2 conține oțelurile 5Cr–½Mo; G3 conține oțelurile ¼Cr–½Mo; G4 conține oțelurile 9Cr–1Mo; G5 conține oțelurile 18Cr–8Ni; 16Cr–12Ni–2Mo; 18Cr–10Ni–Ti; 18Cr–10Ni–Nb; G6 conține aliajele Ni–Fe–Cr

b)

**Tabelul 2.18.** Valorile constantelor  $A_{\lambda 0}$ ,  $A_{\lambda 1}$  și  $A_{\lambda 2}$ , necesare pentru determinarea  $\lambda'$ , la diferite temperaturi, al oțelurilor folosite la materialul tubular al serpentinei cuptoarelor

Grupa de materiale <sup>a)</sup>	Domeniul pentru $t$ , °C	$\lambda$ , W/(m·°C)	$A_{\lambda 0}$	$A_{\lambda 1}$	$A_{\lambda 2}$	Coefficientul corelației (2.19) $r^2$
G1	( $t_a$ ;700]	47,3	1,0257	-0,1635	-0,5804	0,9974
G2	( $t_a$ ;700]	41,0	1,0025	-0,0533	-0,4890	0,9960
G3	( $t_a$ ;700]	36,3	1,0038	-0,2075	-0,6782	0,9894
G4	( $t_a$ ;700]	27,4	1,0056	0,9078	-1,2465	0,9614
G5	( $t_a$ ;700]	22,3	0,9922	1,1301	-1,1931	0,9905
G6	( $t_a$ ;700]	24,6	1,0045	0,0574	0	0,9497
G7	( $t_a$ ;700]	14,8	1,0005	1,0004	0	0,9983
G8	( $t_a$ ;700]	14,1	0,9890	1,0202	0	0,9960
G9	( $t_a$ ;700]	11,5	0,9884	1,4188	0	0,9994

a) Grupele de materiale au următoarea alcătuire: G1 conține oțelurile C–Mn; ½Mo; ¼Cr–½Mo; G2 conține oțelurile ½Mo; ¼Cr–½Mo; G3 conține oțelurile 2¼Cr–1Mo; G4 conține oțelurile 5Cr–½Mo; G5 conține oțelurile 9Cr–1Mo; G6 conține oțelurile 12Cr–1Mo–V(W); G7 conține oțelurile 18Cr–8Ni; G8 conține oțelurile 16Cr–12Ni–2Mo; 18Cr–10Ni–Ti; 18Cr–10Ni–Nb; G9 conține aliajele Ni–Fe–Cr

**Tabelul 2.19.** Valorile constantelor  $A_{a0}$ ,  $A_{a1}$  și  $A_{a2}$ , necesare pentru determinarea  $\alpha'_{te}$ , la diferite temperaturi, a oțelurilor folosite la materialul tubular al serpentinei cuptoarelor

Grupa de materiale – v. tab. 2.18	Domeniul pentru $t$ , °C	$\alpha_{te}$ , W/(m·°C)	$A_{a0}$	$A_{a1}$	$A_{a2}$	Coefficientul corelației (2.19) $r^2$
G1	$(t_a; 700]$	$13,66 \cdot 10^{-6}$	1,0234	-1,1210	0,2945	0,9989
G2	$(t_a; 700]$	$11,87 \cdot 10^{-6}$	1,0041	-0,8481	-0,0545	0,9992
G3	$(t_a; 700]$	$10,53 \cdot 10^{-6}$	0,9957	-0,4811	-0,5107	0,9994
G4	$(t_a; 700]$	$8,02 \cdot 10^{-6}$	1,0193	-0,0551	-0,9990	0,9976
G5	$(t_a; 700]$	$6,61 \cdot 10^{-6}$	1,0023	0,3206	-1,4755	0,9990
G6	$(t_a; 700]$	$7,12 \cdot 10^{-6}$	1,0236	-0,7253	0	0,9860
G7	$(t_a; 700]$	$3,90 \cdot 10^{-6}$	0,9787	0,5600	0	0,9994
G8	$(t_a; 700]$	$3,57 \cdot 10^{-6}$	0,9875	0,6403	0	0,9998
G9	$(t_a; 700]$	$3,14 \cdot 10^{-6}$	1,0316	0,8047	0	0,9881

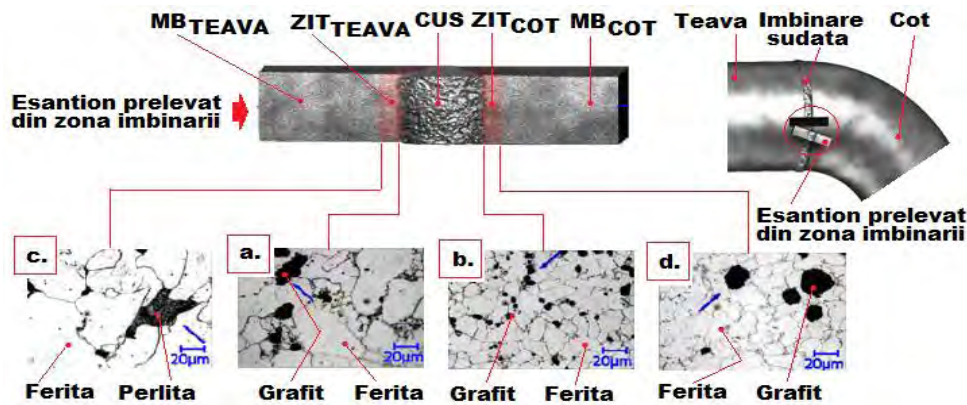
**Caracteristicile tehnologice** cele mai importante ale materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinei, care trebuie luate în considerare la proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice, sunt cele vizând **sudabilitatea și comportarea la sudare**; comportarea în exploatare a serpentinei cuptoarelor poate fi influențată în măsură esențială de calitatea îmbinărilor sudate dintre țevile care compun serpentinele, dintre țevi și coturile de întoarcere sau dintre țevi și plăcile tubulare.

**Tabelul 2.20.** Domeniul de calificare al procedurii de sudare în funcție de grosimea  $s_t$  a componentelor pe care s-au realizat îmbinările sudate supuse încercărilor la calificării procedurii

Grosimea componentelor pe care s-au realizat îmbinările sudate testate în vederea calificării procedurii de sudare $s_t$ , mm	Domeniul grosimilor $s$ ale componentelor pentru care este aplicabilă procedura de sudare calificată, mm, la:	
	sudarea cu un singur rând / o singură trecere	sudarea cu rânduri / treceri multiple
$s_t \leq 3$ mm	$0,7 s_t \leq s \leq 1,3 s_t$	$0,7 s_t \leq s \leq 2 s_t$
$3 \text{ mm} < s_t \leq 12$ mm	$\max[0,5 s_t; 3 \text{ mm}] \leq s \leq 1,3 s_t$	$3 \text{ mm} \leq s \leq 2 s_t$
$12 \text{ mm} < s_t \leq 100$ mm	$0,5 s_t \leq s \leq 1,1 s_t$	$0,5 s_t \leq s \leq 2 s_t$
$s_t > 100$ mm	neadmis	$50 \text{ mm} \leq s \leq 2 s_t$



**Fig. 2.26.** Realizarea îmbinărilor sudate la poziție ale serpentinei cuptoarelor folosind: a. sudarea (manuală) prin procedeul 111; b. sudarea orbitală (automată) prin procedeul 114 (131 sau 137)



**Fig. 2.27.** Declanșarea în ZIT a îmbinărilor sudate ale serpentinelor, realizate cu țevi și componente din oțeluri din grupa 1, a proceselor de degradare prin grafitizarea cementitei (după funcționarea o durată  $\tau = 290000$  ore la  $t = 430$  °C [115, 146]):

- a. structura ZIT<sub>TEAVA</sub> în zona de trecere spre CUS; b. structura ZIT<sub>COT</sub> în zona de trecere spre CUS; c. structura ZIT<sub>TEAVA</sub> în zona de trecere spre MB<sub>TEAVA</sub>; d) structura ZIT<sub>COT</sub> în zona de trecere spre MB<sub>COT</sub>

## 2.5. Concluzii

Studiul efectuat în acest capitol, privind caracteristicile constructive – funcționale ale serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice, a permis desprinderea următoarelor concluzii:

➤ Serpentinele, care sunt ansambluri de țevi sau tuburi, returbenți sau cutii de întoarcere, coturi din țeavă, elemente fasonate de îmbinare și/sau racordare, plăci tubulare, suporturi, suspensii, reprezintă unul din echipamentele cele mai importante ale cuptoarelor folosite în rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice.

➤ n funcție de regimul de lucru la care sunt supuse în exploatare, țevile și celelalte componente ale serpentinelor cuptoarelor se fabrică dintr-o gamă largă de oțeluri; în tabelul 2.4 sunt prezentate 14 tipuri de astfel de oțeluri, care aparțin, în conformitate cu recomandările din CR ISO 15608, următoarelor grupe: grupa 1, care cuprinde oțelurile de tip C – Mn și  $\frac{1}{2}$ Mo; grupele 5 și 6, în care se încadrează oțelurile Cr – Mo (cu adaosuri de V, W, Mb, Ti sau Ni) de următoarele tipuri:  $1\frac{1}{4}$ Cr– $\frac{1}{2}$ Mo;  $2\frac{1}{4}$ Cr–1Mo; 5Cr– $\frac{1}{2}$ Mo; 9Cr–1Mo; 9Cr–1Mo–V; grupa 7, care cuprinde oțelurile inoxidabile feritice, de tip 12Cr–1Mo–V(W); grupa 8, în care se încadrează oțelurile și superaliajele inoxidabile austenitice, de tip 18Cr–8Ni; 16Cr–12Ni–2Mo; 18Cr–10Ni–Ti; 18Cr–10Ni–Nb; 25Cr–20Ni (turnat centrifugal) și Ni–Fe–Cr (superaliaj).

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor trebuie să aibă, în funcție de tipul oțelului din care sunt fabricate, caracteristicile de compoziție chimică precizate în tabelul 2.5; acestea trebuie livrate în stările structurale definite în tabelul 2.6, în care se indică și instalațiile de prelucrare a hidrocarburilor pentru care este recomandată folosirea serpentinelor cu țevi și componente realizate din fiecare tip de oțel. Deoarece prezenta teză de doctorat și-a propus găsirea soluțiilor tehnice de creștere a duratei de exploatare în siguranță a serpentinelor cuptoarelor, iar una dintre acestea are la bază evaluarea periodică a stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor, cunoașterea compoziției chimice și structurii lor metalografice inițiale (în starea de livrare de către producător) reprezintă un factor deosebit de important pentru aprecierea stării acestora după diferite perioade de exploatare.

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor trebuie să aibă garantate atât caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate și tenacitate) la temperatura ambiantă, cât și caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate, tenacitate, comportare la fluaj, comportare la oboseală) în domeniul temperaturilor (ridicate) de exploatare a serpentinelor. În acest capitol

au fost sintetizate principalele informații privind caracteristicile mecanice (minime specificate) la tracțiune, la temperatura ambiantă  $t_a$  (limita de curgere  $R_{p0,2}$  și/sau  $R_{p1}$ , rezistența la rupere  $R_m$ , alungirea procentuală după rupere  $A - v$ . tabelul 2.8) și au fost prelucrate sub forma unor formule de corelare statistică informațiile privind caracteristicile mecanice (minime specificate) la diferite temperaturi  $t > t_a$  (limita de curgere  $R'_{p0,2}$  și/sau  $R'_{p1}$  rezistența tehnică de durată  $R'_{r/\tau}$ , pentru diferite temperaturi  $t$  și durate  $\tau$ .  $\tau = 10000$  ore,  $\tau = 100000$  ore și  $\tau = 200000$  ore). Forma formulelor propuse și dezvoltate de autorul tezei pentru determinarea caracteristicilor mecanice (minime specificate) la  $t > t_a$  are două avantaje esențiale: a) caracteristicile mecanice la  $t > t_a$  au ca referință valoarea unei caracteristici mecanice la  $t_a$ , care se poate verifica experimental ușor; b) intervenția temperaturii  $t > t_a$  este redată printr-o funcție separată, a cărei formă se poate presupune că nu depinde de nivelul caracteristicii de referință și, ca urmare, formulele se pot utiliza nu numai pentru determinarea caracteristicilor mecanice minime specificate la diferite temperaturi  $t > t_a$ , ci și pentru determinarea caracteristicilor mecanice efective la  $t > t_a$ , cunoscând valoarea determinată experimental (efectivă) a caracteristicii de referință la  $t_a$ .

➤ Pentru proiectarea grosimilor de perete ale țevilor cuptoarelor și pentru stabilirea duratei remanente de viață a țevilor pentru care se cunoaște istoricul lor de utilizare, standardul ISO 13704 recomandă utilizarea unor diagrame cu caracteristicile mecanice ale materialelor din care acestea se fabrică, de tipul celor prezentate în figura 2.21; utilizarea acestor diagrame în cadrul unor proceduri computerizate de proiectare a serpentinelor cuptoarelor și de evaluare a duratei lor de viață presupune transpunerea în formă analitică a curbelor componente.

➤ Pentru proiectarea, construirea și monitorizarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor este necesară și cunoașterea unor caracteristici fizice ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale acestora: modulele de elasticitate longitudinală (Young)  $E$  (la  $t_a$ ) și  $E'$  (la  $t > t_a$ ) și transversală  $G$  (la  $t_a$ ) și  $G'$  (la  $t > t_a$ ) și coeficientul contracției transversale (Poisson)  $\mu$  (la  $t_a$ ) și  $\mu'$  (la  $t > t_a$ ), densitatea  $\rho$  (la  $t_a$ ) și  $\rho'$  (la  $t > t_a$ ); coeficientul de dilatare termică  $\alpha$ , (instantaneu) la  $t_a$  și  $\alpha'$ , (mediu) în diferite intervale de temperatură ( $t_a; t$ ); conductivitatea termică  $\lambda$  (la  $t_a$ ) și  $\lambda'$  (la  $t > t_a$ ); căldura specifică  $c_p$  (la  $t_a$ ) și  $c'_p$  (la  $t > t_a$ ); difuzivitatea termică  $a_{te}$  (la  $t_a$ ) și  $a'_{te}$  (la  $t > t_a$ ); prin prelucrarea datelor existente în literatura de specialitate au fost dezvoltate formule pentru determinarea acestor caracteristici la  $t > t_a$  (pe aceleași principii ca și în cazul formulelor pentru caracteristicile mecanice la cald).

➤ Proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice implică, de asemenea, cunoașterea unor proprietăți chimice ale materialelor din care sunt confecționate, pentru domeniul de temperaturi în care acestea se utilizează, privind în special rezistența acestora la acțiunea mediilor cu care vin în contact: atmosferele din cuptoare și fluidele tehnologice vehiculate prin serpentine.

➤ Caracteristicile tehnologice cele mai importante ale materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor, care trebuie luate în considerare la proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice, sunt cele vizând sudabilitatea și comportarea la sudare; comportarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor poate fi influențată în măsură esențială de calitatea îmbinărilor sudate dintre țevile care compun serpentinele, dintre țevi și coturile de întoarcere sau dintre țevi și plăcile tubulare. Indicațiile din acest capitol, referitoare la elaborarea procedurilor de sudare, la stabilirea variabilelor esențiale ale acestora, la stabilirea procedeelor tehnologice de sudare și a materialelor de adaos folosite la sudare sunt deosebit de utile pentru asigurarea calității îmbinărilor sudate care se execută la construirea serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice.

### 3. CERCETARI PRIVIND SOLUTIILE TEHNICE DE ASIGURARE A DURABILITATII SERPENTINELOR CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI INSTALAȚII PETROCHIMICE

#### 3.1. Mecanismele de degradare a tubulaturii cuptoarelor

**Mecanismele de degradare** a materialului tubular al cuptoarelor în cursul utilizării acestora în instalațiile tehnologice din care fac parte sunt [9, 61, 65, 82, 104...107, 148]:

➤ **Fluajul**, care este determinat de solicitările mecanice cu mare durată ale materialului tubular aflat la temperatură ridicată (deasupra temperaturilor indicate în tabelul 2.7);

➤ **Oboseala**, care este determinată de caracterul variabil în timp al intensității tensiunilor generate în componentele materialului tubular de încărcările mecanice sau termice la care sunt supuse în timpul funcționării cuptoarelor;

➤ **Coroziunea**, cu diferitele sale variante (chimică, electrochimică, fisurare corozivă sub tensiune, fisurare datorită prezenței hidrogenului sau hidrogenului sulfurat etc.);

➤ **Eroziunea**, produsă în principal de circulația / curgerea cu viteză mare a fluidelor care sunt vehiculate prin serpentinele cuptoarelor, precum și de schimbările direcției și/sau sensului mișcării acestor fluide;

➤ **Fragilizarea**, care este determinată în anumite cazuri de modificările structurale care se produc (datorită regimului termic de solicitare a componentelor materialului tubular și/sau datorită modificării compoziției lor chimice, produsă prin acțiunea mediilor de lucru din cuptoare) și/sau datorită generării în componentele materialului tubular a unor imperfecțiuni sau defecte cu puternic efect de concentrare a tensiunilor și de reducere a tenacității.

#### 3.2. Procedura de proiectare a tubulaturii cuptoarelor

Principalele caracteristici tehnice ale tubulaturii serpentinei oricărui cuptor care deservește o instalație tehnologică dintr-o rafinărie de petrol sau dintr-o instalație petrochimică sunt cele considerate la proiectarea cuptorului. Printre primele procese care se realizează cu această ocazie (odată cu stabilirea tipului de cuptor, soluției tehnice de încălzire etc.) este proiectarea tehnologică a serpentinei, care are ca date de intrare tipul /compoziția fluidului care este procesat în cuptor, valorile temperaturii fluidului în cursul procesării (temperatura la intrare  $t_0 \in [t_{0min}; t_{0max}]$ , temperatura la ieșire  $t_f \in [t_{fmin}; t_{fmax}]$ ), debitul fluidului procesat / încălzit  $D_f$  și presiunea nominală a acestui fluid  $p_f$  ( $D_f$  și  $p_f$  definind și viteza de circulație prin serpentina cuptorului a fluidului procesat  $v_f$ ); cu aceste date, proiectarea tehnologică a serpentinei conduce la precizarea / adoptarea diametrului nominal al materialului tubular din care se realizează diferitele zone specifice ale serpentinei și la stabilirea lungimii serpentinei în aceste zone. După parcurgerea acestei etape se trece la proiectarea mecanică a serpentinei, care constă în a stabili, pentru fiecare zonă specifică a acesteia, grosimea materialului tubular; utilizând informațiile și recomandările din documentele normative [152, 183], autorul a conceput procedura (prezentată în continuare) pentru dimensionarea primară a tevelor serpentinei cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice. Procedura a fost transpusă într-un produs informatic (software), în mediul MathCad, denumit

PROTECUP1 care facilitează aplicarea acestuia, iar pentru prezentarea procedurii este folosit acest produs informatic, evident, în condițiile unui studiu de caz (ale cărui date de intrare se pot identifica cu ușurință în cursul prezentării); deoarece prezentarea procedurii este însoțită de explicații și comentarii, componentele / secvențele de lucru din PROTECUP1 apar înscrise în mai multe casete numerotate ca tabele.

### 3.3. Verificarea comportării la fluaj a tubulaturii cuptoarelor

#### 3.3.1. Estimarea durabilității la fluaj cu ajutorul CDC

Procedura de determinare a degradării cumulate a țevilor și celorlalte componente ale serpentinei cu mai multe blocuri de solicitare (numerotate  $i = 1 \dots n$ ), dezvoltată de autorul prezentei teze de doctorat pe baza informațiilor și recomandărilor din [156] și care folosește caracteristicile de comportare la fluaj sintetizate sub forma CDC.

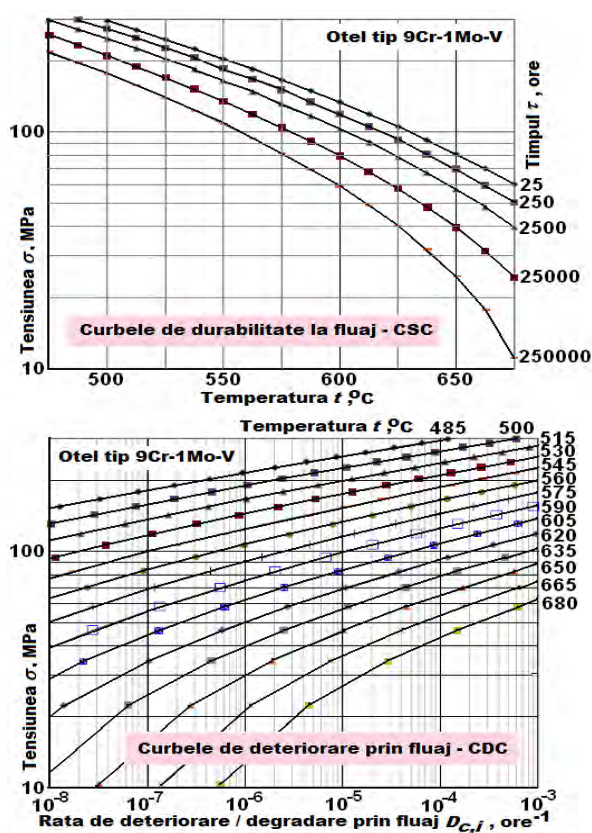


Fig. 3.5. CSC și CDC pentru un oțel folosit la fabricarea țevilor și componentelor serpentinei [156]

Modalitățile propuse de autorul tezei de doctorat pentru aplicarea procedurii prezentate anterior sunt ilustrate cu ajutorul următorului studiu de caz, având ca obiect evaluarea comportării la fluaj a țevilor din oțel 9Cr-1Mo-V din compunerea serpentinei unui cuptor din instalația de cocsare a unei rafinării de petrol (pentru care s-au efectuat calculele de dimensionare în studiul de caz din scap.3.2); țevile, cu diametrul exterior  $D_e = 102$  mm și grosimea de perete  $s = \delta_{o0} = 8,8$  mm, au fost supuse unor blocuri de solicitare, cu parametrii (presiune  $p_i$  – temperatură  $t_i$  – timp  $\tau_i$ ) precizați în tabelul 3.8. și au suferit în cursul utilizării modificări ale grosimii, produse datorită acțiunii corozive a mediilor de lucru din cuptor (viteza de coroziune  $v_{cor} \cong 0,34$  mm/an).

**Tabelul 3.9.** Rezultatele studiului de caz obținute folosind softwar-ul DFT-CDC

Blocul de solicitare $i$	Tensiunea $\sigma_{\theta_i}$ , MPa	$a(t)$	$b(t)$	Rata de deteriorare $D_{c,i}$ , ore <sup>-1</sup>	Deteriorarea totală $D_{cu,i} = \tau_i D_{c,i}$
1	47,4	-10,99090	0,757884	$1,68984 \cdot 10^{-6}$	$3,10863 \cdot 10^{-2}$
2	45,9	-11,94286	0,794206	$2,73038 \cdot 10^{-7}$	$2,87017 \cdot 10^{-3}$
3	47,5	-12,18085	0,798022	$2,08361 \cdot 10^{-7}$	$3,28544 \cdot 10^{-3}$
4	44,7	-12,41884	0,800390	$8,50461 \cdot 10^{-8}$	$5,96003 \cdot 10^{-4}$
5	45,7	-12,89482	0,802649	$3,41415 \cdot 10^{-8}$	$3,88804 \cdot 10^{-4}$
6	44,8	-13,84678	0,803674	$3,39572 \cdot 10^{-9}$	$2,37972 \cdot 10^{-5}$
7	44,8	-13,84678	0,803674	$3,41197 \cdot 10^{-9}$	$2,69000 \cdot 10^{-5}$
$D_{cu} =$					<b>0,038277</b>

### 3.3.2. Estimarea durabilității la fluaj cu ajutorul SC

Modalitățile propuse de autorul tezei de doctorat pentru aplicarea procedurii prezentate anterior sunt descrise considerând același studiu de caz ca și la exemplificarea modului de utilizare a procedurii din §3.3.1 (având condițiile inițiale precizate în tabelul 3.8).

Pentru efectuarea studiului de caz (și a altor evaluări asemănătoare) s-a conceput un produs informatic (software) în EXCEL, numit DFT-SC, care poate parcurge toate etapele procedurii prezentate anterior și furnizează rapid valoarea degradării cumulate  $D_{cu}$ .

**Tabelul 3.10.** Constantele din expresiile analitice (3.42) și (3.43) ale curbelor principale ale SC pentru oțelurile termorezistente folosite la fabricarea țevilor și componentelor serpentinilor

	Tipul oțelului termorezistent				
	C-Mn	½Mo	¼Cr-½Mo	5Cr-½Mo	9Cr-1Mo
$A_0$	24,66372	25,14541	25,79659	28,64330	27,48800
$A_1$	-0,01415	0,0037719	-0,0001338	0	0
$A_2$	0	-0,0000204	0	0	0
$A_3$	-1,416421	-1,349308	-1,435702	-2,157370	-1,737464
$B_0$	24,92439	25,52614	26,48378	29,52664	28,17533
$B_1$	-0,01244	0,0030425	0	0	0
$B_2$	0	-0,0000131	0	0	0
$B_3$	-1,458893	-1,355758	-1,457558	-2,182898	-1,727075
$C_{LM}$	20				
	16Cr-12Ni-2Mo	18Cr-10Ni-Ti	18Cr-10Ni-Nb	Ni-Fe-Cr	25Cr-20Ni
$A_0$	26,24935	26,58288	26,40911	28,69743	28,69161
$A_1$	0	0	0	0,0008423	-0,0163060
$A_2$	0	0	0	0	0
$A_3$	-1,876508	-2,125059	-1,887060	-2,494849	-2,099669
$B_0$	26,66111	27,52541	26,78671	29,24969	29,18934
$B_1$	0	0	0	0,0008903	-0,0133703
$B_2$	0	0	0	0	0
$B_3$	-1,874720	-2,134213	-1,880237	-2,496827	-2,111757
$C_{LM}$	15				

Rezultatele obținute pentru studiul de caz sunt rediate sintetic în tabelul 3.12, cu următoarele precizări: a. la determinarea degradărilor  $D_{c,i}$  s-a considerat valoarea maximă a



tensiunii  $\sigma_{\theta}$  în cursul fiecărui bloc de solicitare; b. evaluările s-au făcut considerând, pentru oțelul 9Cr-1Mo-V (din care sunt fabricate țevile din studiul de caz), atât curbele SC definite analitic de (3.44) și (3.45), cu constantele precizate în tabelul 3.11, cât și curbele SC definite analitic de (3.11) și (3.13), utilizate la dimensionarea țevilor cu PROTECUP1 (v. tabelul 3.4).

**Tabelul 3.12.** Rezultatele studiului de caz obținute folosind softwar-ul DFT-SC

<b>Evaluarea cu curbele SC definite analitic de (3.44) și (3.45)</b>					
Blocul de solicitare $i$	$\sigma_{\theta}$ , MPa	$P_{L-Mmin}$	$\tau_{rfmin,i}$ ore	$\tau_i$ ore	$D_{cumax,i}$
1	47,4	31850	184306	18396	$9,98120 \cdot 10^{-2}$
2	45,9	31916	1377300	10512	$7,63233 \cdot 10^{-3}$
3	47,5	31847	1843810	15768	$8,55186 \cdot 10^{-3}$
4	44,7	31969	4103484	7008	$1,70782 \cdot 10^{-3}$
5	45,7	31922	9622034	11388	$1,18353 \cdot 10^{-3}$
6	44,8	31964	81220327	7008	$8,62838 \cdot 10^{-5}$
7	44,8	31962	80889517	7884	$9,74663 \cdot 10^{-5}$
<b><math>D_{cumax} =</math></b>					<b>0,1190713</b>
Blocul de solicitare $i$	$\sigma_{\theta}$ , MPa	$P_{L-Mmed}$	$\tau_{rfmed,i}$ ore	$\tau_i$ ore	$D_{cumed,i}$
1	47,4	32320	610274	18396	$3,01439 \cdot 10^{-2}$
2	45,9	32383	4655497	10512	$2,25798 \cdot 10^{-3}$
3	47,5	32316	6318937	15768	$2,49536 \cdot 10^{-3}$
4	44,7	32434	13989357	7008	$5,00952 \cdot 10^{-4}$
5	45,7	32389	33434608	11388	$3,40605 \cdot 10^{-4}$
6	44,8	32429	289406034	7008	$2,42151 \cdot 10^{-5}$
7	44,8	32427	288273731	7884	$2,73490 \cdot 10^{-5}$
<b><math>D_{cumed} =</math></b>					<b>0,0357903</b>
<b>Evaluarea cu curbele SC definite analitic de (3.11) și (3.13)</b>					
Blocul de solicitare $i$	$\sigma_{\theta}$ , MPa	$P_{L-Mmin}$	$\tau_{rfmin,i}$ ore	$\tau_i$ ore	$D_{cumax,i}$
1	47,4	31844	184148	18396	$9,98978 \cdot 10^{-2}$
2	45,9	31947	1513520	10512	$6,94540 \cdot 10^{-3}$
3	47,5	31839	1834373	15768	$8,59585 \cdot 10^{-3}$
4	44,7	32030	4896435	7008	$1,43125 \cdot 10^{-3}$
5	45,7	31956	10696470	11388	$1,06465 \cdot 10^{-3}$
6	44,8	32022	96745497	7008	$7,24375 \cdot 10^{-5}$
7	44,8	32020	96116957	7884	$8,20251 \cdot 10^{-5}$
<b><math>D_{cumax} =</math></b>					<b>0,1180894</b>
Blocul de solicitare $i$	$\sigma_{\theta}$ , MPa	$P_{L-Mmed}$	$\tau_{rfmed,i}$ ore	$\tau_i$ ore	$D_{cumed,i}$
1	47,4	32505	991653	18396	$1,85508 \cdot 10^{-2}$
2	45,9	32615	8631824	10512	$1,21782 \cdot 10^{-3}$
3	47,5	32499	10353349	15768	$1,52299 \cdot 10^{-3}$
4	44,7	32704	28942219	7008	$2,42138 \cdot 10^{-4}$
5	45,7	32625	63628892	11388	$1,78975 \cdot 10^{-4}$
6	44,8	32695	608173504	7008	$1,15230 \cdot 10^{-5}$
7	44,8	32692	603938669	7884	$1,30543 \cdot 10^{-5}$
<b><math>D_{cumed} =</math></b>					<b>0,0217373</b>

### 3.4. Verificarea comportării la oboseală a tubulaturii cuptoarelor

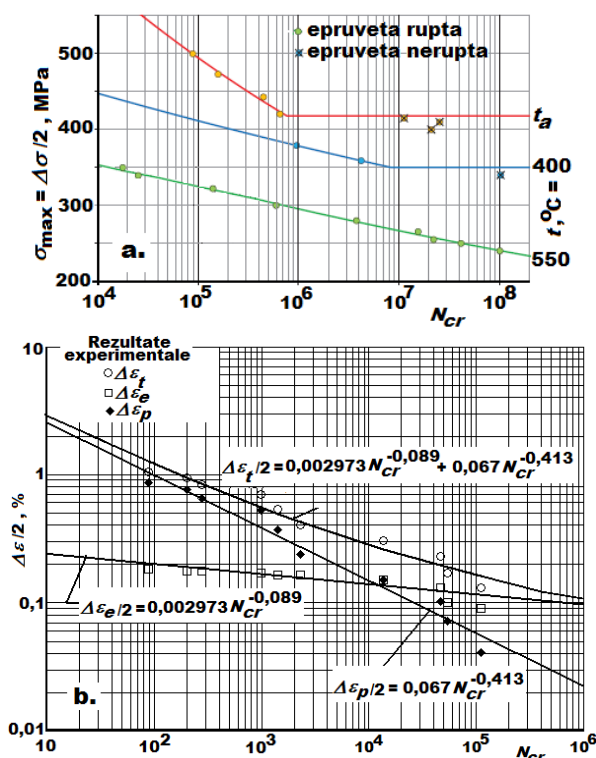
Solicitările variabile la care sunt supuse țevile și celelalte componente ale serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice, care pot determina degradarea acestora prin fenomene de oboseală, sunt determinate în principal de fluctuațiile ciclice ale presiunii fluidului tehnologic vehiculat prin serpentine și ale temperaturii componentelor serpentinelor.

Prelucrând informațiile disponibile în literatura de specialitate, autorul prezentei teze de doctorat a exprimat analitic curbele de durabilitate de tip Wöhler ale oțelurilor termorezistente folosite la fabricarea țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor sub forma:

$$\lg(N_{cr}) = q(\Delta\sigma) + \lg \frac{E^t}{E_{FC}}, \quad (3.50)$$

$$q(\Delta\sigma) = \frac{C_1 + C_3\Delta\sigma + C_5\Delta\sigma^2 + C_7\Delta\sigma^3 + C_9\Delta\sigma^4 + C_{11}\Delta\sigma^5}{1 + C_2\Delta\sigma + C_4\Delta\sigma^2 + C_6\Delta\sigma^3 + C_8\Delta\sigma^4 + C_{10}\Delta\sigma^5}, \quad (3.51)$$

în care  $E_{FC}$  este valoarea modulului de elasticitate longitudinală de referință (considerat la dezvoltarea pe bază experimentală a relației pentru un anumit oțel),  $E^t$  – modulul de elasticitate longitudinală la temperatura  $t$ , calculat cu formula (2.17), iar  $\Delta\sigma$  – amplitudinea tensiunilor ciclurilor de solicitare la oboseală. Constantele  $C_1 \dots C_{11}$  pentru câteva oțeluri termorezistente, stabilite de autorul tezei de doctorat pe baza informațiilor existente în [ ], sunt prezentate în tabelul 3.13, iar curbele de durabilitate de referință (cu  $E_{FC} = E^t$ ) ale acestor oțeluri sunt redată în figura 3.9.



**Fig. 3.8.** Configurația principalelor tipuri de curbe de durabilitate la oboseală:  
a. Curbele Wöhler, la diferite temperaturi, ale unui oțel de tip 9Cr-1Mo-V [63, 84, 91, 116];  
b. Curbele Manson – Coffin, la  $t_a$ , construite în laboratorul Departamentului de Inginerie Mecanică de la U.P.G. din Ploiești, pentru un oțel de tip  $1\frac{1}{4}$ Cr- $\frac{1}{2}$ Mo

Prelucrând informațiile disponibile în [23, 47, 60, 63, 116, 135, 156, 160], autorul prezentei teze de doctorat a exprimat analitic curbele de durabilitate de tip Manson – Coffin ale oțelurilor termorezistente folosite la fabricarea țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor sub forma:

$$\lg(N_{cr}) = q_1(\Delta\varepsilon), \quad (3.52)$$

$$q_1(\Delta\varepsilon) = \frac{K_1 + K_3\Delta\varepsilon + K_5\Delta\varepsilon^2 + K_7\Delta\varepsilon^3 + K_9\Delta\varepsilon^4}{1 + K_2\Delta\varepsilon + K_4\Delta\varepsilon^2 + K_6\Delta\varepsilon^3 + K_8\Delta\varepsilon^4}, \quad (3.53)$$

în care  $\Delta\varepsilon$  este amplitudinea deformațiilor specifice totale (de natură elastică și plastică) produse de ciclurile de solicitare variabilă. Constantele  $C_1...C_9$  pentru câteva oțeluri termorezistente, la diferite temperaturi  $t$  (domenii ale temperaturii  $t$ ), stabilite de autorul tezei de doctorat pe baza informațiilor existente în [23, 47, 60, 63, 116, 135, 156, 160], sunt prezentate în tabelul 3.14, iar curbele de durabilitate de tip Manson – Coffin ale acestor oțeluri sunt redată în figura 3.10.

**Tabelul 3.14.** Constantele  $K_1...K_9$  din expresiile analitice ale curbelor de durabilitate la oboseală de tip Manson – Coffin ale unor oțeluri termorezistente

Materialul	Oțel 2¼Cr–1Mo		Oțel 9Cr–1Mo–V	
	480...600		430...650	
Temperatura $t$ , °C				
$\Delta\varepsilon$ , –	< 0,003311	≥ 0,003311	0,0012...0,0019	0,0019...0,028
$K_1$	57,78	7,680	228,703	4,953
$K_2$	5027,539	-996,166	0	-513,76
$K_3$	3311,636	-8269,672	-576967	-3268,62
$K_4$	289953,5	373353,4	0	-76294,16
$K_5$	878455,9	3763790	$5,666126 \cdot 10^8$	0
$K_6$	8423550	$1,11888 \cdot 10^8$	0	0
$K_7$	-6117400	7,680	$-2,476048 \cdot 10^{11}$	0
$K_8$	0	0	0	0
$K_9$	0	0	$4,031465 \cdot 10^{13}$	0
Materialul	Oțel 18Cr–8Ni			
Temperatura $t$ , °C	540	600	650	700
$K_1$	15,809	13,326	17,138	19,583
$K_2$	1948,976	1575,541	2809,912	4317,931
$K_3$	4710,013	3252,683	6061,109	11334,69
$K_4$	73261,99	51965,64	111386,1	381524,8
$K_5$	0	0	0	127262,6
$K_6$	0	0	0	0
$K_7$	0	0	0	0
$K_8$	0	0	0	0
$K_9$	0	0	0	0
Materialul	Oțel 16Cr–12Ni–2Mo		Aliaj Ni–Fe–Cr	
Temperatura $t$ , °C	540...650	700	540	
$\Delta\varepsilon$ , –	-	-	< 0,00409	≥ 0,00409
$K_1$	48,396	13,669	-0,17	1,05
$K_2$	13737,83	2126,552	-2146,26	-428,168
$K_3$	44939,97	3964,792	-3108,909	-1187,157
$K_4$	1211982	75885,49	$1,401598 \cdot 10^6$	-17894,2
$K_5$	174050,9	-37882,28	$3,214994 \cdot 10^6$	0
$K_6$	0	0	$-2,937963 \cdot 10^8$	0

$K_7$	0	0	$-8,311417 \cdot 10^8$	0
$K_8$	0	0	0	0
$K_9$	0	0	0	0
Materialul	Aliaj Ni-Fe-Cr			
Temperatura $t$ , °C	650		760	
$\Delta \varepsilon_r$ , -	< 0,00327	$\geq 0,00327$	< 0,00309	$\geq 0,00309$
$K_1$	1,167	0,31	30,684	2,644
$K_2$	-1231,285	-631,642	2253,684	-590,702
$K_3$	-3733,41	-1626,079	-41619,59	-1820,215
$K_4$	-3295,415	-29610,98	$-4,56471 \cdot 10^6$	66440,26
$K_5$	0	0	$1,71935 \cdot 10^7$	335165,5
$K_6$	0	0	$2,252762 \cdot 10^9$	$8,823527 \cdot 10^6$
$K_7$	0	0	$-1,628228 \cdot 10^9$	745175,4
$K_8$	0	0	$-2,808947 \cdot 10^{11}$	0
$K_9$	0	0	0	0

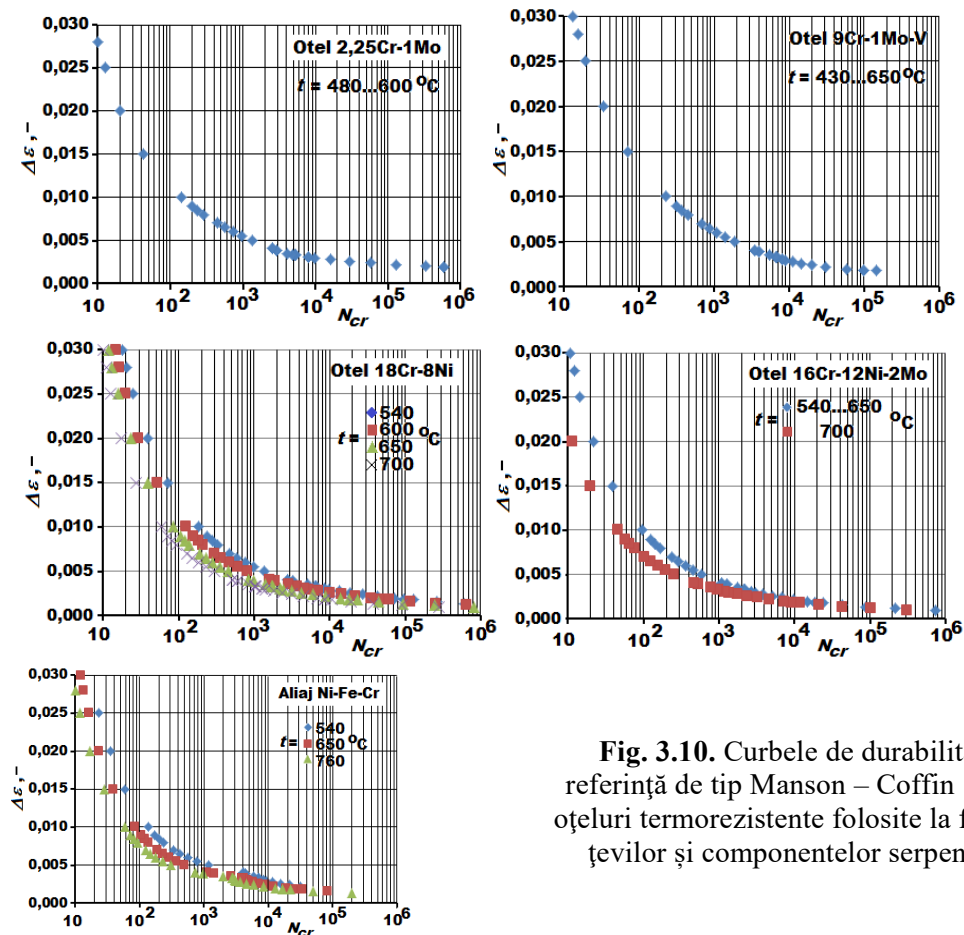


Fig. 3.10. Curbele de durabilitate de referință de tip Manson – Coffin ale unor oțeluri termorezistente folosite la fabricarea țevilor și componentelor serpentinei

Pentru efectuarea studiului de caz (și a altor evaluări asemănătoare) s-a conceput un produs informatic (software) în EXCEL, numit DOT-MC, care poate parcurge toate etapele procedurii prezentate anterior și furnizează rapid valoarea degradării cumulate  $D_{cuo}$ . Rezultatele obținute pentru studiul de caz sunt redată sintetic în tabelul 3.15 și relevă faptul că procesul de degradare ale țevilor serpentinei datorită solicitărilor variabile este neglijabil.

Tabelul 3.15. Rezultatele studiului de caz obținute folosind softwar-ul DOT-MC

Blocul de solicitare $j$	$t_j$ , °C	$\Delta\sigma_j$ , MPa	$\Delta\varepsilon_j$	$N_j$	$N_{cr,j}$	$D_{cuo,j}$
1	630	7,1	$1,305 \cdot 10^{-3}$	36792	$2,25 \cdot 10^7$	0,00164
2	610	6,9	$1,245 \cdot 10^{-3}$	21024	$4,77 \cdot 10^7$	0,00044
3	605	7,1	$1,285 \cdot 10^{-3}$	31536	$2,83 \cdot 10^7$	0,00112
4	600	6,7	$1,204 \cdot 10^{-3}$	14016	$9,29 \cdot 10^7$	0,00015
5	590	6,9	$1,224 \cdot 10^{-3}$	22776	$6,59 \cdot 10^7$	0,00035
6	570	6,7	$1,183 \cdot 10^{-3}$	14016	$1,40 \cdot 10^8$	0,00010
7	570	6,7	$1,184 \cdot 10^{-4}$	15768	$1,37 \cdot 10^8$	0,00012
$D_{cuo} =$						<b>0,00390</b>

### 3.5.Verificarea comportării tubulaturii cuptoarelor la acțiunea combinată a proceselor de degradare

Pentru a considera efectele combinate ale proceselor de degradare a țevilor și celorlalte componente ale serpentinilor cuptoarelor prin fluaj (datorită operării lor îndelungate la temperatură ridicată) și prin oboseală (datorită fluctuațiilor ciclice ale parametrilor regimului de lucru) se recomandă aplicarea următoarei proceduri de determinare a degradării cumulate:

- se determină degradarea cumulată / deteriorarea totală corespunzătoare acțiunii fenomenului de fluaj  $D_{cu}$ , aplicând una din procedurile prezentate anterior;
- se determină degradarea cumulată / deteriorarea totală corespunzătoare acțiunii fenomenului de oboseală  $D_{cuo}$ , aplicând procedura descrisă anterior;

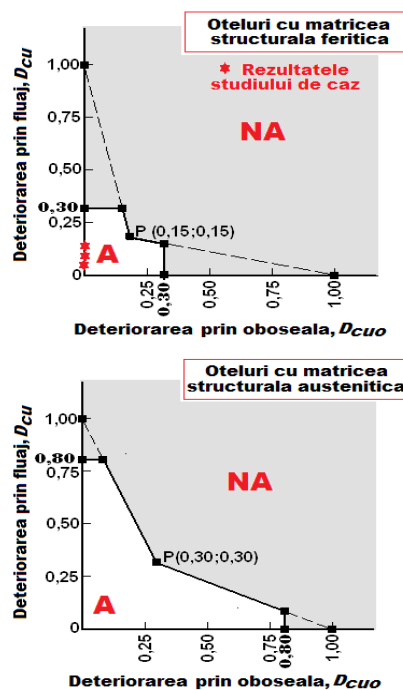


Fig. 3.11. Diagrama de evaluare a țevilor și componentelor serpentinilor la deșdarea prin acțiunea combinată a fenomenelor de fluaj și oboseală  
A – domeniul de acceptare; NA – domeniul de neacceptare

c) se construiește o diagramă de interpretare a rezultatelor, având coordonatele  $D_{cu}$  și  $D_{cuo}$ , pe care se trasează un domeniu de acceptabilitate a degradărilor / deteriorărilor produse prin acțiunea combinată a fenomenelor de fluaj și oboseală; autorul prezentei teze de doctorat a propus în lucrarea [147] variantele prezentate în figura 3.11 pentru această diagramă, considerând că această soluție este mai bună decât cea recomandată în [156] (care contravine recomandării anterioare, de a nu considera pentru degradările cumulate  $D_{cu}$  și  $D_{cuo}$  valori admisibile  $D_{cu,A} = 1$  sau  $D_{cuo} = 1$ ).

d) se înscrie pe diagramă punctul cu coordonatele ( $D_{cuo}$ ;  $D_{cu}$ ) și, în funcție de domeniul în care este amplasat se decide dacă țevile sau componentele serpentinei și-au epuizat durabilitatea (punctul este situat în domeniul NA) și trebuie efectuate lucrări de înlocuire a lor sau mai pot fi utilizate în siguranță (punctul este situat în domeniul A). Pentru exemplificare, pe diagramă sunt marcate cu o steluță rezultatele obținute la efectuarea studiului de caz cu procedurile prezentate în subcapitolele precedente (țevile serpentinei considerate în studiul de caz sunt fabricate din oțel X10CrMoVNb9–1, care aparține categoriei oțelurilor cu matrice structurală feritică).

Autorul tezei a optat pentru procedurile ingineresti, prezentate în acest capitol, de proiectare a serpentinei cuptoarelor și de evaluare a comportării lor în exploatare și a conceput o strategie simplă de creștere a fiabilității și durabilității acestora, bazată pe schema redată figura 3.12, de programare a reviziilor tehnice la cuptoare, de evaluare periodică (cu ocazia efectuării reviziilor tehnice) a stării tehnice a serpentinei, de restabilire a fiabilității și disponibilității acestora prin lucrări de mentenanță și de sporirea în acest fel a duratei lor remanente de viață.

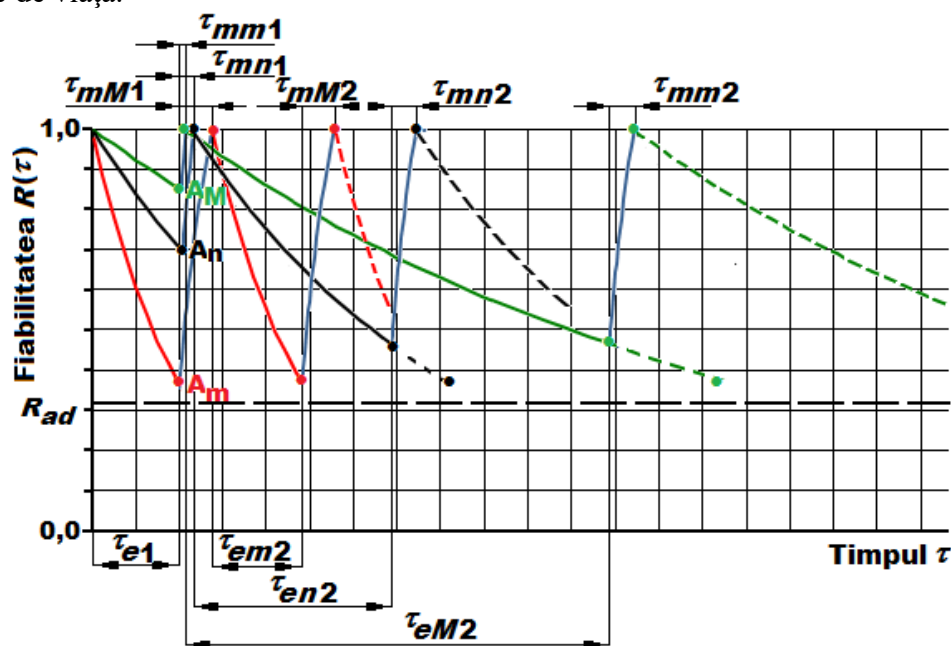


Fig. 3.12. Schema de programare a lucrărilor de verificare a stării tehnice (reviziilor tehnice) și a lucrărilor de mentenanță la serpentinele cuptoarelor

În consecință, pentru a asigura funcționarea în siguranță a serpentinei cuptoarelor este foarte importantă verificarea periodică a stării lor tehnice și programarea rațională a reviziilor tehnice, astfel încât pe toată durata de viață proiectată a acestora nivelul fiabilității să depășească nivelul admisibil  $R_{ad}$ , iar probabilitatea de înregistrare a unor cedări intempestive (în cursul etapelor de exploatare) să fie neglijabilă. Având în vedere aceste principii, în capitolele următoare ale tezei de doctorat sunt analizate și selectate metodele și procedeele de

evaluare a stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor și de estimare a duratei lor de viață remanente / reziduale.

### 3.6. Concluzii

Cercetările prezentate în acest capitol, privind soluțiile tehnice de asigurare a durabilității în exploatare a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice, au permis desprinderea următoarelor concluzii:

➤ Mecanismele / procesele de degradare a materialului tubular al cuptoarelor în cursul utilizării acestora în instalațiile tehnologice din care fac parte sunt: fluajul, oboseala, coroziunea, eroziunea și fragilizarea (datorită modificărilor structurale și/sau datorită generării unor imperfecțiuni sau defecte cu puternic efect de concentrare a tensiunilor și de reducere a tenacității); fluajul este mecanismul / procesul principal de degradare, iar interacțiunea cu mecanismele / procesele secundare (oboseala, coroziunea, eroziunea și fragilizarea) determină nivelul durabilității serpentinelor cuptoarelor.

➤ La proiectarea cuptoarelor se face mai întâi proiectarea tehnologică a serpentinei, care conduce la stabilirea / adoptarea diametrului nominal al materialului tubular din care se realizează diferitele zone specifice ale serpentinei și la stabilirea lungimii serpentinei în aceste zone, după care se trece la proiectarea mecanică a serpentinei, care constă în a stabili, pentru fiecare zonă specifică a acesteia, grosimea de perete a materialului tubular; pentru proiectarea mecanică a serpentinelor se recomandă a se utiliza procedura descrisă în acest capitol și produsul informatic PROTECUP1, care asigură aplicarea operativă a acesteia.

➤ După proiectarea primară a serpentinelor, care conduce la cunoașterea caracteristicilor dimensionale (diametru , grosime de perete) ale țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor, precum și a caracteristicilor fizico – mecanice ale materialului din care acestea sunt realizate, se trece la verificarea soluției de proiectare, prin evaluarea / estimarea comportării serpentinelor la acțiunea proceselor de degradare care se manifestă cursul exploatării lor; se ia în considerare procesul (principal) de degradare prin fluaj, dar și interacțiunea acestuia cu procesele de degradare secundare (oboseala, coroziunea etc.).

➤ Comportarea în condiții de fluaj a țevilor sau componentelor serpentinelor trebuie evaluată considerând atât istoria exploatării acestora (funcționarea înainte de momentul la care se face analiza), cât și cerințele de operare viitoare. Istoria exploatării țevilor sau componentelor serpentinelor poate fi elaborată (în termenii solicitărilor mecanice și temperaturilor de lucru) pe baza documentelor de monitorizare a regimului de exploatare și condițiilor de funcționare ale cuptorului în care acestea sunt utilizate, iar cerințele de exploatare viitoare se pot preciza luând în considerare programele de producție ale instalației tehnologice din care face parte cuptorul respectiv; dacă regimul de exploatare și condițiile de funcționare ale cuptorului sunt variabile în timp, descrierea condițiilor anterioare și viitoare de exploatare ale țevilor sau componentelor serpentinelor trebuie făcută cu blocuri de solicitare.

➤ Pentru verificarea comportării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor în condiții de fluaj se recomandă utilizarea mijloacelor dezvoltate în acest capitol: a. procedura și produsul informatic DFT-CDC, care utilizează curbele de degradare / deteriorare prin fluaj (creep damage curves – CDC) ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinei analizate; b. procedura și produsul informatic DFT-SC, care utilizează diagramele complexe cu caracteristicile de comportare la fluaj (stress curves – SC) ale materialelor utilizat la realizarea țevilor și celorlalte componente ale serpentinei care se evaluează.

➤ Pentru verificarea comportării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor exploatare în condiții de solicitare variabilă (oboseală) trebuie cunoscute / definite: a. blocurile de solicitare variabilă și caracteristicile ciclurilor de solicitare din fiecare bloc; b. caracteristicile de comportare la oboseală ale materialelor din care sunt realizate țevile și celelalte componente ale serpentinelor care trebuie verificate; se recomandă utilizarea curbelor de durabilitate la oboseală de tip Wöhler, dacă temperaturile de lucru se situează sub temperatura limită minimă de incidență a fluajului sau imediat deasupra acesteia sau a curbelor de durabilitate la oboseală de tip Manson – Coffin, dacă temperaturile de lucru se situează în domeniul de manifestare a fenomenului de fluaj.

➤ Pentru verificarea comportării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor supuse la solicitări variabile se recomandă utilizarea procedurii propuse în acest capitol, bazată pe utilizarea curbelor de durabilitate la oboseală de tip Manson – Coffin și a produsului informatic DOT-MC, care permite aplicarea operativă a acestei proceduri.

➤ Pentru a verifica comportarea la fluaj și oboseală se recomandă aplicarea procedurii descrise în acest capitol, bazată pe construirea și utilizarea diagramei de evaluare a degradării țevilor și componentelor serpentinelor supuse la acțiunea combinată a fenomenelor de fluaj și oboseală. Procedurile de proiectare a serpentinelor și de verificare a comportării lor în exploatare, prezentate în acest capitol, iau în considerare și efectele altor procese secundare (coroziune, eroziune etc.) : a. modificarea (superficială sau în volum) a compoziției chimice a țevilor sau componentelor serpentinelor, însoțită (evident) de modificări ale structurii metalografice și caracteristicilor fizico – mecanice ale acestora; b. modificarea (generală sau locală) a grosimii de perete a țevilor și componentelor serpentinelor; c. realizarea de depuneri pe suprafețele exterioară sau (mai ales) interioară ale țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor; d. generarea pe suprafețele sau în masa țevilor și componentelor serpentinelor a unor defecte, de tipul unor ciupituri sau fisuri.

➤ Procedurile ingineresti, prezentate în acest capitol, de proiectare a serpentinelor cuptoarelor și de evaluare a comportării lor în exploatare trebuie aplicate împreună cu strategia de creștere a fiabilității și durabilității acestora, bazată pe schema redată figura 3.12, de programare a reviziilor tehnice la cuptoare, de evaluare periodică (cu ocazia efectuării reviziilor tehnice) a stării tehnice a serpentinelor, de restabilire a fiabilității și disponibilității acestora prin lucrări de mentenanță și de sporirea în acest fel a duratei lor remanente / reziduale de viață. Aplicarea strategiei propuse implică verificarea periodică a stării tehnice a serpentinelor și programarea rațională a reviziilor tehnice, astfel încât pe toată durata de viață proiectată a acestora nivelul fiabilității să depășească un nivel admisibil, iar probabilitatea de înregistrare a unor cedări intempestive (în cursul etapelor de exploatare) să fie neglijabilă; în capitolele următoare sunt analizate și selectate metodele și procedeele de evaluare a stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor și de estimare a duratei lor de viață remanente / reziduale.



## 4. EVALUAREA STĂRII TEHNICE ȘI DURATEI DE VIAȚĂ REMANENTE A TUBULATURII CUPTOARELOR PRIN DETERMINĂRI PERIODICE ALE COMPOZIȚIEI CHIMICE ȘI MICROSTRUCTURII

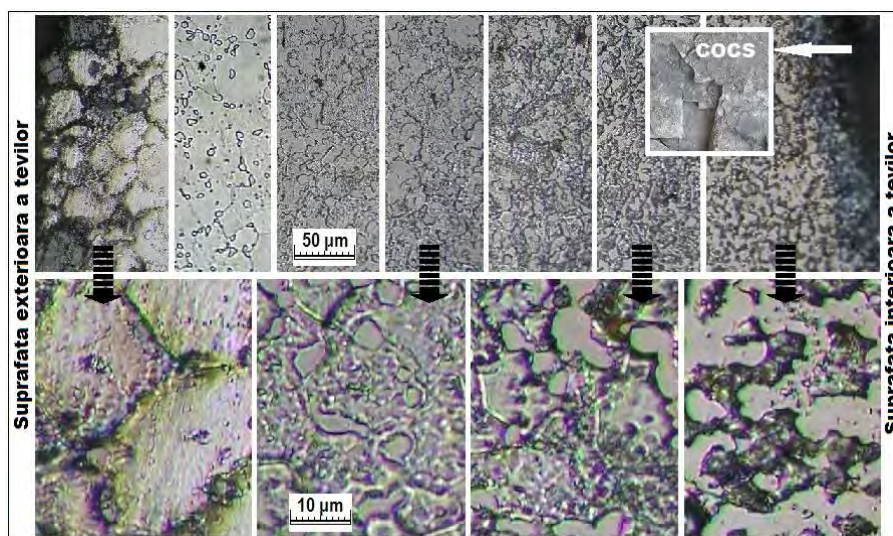
### 4.1. Modificări ale compoziției chimice și microstructurii tubulaturii în cursul exploatării cuptoarelor

Modificările de structură în cursul utilizării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor se referă în principal la fazele și/sau constituenții, cu ponderi procentuale mici, care se distribuie la marginea sau în interiorul cristalelor matricei feritice sau austenitice (denumite în continuare, generic, faze secundare sau precipitate): carburi, nitruri sau carbonitruri (ale elementelor principale de aliere: Cr, Mo sau ale unor elementelor de aliere suplimentară, introduse în cantități mici, pentru îmbunătățirea caracteristicilor de utilizare ale țevilor și componentelor serpentinelor, cum sunt: Ti, Nb, V, W, Si, B) și compuși intermetalici; în mod obișnuit, în microstructurile țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor sunt distribuite carburi  $M_3C$ ,  $M_{23}C_6$ ,  $M_6C$ ,  $MC$ ,  $M$  fiind Fe, Cr, Mo, V, Nb (de exemplu,  $Fe_3C$ ,  $Cr_{16}Fe_5Mo_2C_6$ ,  $Fe_3Nb_3C$ ,  $(Fe,Cr)_{21}Mo_3C_4$ ,  $Cr_5SiC$ ,  $TiC$ ,  $NbC$ ), nitruri  $MN$ ,  $M$  fiind Cr, Nb, Ti (de exemplu,  $NbN$ ,  $TiN$ ,  $(Cr,Fe)_2N$ ,  $Cr(V,Nb)N \equiv$  faza Z sau  $Cr_2(V,Nb)_2N_2$  – faza Z modificată) și compuși intermetalici de tipul fazelor Laves (de exemplu,  $Fe_2Mo$ ,  $Fe_2Nb$ ,  $Fe_2W$ ), în microstructurile cu matrice austenitică (dar uneori și în cele cu matrice feritică) putând să apară și precipitate de fază  $\sigma$ , care sunt compuși de tip  $(Ni,Cr,Mo)Fe$ , de fază G, care sunt compuși de tip  $Ni_{16}Nb_6Si_7$  sau  $Ni_{16}Ti_6Si_7$  sau de fază  $\chi$ , care sunt compuși de tip  $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$  sau  $(FeNi)_{36}Cr_{18}(Ti,Mo)_4$  [150].

**Tabelul 4.1.** Domeniile temperaturilor de formare și de stabilitate a fazelor secundare în structura țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor

Matricea microstructurii	Tipul fazelor secundare	Formula chimică a fazelor secundare	Domeniul de temperatură <sup>a)</sup> , °C
Ferită / Austenită	Carburi $M_{23}C_6$	$Cr_{23}C_6$ sau $Cr_{16}Fe_5Mo_2C_6$	600...950
Ferită / Austenită	Carburi $M_6C$	$Fe_3Nb_3C$	700...950
Ferită / Austenită	Carbonitruri de Ti	$Ti(C,N)$	700... $t_s$ <sup>b)</sup>
Ferită / Austenită	Carbonitruri de Nb	$Nb(C,N)$	700... $t_s$ <sup>b)</sup>
Ferită	Nitruri Cr-Fe	$(Cr,Fe)_2N$	650...950
Ferită / Austenită	Faza Z	$Cr(V,Nb)N$	700...1000
Ferită / Austenită	Faze Laves	$Fe_2Mo / Fe_2Nb$	550...900
Ferită / Austenită	Faza $\sigma$	$(Ni,Cr,Mo)Fe$	550...1050
Ferită / Austenită	Faze $\chi$	$Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ sau $(FeNi)_{36}Cr_{18}(Ti,Mo)_4$	600...900
Austenită	Faze G	$Ni_{16}(Nb,Ti)_6Si_7$	700...1000

a) Temperaturile la care fazele secundare apar și sunt stabile în structura țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor; b)  $t_s$  – temperatura de solidificare – topire a oțelului



**Fig. 4.1.** Efectele fluidului tehnologic (amestec de hidrocarburi) și atmosferei din cuptorul 02-H1 din Rafinăria Petrol LukOil asupra materialului tubular, din oțel X11CrMo9–1, utilizat timp îndelungat (peste 110000 h): carburarea (în toată secțiunea: la interior 1,40 %C, la exterior 0,57 %C), cocsarea (la interior) și oxidarea intercristalină (la exterior) [146]

#### 4.2. Principiile și criteriile evaluării stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza compoziției chimice și microstructurii

Aprecierea stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinei cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și de microstructură (efectuate periodic, cu ocazia reviziilor tehnice sau reparațiilor curente, pe eșantioane prelevate din acelea sau prin metode nedistructive, folosind spectrometre mobile și examinarea unor replici metalografice [19, 21, 80, 134]) implică cunoașterea unor corelații experimentale pertinente între următoarele categorii de factori: a. compoziția chimică, microstructura și caracteristicile mecanice ale țevilor sau componentelor serpentinei; b. regimul tehnologic de utilizare a țevilor sau componentelor serpentinei, definit prin: temperatura  $t_f$ , presiunea  $p_f$ , natura și activitatea chimică / agresivitatea fluidului tehnologic transportat; c. natura și activitatea chimică / agresivitatea atmosferei din cuptorul în care se află serpentina; d. durata de viață / durabilitatea la fluj  $\tau_f$  a țevilor sau componentelor serpentinei (în condițiile definite de categoriile de factori descrise mai înainte).

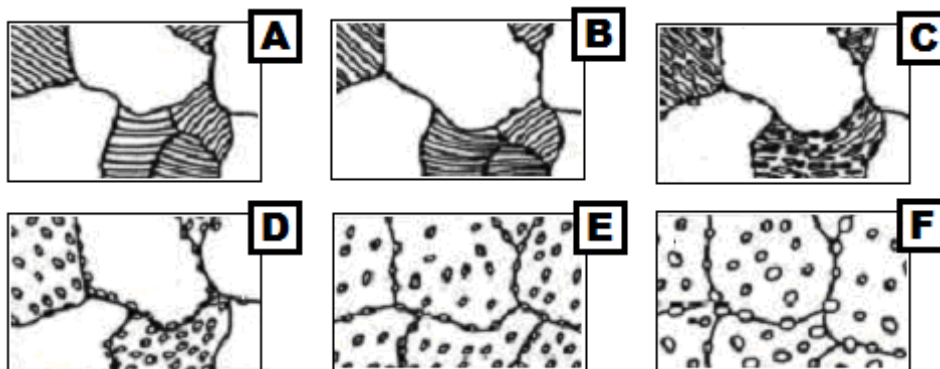
#### 4.3. Metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza compoziției chimice și microstructurii

Principalele metode de evaluare a stării tehnice a componentelor serpentinei cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice sunt prezentate și comentate în continuare, multe dintre aprecierile făcute și prezentarea acestor metode sub forma unor proceduri de lucru aparținând autorului prezentei teze de doctorat.

##### 4.3.1. Metoda nivelurilor / gradelor (claselor) de degradare

Metoda a fost dezvoltată și se aplică pentru aprecierea stării tehnice a serpentinei

cuptoarelor realizate cu material tubular din oțeluri cu matricea feritică. Starea structurală a serpentinelor după diferite durate de utilizare în cuptoarele din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice este exprimată sintetic printr-un nivel de degradare, definit în funcție de tipul constituenților care alcătuiesc masa de bază a structurii, de natura, dimensiunile, modul de distribuție și gradul de dispersie al fazelor secundare (carburi, nitruri, compuși intermetalici) în structură. Nivelurile de degradare sunt marcate cu literele A,B ... F, definite așa cum se arată în figura 4.7 și cum se descrie sintetic în tabelul 4.2 [150, 190].



**Fig. 4.7.** Nivelurile de degradare a microstructurii materialului tubular, fabricat din oțeluri cu matrice feritică, datorită utilizării în cuptoarele din petrochimie

Modificările structurale produse după diferite durate de utilizare a materialului tubular în cuptoarele din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice au fost corelate suplimentar, prin introducerea conceptului de grad / clasă de degradare prin fluaj, gradele / clasele de degradare fiind definite așa cum se prezintă sintetic în tabelul 4.3, pe baza caracterizării dimensiunilor și frecvenței microdiscontinuităților (microcavități, microfisuri sau macrofisuri) în structura componentelor materialului tubular [150, 190].

**Tabelul 4.2.** Descrierea nivelurilor de degradare a materialului tubular, fabricat din oțeluri cu matrice feritică, datorită utilizării în cuptoarele din petrochimie [150]

Nivelul de degradare	Caracteristicile microstructurii (v. fig 4.7 )
<b>A</b>	Microstructura inițială: ferită și perlită lamelară
<b>B</b>	Inițierea proceselor de sferoidizare a carburilor și de precipitare a lor la marginile graunților de ferită
<b>C</b>	Nivelul intermediar de sferoidizare; perlita este parțial globulizată, dar lamelele de cementită (carburi) sunt încă evidente
<b>D</b>	Perlita este complet sferoidizată, dar globulele de cementită (carburi) sunt încă incluse în grăunții de perlite inițiali
<b>E</b>	Globulizarea structurii este finalizată, particulele globulare de carburi sunt distribuite uniform în masa de ferită
<b>F</b>	Particulele globulare de carburi suferă un process de coalescență, cu formarea unor lanțuri / rețele (continue sau discontinue) cu efect fragilizant

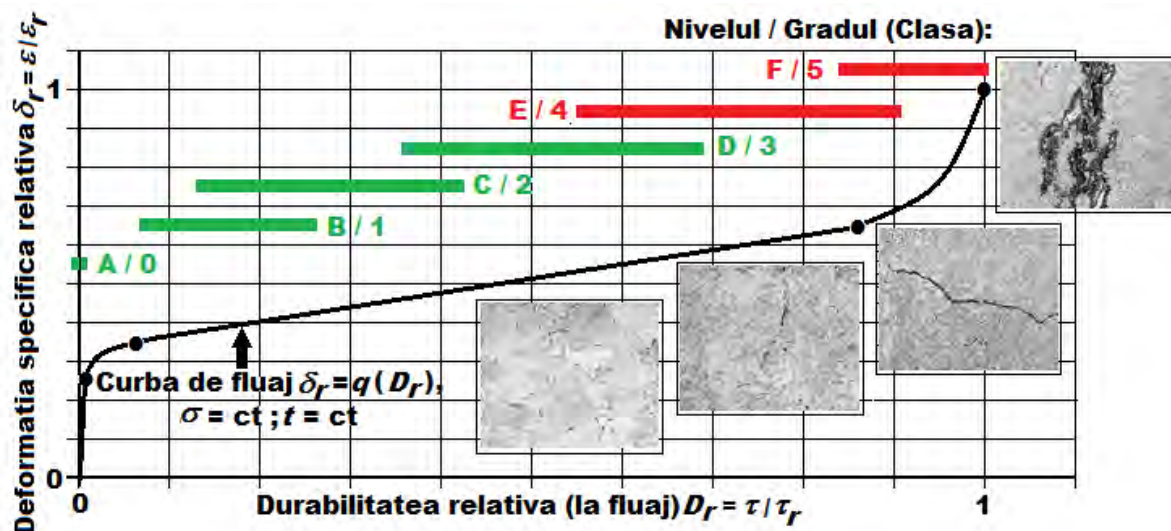


Fig. 4.8. Corelarea nivelurilor de degradare a microstructurii cu gradele / clasele de degradare prin fluaj a materialului tubular folosit în cuptoarele din rafinării și instalații petrochimice


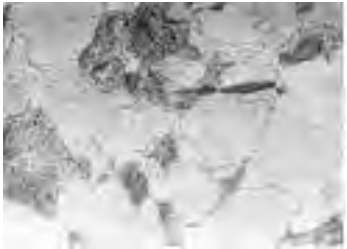




❖ Aprecierea stării tehnice a materialului tubular pe baza cercetării microstructurii acestuia după diferite perioade de utilizare poate avea un nivel de încredere ridicat, dacă modificările de microstructură produse se corelează cu apariția discontinuităților determinate de procesul de degradare prin fluaj. Acest aspect trebuie avut în vedere atât în cazul materialului tubular din oțeluri cu matricea feritică, cât și în cazul materialului tubular din oțeluri cu matricea austenitică; pentru exemplificare, în figura 4.10 sunt prezentate imaginile obținute la cercetarea microscopică, după diferite durate de utilizare la temperatură ridicată, a unor țevi turnate centrifugal din oțel 25Cr–25Ni (oțel cu matricea structurală austenitică) [43, 115].

#### 4.3.2. Metoda aplicării teoriei cinetice modificate, bazată pe utilizarea parametrilor microstructurali

Metoda a fost dezvoltată în [10] și a fost utilizată pentru evaluarea stării tehnice a conductelor tehnologice realizate cu țevi din oțeluri de tip  $\frac{1}{2}\text{Mo}$ ,  $\frac{1}{4}\text{Cr}-\frac{1}{2}\text{Mo}$ ,  $\frac{2}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ , exploatate în condițiile de manifestare a fenomenului de fluaj. În conformitate cu precizările din [10], teoria cinetică reprezintă o interpretare originală a comportării la deformare și la rupere a corpurilor solide supuse unor încărcări mecanice, care consideră că aceste corpuri sunt medii fizice pentru care rezultatul acțiunii forțelor exterioare depinde de interacțiunea dintre atomii, aflați în agitație termică, din alcătuirea lor.

Metoda a fost aplicată în cazul unor țevi realizate dintr-un oțel termorezistent (cu 0,12 %C, 0,49 %Mn, 1,0 %Cr, 0,3 %Mo, 0,21 %V), care au fost utilizate, diferite durate  $\tau_s$ , la  $t = 540$  °C și la presiune interioară (care a generat în peretele țevelor o tensiune circumferențială  $\sigma = 70$  MPa); microstructurile țevelor după duratele de utilizare  $\tau_s$  au fost cele prezentate în tabelul 4.5, iar valorile mărimilor  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_1$  și  $c_2$  considerate la evaluarea duratei de viață  $\tau_f$  (cu metoda descrisă succint mai înainte) au fost cele diagrfiate (în funcție de  $\tau_s$ ) în figura 4.11 (pe baza rezultatelor examinării microstructurilor prezentate în tabelul 4.5), în această figură fiind reprezentată și diagrama de variație a duratei de viață remanente  $\tau_r$  în funcție de durata de servicii  $\tau_s$  ( $\tau_f = \tau_s + \tau_r$ ) [10].

**Tabelul 4.5.** Microstructurile după diferite durate de service ale țevilor pentru care s-a aplicat metoda de evaluare a stării tehnice bazată pe teoria cinetică modificată [10]

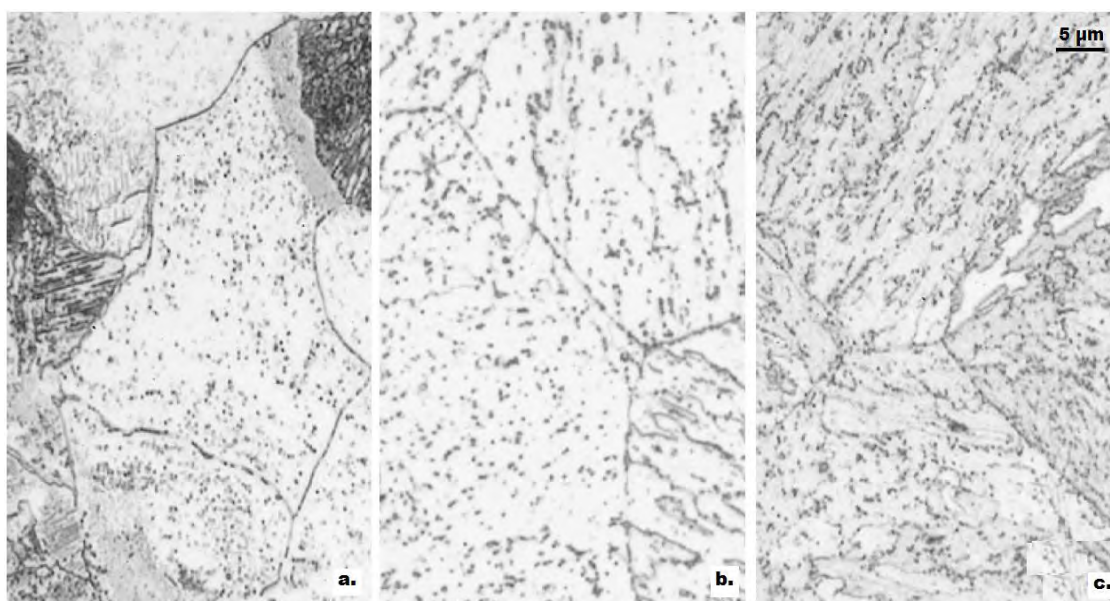
Durata $\tau_s^a$ , ore	Microstructura <sup>b)</sup>	Caracterizarea microstructurii [10, 14]
0 (stare inițială)		Microstructura alcătuită din ferită – F, formațiuni uniform distribuite de perlită – P / bainită superioară – B și particule de carburi. P / B reprezintă 13...14 % din masa structurii, iar carburile sunt mai frecvente în zonele marginilor grăunților de F
53000		Microstructura asemănătoare celei existente în starea inițială; procesele de globulizare a formațiunilor de carburi lamelare din P / B sunt incipiente, iar carburile sunt distribuite în F la fel ca în starea inițială
100000		Procesul de modificare a microstructurii inițiale este în desfășurare; datorită proceselor de globulizare a carburilor, formațiunile de P / B reprezintă numai 9...10 % din masa structurii, iar distribuția carburilor în F este asemănătoare celei evidențiate anterior
156000		Procesul de modificare a microstructurii inițiale este avansat; extinderea formațiunilor de P / B se reduce, iar carburile sunt uniform distribuite în F
170000		Globulizarea structurii este completă, formațiunile P / B sunt în totalitate descompuse (în ferită și carburi), iar particulele globulare de carburi sunt distribuite uniform în F; este atins nivelul de degradare E – v. tabelul 4.2.
210000		Globulizarea structurii avansează, producându-se coalescența carburilor (creșterea dimensiunilor globulelor de carburi și mărirea distanței dintre ele); este atins nivelul de degradare F – v. tabelul 4.2.

a) durata de solicitare a țevilor la temperatura  $t = 540$  °C, și la presiune interioară (care a generat în peretele țevilor o tensiune circumferențială  $\sigma = 70$  MPa); b) microstructura evidențiată la microscopul optic

#### 4.3.3. Metoda bazată pe utilizarea atlaselor metalografice

Metoda construirii și folosirii unor atlase metalografice, care să redea imaginile microstructurii oțelurilor termorezistente degradate datorită utilizării timp îndelugat, la temperaturi ridicate, a fost propusă și descrisă în [71], lucrare în care sunt prezentate pentru exemplificare și rezultatele aplicării acestei metode pentru oțelurile termorezistente de tip  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ , livrate în trei stări metalurgice: A – recoacere completă; NT – normalizare + revenire; QT – călire martensitică + revenire.

Imaginile microstructurilor de referință pentru cele trei stări metalografice de livrare ale țevilor și tablelor din care s-au prelevat eșantioanele și epruvetele folosite la construirea atlasului metalografic pentru aceste oțeluri și la determinarea caracteristicilor lor mecanice sunt prezentate în figura 4.13.



**Fig. 4.13.** Microstructurile de referință ale stărilor de livrare ale țevilor și tablelor din care s-au prelevat eșantioanele și epruvetele folosite la realizarea programului experimental necesar construirii atlasului metalografic al oțelului termorezistent de tip  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ :

- a. Starea A – structură ferito – perlitică; b. Starea NT – structură bainitică;
- c. Starea QT – structură cu martensită de revenire

Din țevile și tablele cu stările structurale precizate mai înainte s-au realizat epruvete care au fost supuse unor încercări de comportare la fluj. Fiecare epruvetă a fost solicitată la tracțiune monoaxială cu sarcină constantă, care a generat în aceasta o tensiune cu intensitatea  $\sigma$  și a fost menținută la o temperatură de încercare  $t_f \in [450\text{ }^\circ\text{C}; 650\text{ }^\circ\text{C}]$ , până la producerea ruperii prin fluj (după o anumită durată  $\tau_f$ ). Din epruvetele rupte s-au prelevat și pregătit eșantioane metalografice care au fost examinate la microscop, imaginile microstructurilor fiind incluse într-un atlas metalografic, în care fiecare pagină are aspectul prezentat pentru exemplificare în figura 4.14 (propus de autorul tezei, prin prelucrarea variantei din [71], corepunzător microstructurilor oțelului  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ , livrat în stare recoaptă A, după cedarea prin fluj în anumite condiții, exprimate prin valorile mărimilor  $\sigma$ ,  $t_f$  și  $\tau_f$  marcate pe diagrama din figura 4.15 și înregistrate în tabelul 4.6).

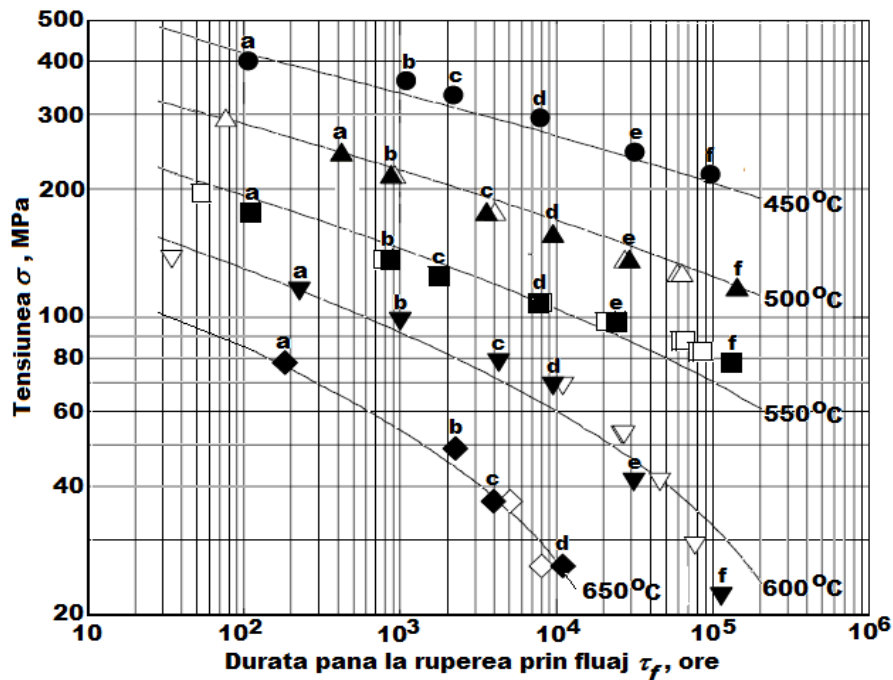


Fig. 4.15. Rezultatele programului experimental pe baza căruia s-a realizat pagina din atlasul metalografic privind comportarea la fluaj a oțelului 2¼Cr-1Mo, livrat în stare recoaptă A

#### 4.3.4. Metoda parametrului Z

Pentru cazul (ideal) în care, în cursul utilizării, materialul tubular nu își modifică compoziția chimică, iar condițiile de temperatură și presiune se mențin constante ( $t_f = ct.$  și  $p_f = ct.$ ) se poate aplica metoda parametrului Z [59, 79].

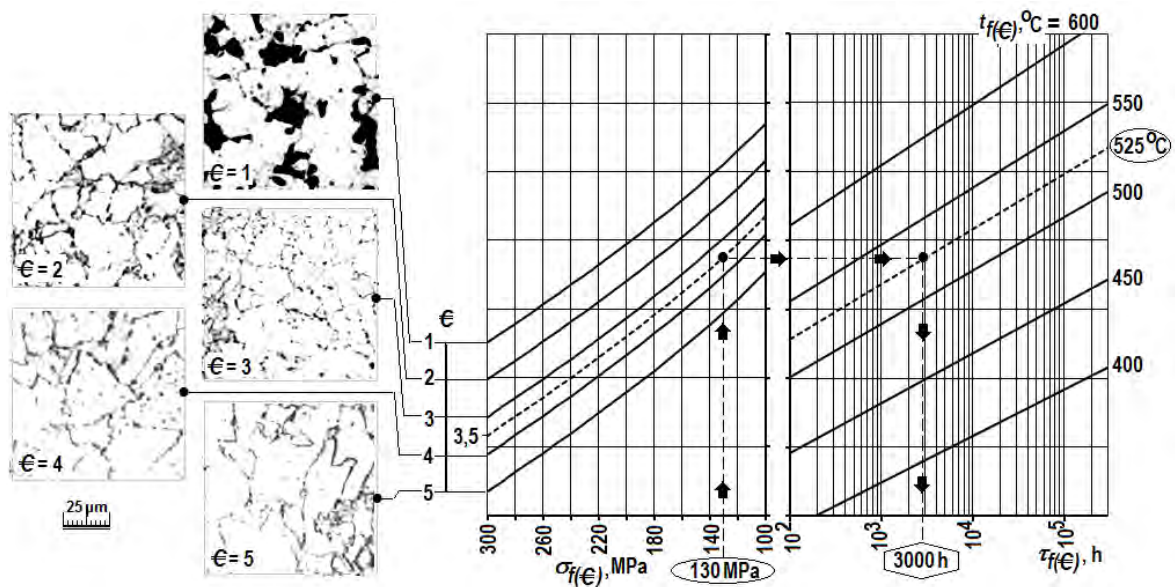


Fig. 4.17. Schema de utilizare a metodei parametrului Z pentru estimarea duratei de viață reziduală a materialului tubular realizat din oțel 10CrMo5-5

Schema de utilizare a metodei parametrului  $Z$  în cazul materialului tubular din oțel tip 10CrMo5–5 este redată în figura 4.17, pe care sunt reprezentate (pentru exemplificare) și reperetele unui studiu de caz privind estimarea duratei de viață reziduală  $\tau_{f(\epsilon)}$  a unor componente de material tubular (din oțel tip 10CrMo5–5), pentru care, la ultima revizia tehnică efectuată, pe baza examinării microstructurii, s-a alocat indicatorului nivelului de degradare prin fluaj valoarea  $\epsilon = 3,5$ , iar regimul lor de exploatare viitoare este ( $t_{f(\epsilon)} = 525$  °C;  $\sigma_{f(\epsilon)} = 130$  MPa); se observă că pentru componentele de material tubular considerate în studiul de caz durată de viață reziduală este  $\tau_{f(\epsilon)} \cong 3000$  ore.

Schema de utilizare a metodei parametrului  $Z$  în cazul materialului tubular din oțel turnat centrifugal 25Cr–25Ni, redată în figura 4.17, are reprezentate (pentru exemplificare) și reperetele unui studiu de caz privind estimarea duratei de viață reziduală  $\tau_{f(\epsilon)}$  a unor componente de material tubular (din oțel tip 25Cr–25Ni), pentru care, la ultima revizia tehnică efectuată, pe baza examinării microstructurii, s-a alocat indicatorului nivelului de degradare prin fluaj valoarea  $\epsilon = 3,5$ , iar regimul lor de exploatare viitoare este ( $t_{f(\epsilon)} = 870$  °C;  $\sigma_{f(\epsilon)} = 18$  MPa); se observă că pentru componentele de material tubular considerate în studiul de caz durată de viață reziduală este  $\tau_{f(\epsilon)} \cong 6000$  ore.

#### 4.4. Concluzii

Cercetările prezentate în acest capitol, privind evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a serpentinelor cupatoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice prin determinării periodice ale compoziției chimice și microstructurii, au permis desprinderea următoarelor concluzii:

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor nu suferă în cursul utilizării modificări esențiale ale matricei lor microstructurale, care rămâne feritică, în cazul celor din oțeluri Cr – Mo sau austenitică, în cazul realizării lor din oțeluri inoxidabile Cr – Ni sau din superaliaje de tip Ni – Fe – Cr; dacă matricea structurii de livrare a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor (din oțeluri de tip C–Mn, Mo sau Cr – Mo) conține și formațiuni perlitice, bainitice sau martensitice, acestea suferă (în cursul menținerii îndelungate la temperatură ridicată) procese de transformare în ferită și carburi sferoidale.

➤ Modificările de structură în cursul utilizării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor se referă în principal la fazele secundare, cu ponderi procentuale mici, care se distribuie la marginea sau în interiorul cristalelor matricei feritice sau austenitice: carburi, nitruri sau carbonitruri (ale elementelor principale de aliere: Cr, Mo sau ale unor elementelor de aliere suplimentară, introduse în cantități mici, pentru îmbunătățirea caracteristicilor de utilizare ale țevilor și componentelor serpentinelor, cum sunt: Ti, Nb, V, W, Si, B) și compuși intermetalici.

➤ Modificările de structură, care se realizează prin mecanisme bazate pe difuzia componentelor de aliere (C, Cr, Mo, Ni, Ti, Nb, N etc.) și pe activitatea lor termodinamică (care determină posibilitățile ca acestea să formeze compuși chimici), prezintă următoarele particularități: a. sunt dependente de domeniile de temperatură în care sunt utilizate țevile și celelalte componente ale serpentinelor și, respectiv, în care sunt stabile fazele (carburi, nitruri etc.) din structura materialului acestora; b. pot fi influențate de activitatea fluidelor vehiculate prin țevile și celelalte componente ale serpentinelor și/sau atmosferei din cuptorul în care sunt utilizate acestea (care pot să contribuie la declanșarea și intensifică procesele de generare și de transformare a fazelor secundare); c. fazele secundare cu formă globulară și dimensiuni mici, uniform distribuite în cristalele matricei îmbunătățesc comportarea la fluaj a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor, în timp ce fazele secundare dispuse sub formă de rețea la marginea cristalelor matricei, au efect fragilizant și grăbesc fisurarea și



cedarea prin fluaj a acestora; d. menținerea îndelungată la temperatură ridicată a țevilor și celorlalte componente ale serpentinei determină coalescența particulelor de faze secundare și accelerează cedarea prin fluaj a acestora.

➤ Aprecierea stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinei cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și de microstructură (efectuate periodic, cu ocazia reviziilor tehnice sau reparațiilor curente) implică cunoașterea unor corelații experimentale pertinente între următoarele categorii de factori: a. compoziția chimică, microstructura și caracteristicile mecanice ale țevilor sau componentelor serpentinei; b. regimul tehnologic de utilizare a țevilor sau componentelor serpentinei, definit prin: temperatura  $t_f$ , presiunea  $p_f$ , natura și activitatea chimică / agresivitatea fluidului tehnologic transportat; c. natura și activitatea chimică / agresivitatea atmosferei din cuptorul în care se află serpentina; d. durata de viață / durabilitatea la fluaj  $\tau_f$  a țevilor sau componentelor serpentinei (în condițiile definite de categoriile de factori descrise mai înainte).

➤ Pentru a putea aprecia (cu un nivel de încredere acceptabil) starea tehnică și durata de viață reziduală a tubulaturii cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și de microstructură, efectuate periodic, după diferite etape / campanii /durate de exploatare, cu ocazia reviziilor tehnice sau reparațiilor curente, trebuie elaborate proceduri pertinente, bine fundamentate științific, care trebuie să aplice principiile propuse, justificate și comentate în acest capitol.

➤ Principalele metode de evaluare a stării tehnice a componentelor serpentinei cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice pe baza determinărilor periodice privind compoziția chimică și microstructura acestora sunt cele prezentate în acest capitol: a. metoda nivelurilor / gradelor sau claselor de degradare; b. metoda bazată pe aplicarea teoriei cinetice modificate, care utilizează parametrii microstructurali; c. metoda bazată pe construirea și utilizarea atlaselor metalografice; d. metoda parametrului Z. Analiza, comentarea și elaborarea procedurilor de aplicare ale acestor metode a evidențiat că nivelul de încredere al rezultatelor aplicării lor și al deciziilor privind starea tehnică a componentelor serpentinei cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice crește odată cu: a. creșterea volumului determinărilor de compoziție chimică și examinărilor metalografice și cu complexitatea procedeele de efectuare a acestora (folosirea spectrometrelor de mare rezoluție, examinarea metalografică completă, nu numai prin microscopie optică, dar și prin microscopie electronică etc.) ; b. investigarea în paralel cu examinările de microstructură și a urmelor specifice degradării prin fluaj (aparitia microgolurilor și coalescența acestora, formarea microfisurilor etc.); c. coroborarea informațiilor obținute prin determinările de compoziție și microstructură cu cele furnizate de efectuarea unor încercări mecanice sau tehnologice (de tipul celor prezentate în următorul capitol al prezentei teze de doctorat).

## 5. EVALUAREA STĂRII TEHNICE SI DURATEI DE VIAȚĂ REMANENTE A TUBULATURII CUPTOARELOR PRIN ÎNCERCĂRI MECANICE ȘI TEHNOLOGICE

### 5.1. Modificările proprietăților mecanice ale tubulaturii în cursul exploatării cuptoarelor

Funcționarea la temperaturi ridicate, peste limita producerii fenomenului de fluaj, în medii active din punct de vedere chimic produce modificarea proprietăților mecanice ale țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor. Fluidul tehnologic vehiculat prin tubulaturile cuptoarelor determină carburarea țevilor din oțel și depunerea unui strat de cocs pe suprafața lor interioară [1, 18, 45, 93, 145], în timp ce gazele din interiorul cuptoarelor provoacă oxidarea serpentinelor și a celorlalte componente ale tubulaturilor [13, 101, 122],

### 5.2. Principiile și criteriile evaluării stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice

Durata de viață remanentă a materialului tubular nu se poate estima fără cunoașterea și/sau determinarea experimentală a caracteristicilor de calitate efective ale acestuia (compoziție chimică, microstructură, caracteristici de rezistență mecanică și tenacitate, caracteristici de comportare la fluaj și oboseală) atât în starea inițială, respectiv la livrarea țevilor noi cât și după diferite perioade de funcționare.

Pentru a evidenția starea tehnică cu un grad ridicat de acuratețe, la fiecare inspecție periodică se vor preleva eșantioane din materialul tubular exploatat pentru a putea fi testate, rezultatele obținute trebuind să fie comparate cu valorile obținute pe eșantioane supuse aceluiași teste, dar prelevate din material tubular nou.

### 5.3 Metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice

Pentru studierea efectelor mediului de lucru și a influențelor parametrilor de funcționare asupra materialului tubular aflat în exploatare, s-au folosit probe (acolo unde a fost posibil) atât din material tubular nou (nefolosit în exploatare) cât și probe prelevate din materialul tubular cu diferite perioade de funcționare, încercându-se de fiecare dată să se facă corelații între durata de funcționare, parametrii de lucru și starea tehnică la momentul efectuării încercărilor efectuate.

Epruvetele cu cea mai mare pondere în testele realizate în prezenta lucrare provin din materialul tubular din două cuptoare, H1 și H3 (v. fig. 5.1), din cadrul instalației de Reformare Catalitică din Rafinăria Petrobrazi – OMV PETROM, tubulatura din zona de radiație pe care

s-au efectuat încercări fiind confecționată din oțelul X10CrMoVNb9-1 (P91) având diametrul exterior  $D_{e,r} = 88,9$  mm și grosimea de perete  $s_r = 7,5$  mm, iar cea din zona de convecție din oțel X11CrMo5 (P5) cu diametrul exterior  $D_{e,c} = 220$  mm și grosimea de perete  $s_c = 15$  mm.



Fig. 5.1. Material tubular provenit din cuptoarele H1 și H3 folosit pentru prelevarea probelor testate

Pentru materialul tubular din cuptoarele H1 și H3 folosit pentru prelevarea eşantioanelor pe care s-au efectuat teste s-au determinat principalele caracteristici geometrice (v. tabelul 5.2).

Tabelul 5.2. Caracteristicile geometrice ale materialului tubular al din care s-au prelevat eşantioane

Caracteristici geometrice	H1				H3			
	H1T		H1C		H3T		H3C	
$L$ , mm	366,5	727	220	370	727	400	320	800
$D_{e,r}$ , mm	89...89,4	88,8...89	89,2...89,8	89...89,5	89...89,15	88,7...89,5	88,15...89,3	87,8...88,5
$s$ , mm	7,8...8,04	7,5...7,9	7,6...8,4	7,5...8	6,4...6,72	7,5...8,3	7,8...8,04	7,7...8,39

Luând în calcul metodologiile descrise în literatura de specialitate [81, 124, 140], principalele metode de evaluare a stării tehnice bazate pe încercări experimentale efectuate de autorul tezei în cursul cercetărilor întreprinse sunt:

### 5.3.1. Încercarea la tracțiune

Încercările s-au executat în conformitate cu prevederile din [193] înregistrându-se pentru fiecare epruvetă curba caracteristică convențională la tracțiune  $\sigma = f(\varepsilon)$ ,  $\sigma$  fiind tensiunea mecanică convențională  $\sigma = F/S_0$  (unde  $F$  este forța de tracțiune aplicată epruvetei, iar  $S_0$  aria secțiunii transversale inițiale a acesteia), iar  $\varepsilon$  – deformația specifică procentuală produsă epruvetei de aplicarea forței de tracțiune  $F$ , deformația având valoarea  $\varepsilon = 100(L - L_0)/L_0 = 100\Delta L/L_0$  (unde  $L_0$  este distanța dintre reperele marcate în porțiunea calibrată a epruvetelor înainte de încercare  $L_0 = 50,8$  mm = 2 in, iar  $L$  – distanța dintre aceleași repere la aplicarea pe epruvetă a forței de tracțiune  $F$ ).



Fig. 5.6. Aspectul epruvetelor prelevate din oțelul P91 înainte și după încercarea la tracțiune

Încercarea la tracțiune a probelor H1 și H3 nu a putut reda informații despre caracteristicile materialului ci mai degrabă despre fragilitatea sporită și starea de degradare accentuată a tubulaturilor din care au fost extrase respectivele epruvete, acestea crapând în bacurile mașinii din pricina tensiunilor de strângere generate de bacuri.

În cazul epruvetelor notate H2, în urma încercărilor la tracțiune s-au determinat principalele caracteristici ale oțelului din care sunt fabricate, respectiv,  $R_{10,5}$ ,  $R_m$ ,  $A_f$  și s-a calculat raportul  $R_{10,5}/R_m$  valorile obținute și sumarizate în tabelul 5.3 fiind superioare valorilor minime admisibile prescrise de standardul [167]. Folosind înregistrările experimentale exportate din softul mașinii de probă s-a construit în Microsoft Excel curba caracteristică convențională la tracțiune (CCCT) rezultată în urma încercării.

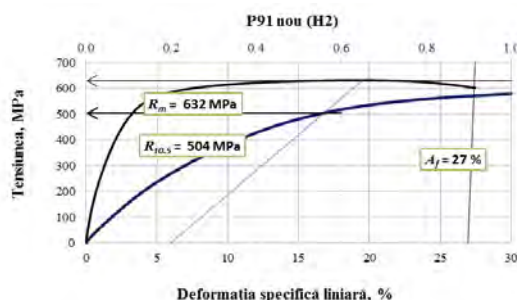


Fig. 5.4. CCCT a oțelului P91 corespunzătoare probei prelevate din material tubular nou

În cazul țevilor confecționate din oțelul P5 s-au extras 2 epruvete, una provenind din tubulatura zonei de convecție (notată P5v) și cealaltă din material tubular nou (notată P5n). La efectuarea testelor nu s-a repetat problema întâlnită anterior, ceea ce a oferit o primă ipoteză asupra efectelor diferite ale degradării, practic în aceleași medii de lucru, dar la temperaturi diferite, pentru fiecare dintre probe (v. fig. 5.5) putându-se construi curbele caracteristice de tracțiune redată în figura 5.6, pe baza datelor experimentale înregistrate de mașina de încercări pe care s-au efectuat testele.

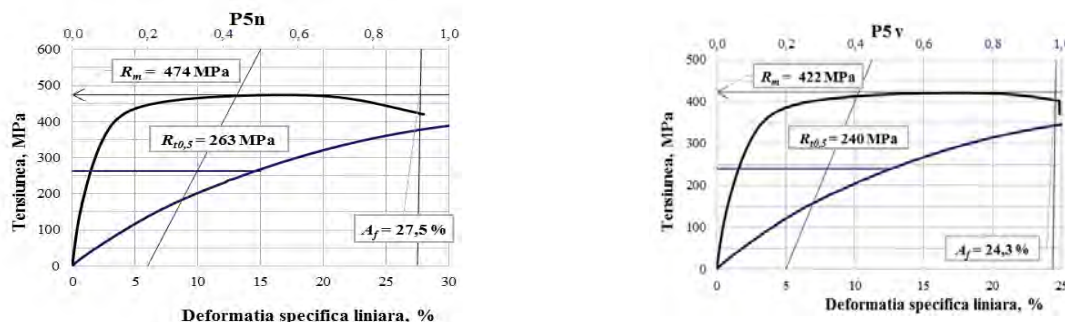


Fig. 5.6. CCCT a probelor din oțelul P5

La fel ca în cazul probei H2, pentru P5 n și P5 v s-au determinat caracteristicile principale ale oțelului din care sunt fabricate ( $R_{t0,5}$ ,  $R_m$ ,  $A_f$ ), valorile obținute fiind redată în tabelul 5.3.

**Tabelul 5.3.** Valorile caracteristicilor mecanice pentru materialele epruvetelor încercate

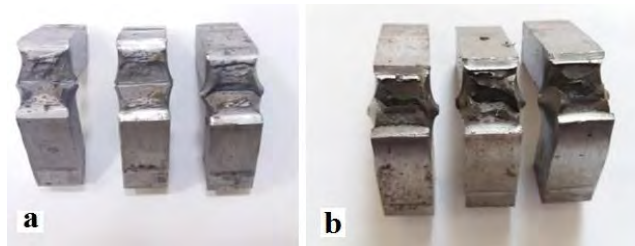
Epruveta	Caracteristicile epruvetei			Caracteristicile mecanice determinate				
	$a$ , mm	$b$ , mm	$S_0$ , mm <sup>2</sup>	$R_{t0,5}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{eH}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{t0,5}/R_m$	$A_f$ , %
<b>H2</b>	12	7,5	90	504	-	632	0,79	27
<b>P5 n</b>	12	14	168	263	-	474	0,55	27,5
<b>P5 v</b>	12	14	168	240	-	422	0,56	24,3
Epruveta	Caracteristicile epruvetei		Caracteristicile mecanice determinate					
	$L_0$ , mm	$S_0$ , mm <sup>2</sup>	$R_{eH}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{eL}$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_m$ , N/mm <sup>2</sup>	$R_{eH}/R_m$	$A_f$ , %	
<b>1</b>	40	50	417	336	485	0,86	32,0	
<b>2</b>	40	50	409	352	493	0,83	26,0	

### 5.3.2. Încercarea la încovoiere prin șoc

Încercarea la încovoiere prin șoc s-a realizat în conformitate cu prevederile din [191] pe epruvete prelevate din țevi confecționate din oțelurile P5 și P91 utilizând pendulul Charpy Walter+Bai (v. fig. 5.8. a), cu energia inițială  $W_0 = 300$  J, dotat cu dispozitiv auxiliar de prelucrare prin mortezare a creștăturilor în V ale epruvetelor (v. fig. 5.8. b).

**Tabelul 5.4.** Rezultatele încercării la încovoiere prin șoc a epruvetelor prelevate din oțelul P91

Proba	Epruveta	$s_e$ , mm	Rezultatele încercării epruvetelor		
			$KV_i$ , J	$KV_e$ , J	$0,75KV_e$ , J
<b>P5 nou</b> $s = 15$ mm	P5n.1	10	142	141	105,75
	P5n.2		150		
	P5n.3		<b>131</b>		
<b>P5 vechi</b> $s = 15$ mm	P5v.1		121	120,33	90,25
	P5v.2		<b>117</b>		
	P5v.3		123		



**Fig. 5.9.** Aspectul suprafețelor de rupere ale epruvetelor din oțelul P5 încercate la încovoiere prin șoc: a. țevă nouă; b. țevă folosită

Rezultatele obținute la încercarea la încovoiere prin șoc sunt prezentate în tabelul 5.4 pentru probe realizate din oțelul P5, respectiv tabelul 5.5 pentru probe realizate din oțelul P91, iar aspectul suprafețelor de rupere ale epruvetelor încercate este redat în figurile 5.9 și 5.10.



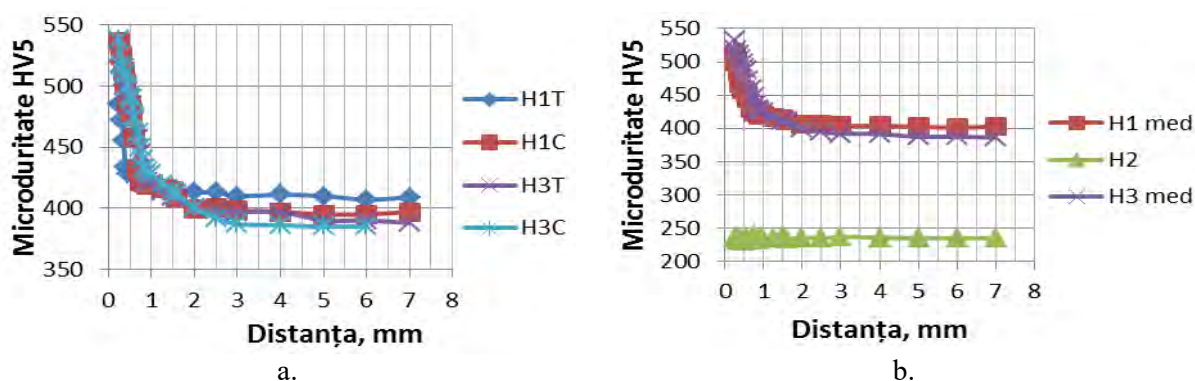
**Fig. 5.10.** Aspectul suprafețelor de rupere ale epruvetelor din oțelul P91 încercate la încovoiere prin șoc: a) țevă nouă (H2); b) H1; c) H3

**Tabelul 5.5.** Rezultatele încercării la încovoiere prin șoc a epruvetelor prelevate din oțelul P91

Proba	Epruveta	$s_e$ , mm	$k_r$	Rezultatele încercării epruvetelor			Energia de rupere pe epruvete normale	
				$KV_{e,i}$ , <sup>a)</sup> J	$KV_e$ , J	$0,75KV_e$ , J	$KV_i$ , J	$KV$ , J
<b>H2</b> $s = 7,5$ mm	H2.1	5	2	<b>88</b>	95,3	71,47	176	190,6
	H2.2			97			194	
	H2.3			101			202	
<b>H1</b> $s = 7,5$ mm	H1.1			48	47	35,25	96	94
	H1.2			<b>42</b>			84	
	H1.3			51			102	
<b>H3</b> $s = 7,5$ mm	H3.1			41	42,66	32	82	85,3
	H3.2			47			94	
	H3.3			<b>40</b>			80	

### 5.3.3. Determinarea durității materialului tubular

Încercarea s-a realizat în conformitate cu prevederile din [192] folosindu-se microdurimetru Emcotest DuraScan 20 (v. fig. 5.11), cu sarcini de testare cuprinse între 0,01 și 10 Kgf, pentru probe supuse încercărilor alegându-se încărcarea de 5 Kgf.



**Fig. 5.12.** Variația microdurității HV5 pe grosimea de perete:

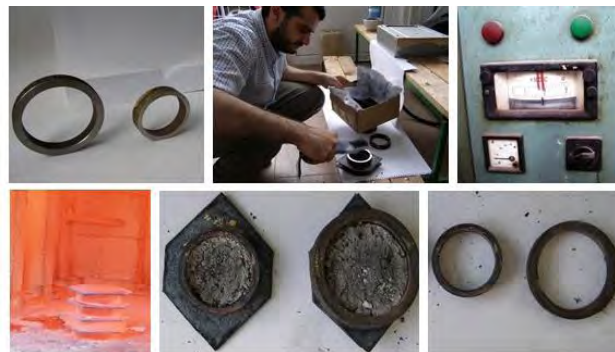
a. evidențiată pe eşantioanele prelevate din H1 și H3

b. evidențiată prin valorile medii din H1 și H3 în comparație cu H2

**Tabelul 5.6.** Valorile determinate experimental prin încercarea la duritate a eșantioanelor prelevate din materialul tubular fabricat din oțelul P91

Distanța pe grosime de la interior la exterior [mm]	Valoarea microdurității HV5						
	H1T	H1C	$H1_{med}$	H2	H3T	H3C	$H3_{med}$
0,25	485	536	510,5	235	526	538	532
0,30	472	525	498,5	237	519	517	518
0,35	455	512	483,5	232	507	515	511
0,40	434	503	468,5	235	500	510	505
0,45	428	487	457,5	230	496	500	498
0,50	432	485	458,5	232	490	493	491,5
0,55	430	479	454,5	234	484	490	487
0,60	430	458	444	232	472	475	473,5
0,70	428	432	430	236	457	462	459,5
0,75	427	422	424,5	240	445	450	447,5
0,80	427	422	424,5	235	433	440	436,5
0,85	425	421	423	232	427	433	430
0,90	420	419	419,5	234	422	430	426
1,00	419	419	419	236	420	428	424
1,25	416	416	416	235	413	420	416,5
1,50	416	414	415	237	410	414	412
1,60	415	409	412	234	409	412	410,5
2,00	413	399	406	236	400	400	400
2,50	413	400	406,5	235	398	392	395
3,00	410	398	404	237	397	387	392
4,00	411	397	404	236	397	386	391,5
5,00	410	395	402,5	235	390	385	387,5
6,00	407	395	401	235	390	385	387,5
7,00	409	397	403	235	388	385	386,5

Pentru un studiu mai amplu al influenței carburării asupra tubulaturilor, cercetările întreprinse s-au îndreptat spre carburarea accelerată artificială a unor probe debitate din material tubular nou.



**Fig. 5.13.** Carburarea inelelor prelevate din materialului tubular nou

Astfel, eșantioane de tip inel prelevate din țevi confecționate din oțelurile P5 și P91, nefolosite în exploatare s-au supus unui tratament termic de carburare excesivă; în interiorul acestora s-a adăugat un amestec de 70% mangan și 30%  $BaCO_3$ , inelele fiind menținute o durată  $\tau_m = 48$  ore, la temperatura  $t_i = 900$  °C (v. fig. 5.13) ulterior fiind curățate, cântărite și supuse testelor pe durimetrul folosit la încercările anterior efectuate.

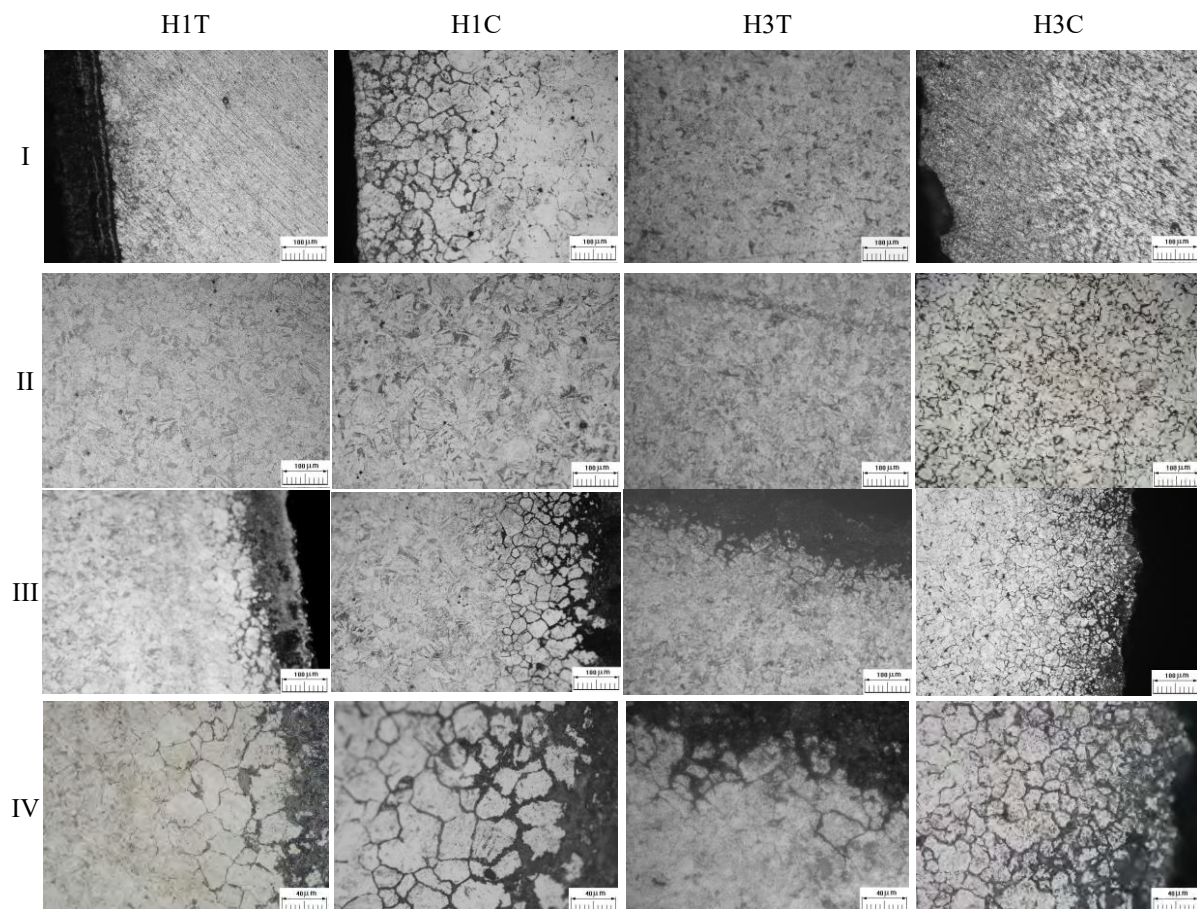
### 5.3.4. Încercarea la aplatisare

Pentru determinarea stării tehnice prin aplatisare, încercare ce trebuie să fie în conformitate cu prevederile [194], se utilizează epruvete tip tronson de țevă, cu determinarea aplatisării până la apariția fisurilor, figura 5.16 redând schema de principiu a încercării.



**Fig. 5.19.** Comportarea la aplatisare a inelelor din material tubular nou pentru:  
a. probe din oțel P5; b. probe din oțel P91

Figura 5.19 arată comportarea inelelor prelevate din material tubular nou. Se remarcă faptul că suprafețele lor interioare vin în contact, una cu cealalta, inelele aplatisându-se complet. S-au analizat atent zonele de la orele 3 și 9 de pe inelele testate și nu s-au descoperit fisuri vizibile în material, aspectul fiind asemanator cu cel din figura 5.18 d.



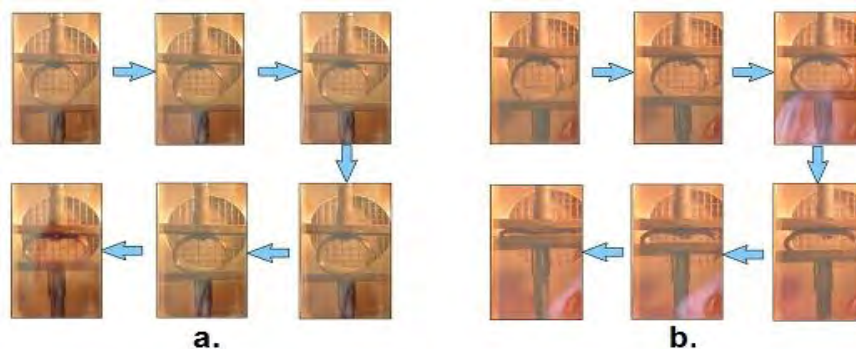
**Fig. 5.23.** Structurile metalografice ale inelelor din H1 și H3  
I - Exterior oxidat; II - Zona centrală a tubulaturii; III – Interior carburat; IV – Detaliu zonă carburată



Au fost extrase eșantioane din inelele aplatizate din materialul tubular din H1 și H3 pentru a se examina la microscop. Analiza efectuată pe probele din H1T, H1C, H3T și H3C, folosind recomandări din [20, 114] a evidențiat elementele structurale prezentate în figura 5.23, conducând la următoarele concluzii:

- se observă separări de carburi la limitele grăunților pe pereții tuburilor cuptoarelor H1 și H3;
- se evidențiază creșterea cantității de carburi dinspre suprafața interioară a tubului (eșantioanele H1C și H3C fiind puternic carburate la interior) spre suprafața exterioară, unde se constată și oxidarea limitelor dintre grăunți, în special a probei H1C;
- pe eșantioanele H1C și H3C se observă separări de carburi la limitele grăunților.

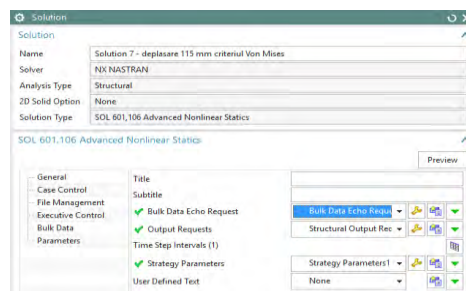
Întrucât mașina INSTRON 8801 este echipată cu un cuptor ce permite efectuarea de încercări mecanice la cald, s-au făcut teste la inelele debitate din tubulatura din zona de radiație a cuptorului H1 la 400 °C (v. fig. 5.24 a) și 600 °C (v. fig. 5.24 b), cu scopul observării comportării materialului tubular degradat în exploatare. S-a constatat faptul că la inelele degradate plasticitatea crește foarte mult la temperaturi ridicate, tendința de fragilizare se estompează, astfel că, pentru o evaluare corectă a proprietăților mecanice ale țevilor și a celorlalte elemente ale tubulaturilor este necesară efectuarea de încercări prin procedee mecanice sau tehnologice la temperatură ambiantă.



**Fig. 5.24.** Comportarea la aplatizare a inelelor din tubulatura cuptorului H1 la:  
a. 400 °C; b. 600 °C

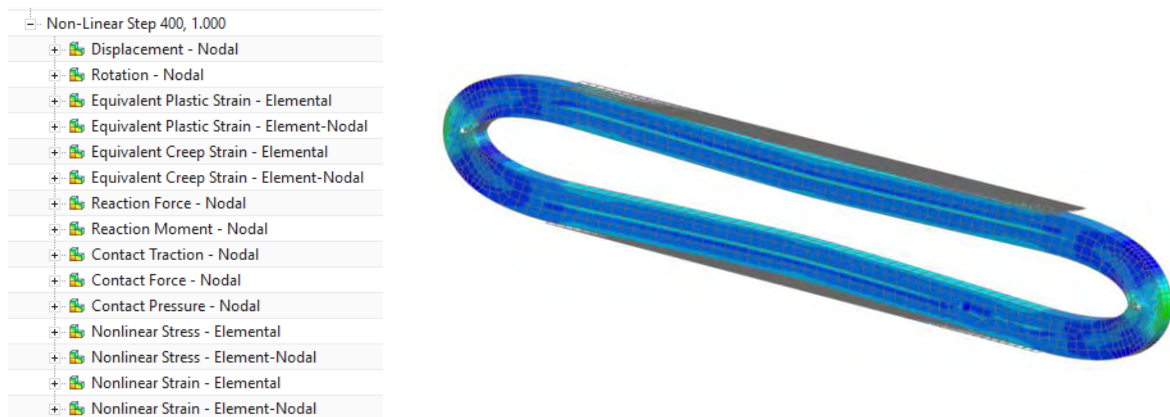
### Elemente legat de simularea aplatizării prin analiza cu elemente finite

În vederea descrierii comportării la aplatizare a inelelor debitate din materialul tubular, utilizându-se softul NX Nastran versiunea 10.0 s-a realizat o analiză static neliniară, folosind unele elemente redată în [94] ce returnează o soluție de tipul SOL 601,106 Advanced Nonlinear Statics, după cum se poate observa în figura 5.26.



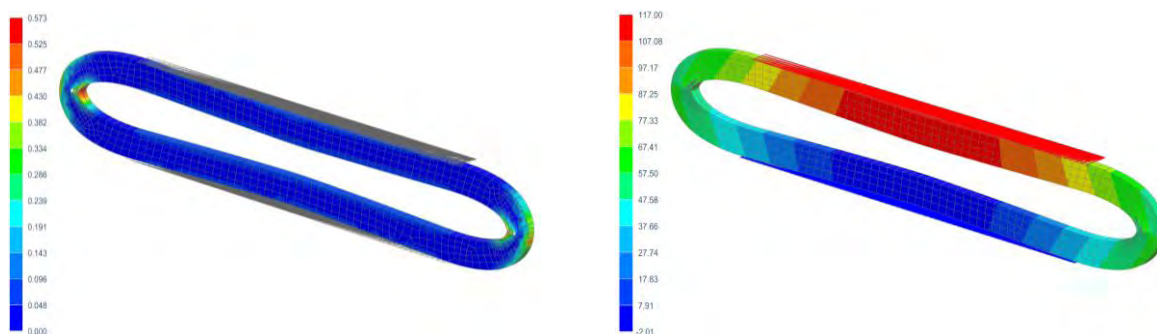
**Fig. 5.26.** SOL NX 601,106 Advanced Nonlinear Statics în cadrul programului NX Nastran v. 10.0 folosit la analiza cu elemente finite a aplatizării inelelor tubulaturilor

Pentru fiecare din punctele intermediare ale analizei, au fost obținute rezultate de tipul celor redată în figurile 5.34 și 5.35.



**Fig. 5.34.** Tipul soluțiilor și forma deformată a inelului aplatisat obținută în urma analizei cu elemente finite

După cum se poate observa în figura 5. , valorile maxime ale deformațiilor specifice echivalente Von Mises s-au obținut la orele 3 și 9 de pe inel, respectând astfel comportarea reală privind deformația însoțită în unele cazuri de fisurare la interior (v. fig. 5.21) a eșantioanelor prelevate din tubulaturile cuptoarelor, ca de altfel și tendința curbării spre interior, de partea fibrei întinse, pe direcția de aplatisare acolo unde deformațiile la aplatisare sunt maxime.



**Fig. 5.35.** Deformațiile specifice echivalente Von Mises și deformațiile pe direcția de aplatisare

### 5.3.5. Încercarea la oboseală

Pentru evaluarea comportării la oboseală a elementelor tubulaturilor, s-au realizat încercări în conformitate cu prescripțiile din [157, 196]. S-a ales varianta testării epruvetelor prelevate din oțelurile P5, P91 și 13CrMo4-5, cu principalele caracteristici geometrice redată în figura 5.36.

Pentru probele realizate din oțelurile P5 și P91 s-a realizat încercarea la oboseală atât pe epruvete fără creștături, cât și pe eșantioane prevazute cu creștături, la temperatură ambiantă dar și la o serie de temperaturi cuprinse între 400 și 600 °C, respectiv în domeniul de temperaturi caracteristic proceselor tehnologice realizate în exploatare de cuptoarele din rafinării și instalații petrochimice. În ambele variante, deși testele au implicat un număr mare de cicluri, la valori ridicate ale încărcărilor, epruvetele nu s-au rupt.

Principalele caracteristici geometrice ale epruvetelor din oțelurile P5 și P91 fără creștături încercate la temperatură ambiantă și la temperaturi de 400 și 600 °C ale materialului

tubular nou cât și informațiile privind încărcările folosite, numărul de cicluri de solictare și frecvența sunt sumarizate în tabelul 5.9.

**Tabelul 5.9.** Caracteristicile încercărilor la oboseală efectuate pe epuvetele fără crestături din oțelurile P5 și P91

P5 la $t_a$				P91 la $t_a$			
Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice	Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice
20 N	$10^6$	150 Hz	$L_t = 220$ mm $D_{z. cal} = 8$ mm	20	$10^6$	120 Hz	$L_t = 170$ mm $D_{z. cal} = 6$ mm
25 N	$0,5 \cdot 10^6$			24	$10^6$		
30 N	$0,5 \cdot 10^6$			26	$10^6$		
35 N	$0,5 \cdot 10^6$			28	$10^6$		
40 N	$0,5 \cdot 10^6$			30	$10^6$		
50 N	$0,5 \cdot 10^6$			35	$1,5 \cdot 10^6$		
55 N	$2,5 \cdot 10^6$			40	$1,5 \cdot 10^6$		
P5 la 400 °C				P91 la 400 °C			
Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice	Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice
10 N	$10^6$	160 Hz	$L_t = 220$ mm $D_{z. cal} = 8$ mm	7,5	$10^6$	120 Hz	$L_t = 170$ mm $D_{z. cal} = 6$ mm
15 N	$10^6$			10	$10^6$		
20 N	$10^6$			15	$10^6$		
25 N	$10^6$			20	$10^6$		
30 N	$10^6$			120 Hz	22,5		
	$3 \cdot 10^6$	25	$2,5 \cdot 10^6$				
P5 la 600 °C				P91 la 600 °C			
Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice	Încărcare pe braț	Număr cicluri	Frecvența	Caracteristici geometrice
5,5 N	$10^6$	150 Hz	$L_t = 220$ mm $D_{z. cal} = 8$ mm	6	$10^6$	140 Hz	$L_t = 170$ mm $D_{z. cal} = 6$ mm
7,5 N	$10^6$			10	$10^6$		
9,5 N	$10^6$			12	$10^6$		
11,5 N	$10^6$			14	$10^6$		
13,5 N	$2 \cdot 10^6$			16	$1,5 \cdot 10^6$		
15,5 N	$2 \cdot 10^6$			18	$1,5 \cdot 10^6$		
21,5 N	$2 \cdot 10^6$			20	$2 \cdot 10^6$		

### 5.3.6. Încercarea materialului tubular pe dispozitivul dorn – inel

Autorul propune o soluție [106] proprie privind testarea elementelor tubulaturilor cuptoarelor în vederea determinării stării tehnice din momentul inspecțiilor periodice ale cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice.

S-a conceput un stand de încercări special pentru țevile confecționate din oțelul P91 analizat, compus dintr-un dorn și un inel alcătuit din trei bucăți alcătuit din 3 bucăți dispuse la 120° cu diametrul exterior de 73 mm ,confecționat din oțelul C45i. Dornul are unghiul la vârf de 10° și o lungime de 100 mm (v. fig. 5.40); desenele de execuție ale ansamblului și ale elementelor componente ale sale se găsesc în Anexa 4 a prezentei lucrări.

După cum se poate observa în figura 5.44, ruperea inelelor din materialul tubular nefolosit (țevă nouă) s-a produs la deplasări radiale de 30 mm și forțe de 135 kN. În cazul inelelor prelevate din materialul tubular din exploatare (țevi cu diferite perioade de funcționare), deplasarea radială a fost net inferioară, cuprinsă între 10 și 17 mm, la valori ale forței cuprinse între 80 și 190 kN. Astfel, inelele din materialul tubular supus procesului de carburare în timpul exploatării au proprietăți mecanice mai slabe, concluzie dovedită și prin

efectuarea celorlalte încercări realizate în prezentul capitol. Aspectul inelelor după rupere se poate vedea în figura 5.43.

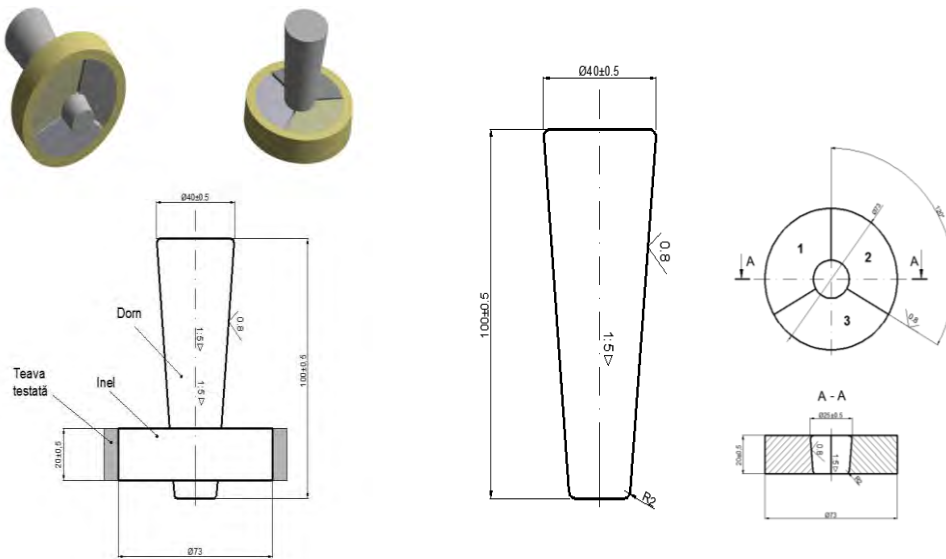


Fig. 5.40. Caracteristicile dimensionale ale ansamblului folosit pentru testarea inelelor prelevate din materialul tubular al cuptoarelor

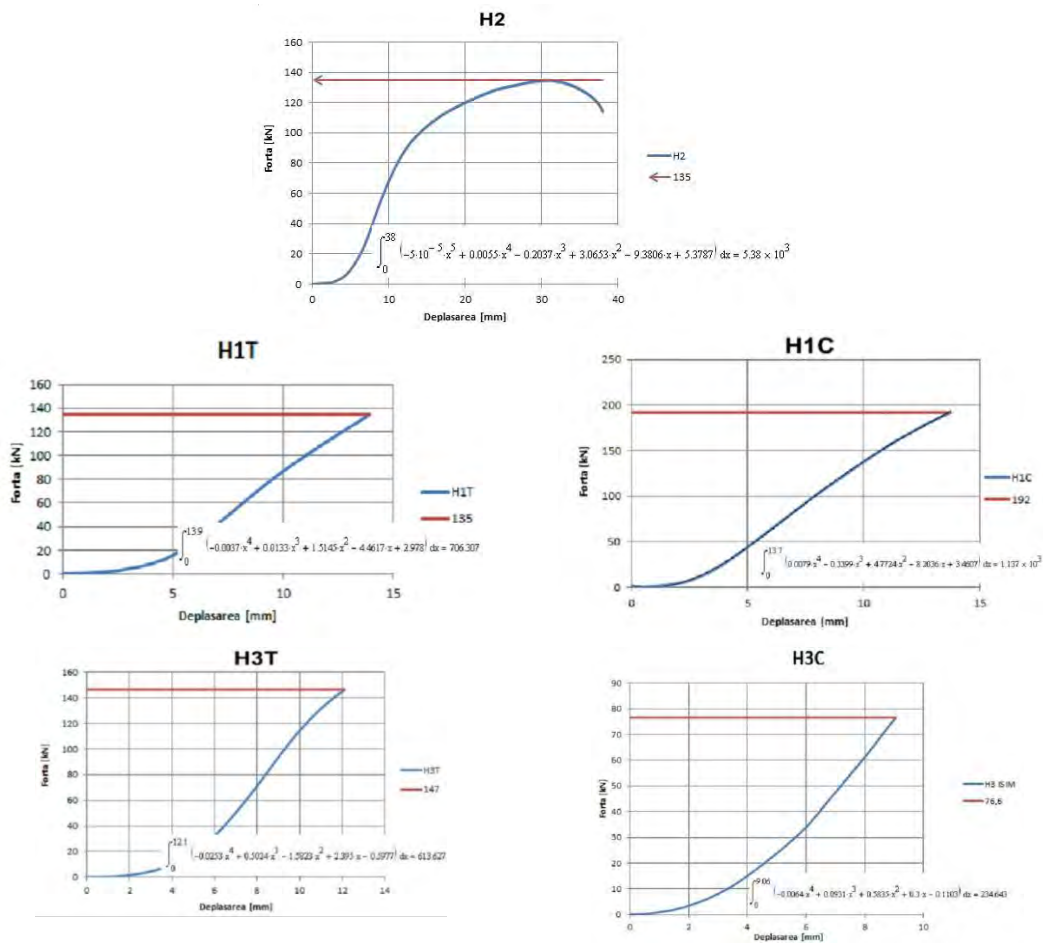


Fig. 5.44. Variația dintre forța de apăsare și deplasarea bacurilor pentru inelele testate cu dispozitivul dorn – inel

Criteriul energetic, propus în cadrul încercării de aplatizare a inelelor se verifică și în acest caz, energiile de rupere, calculate prin aria de sub grafic a curbelor, folosind aceeași metodologie ca în cazul aplatizării inelelor, având valori extrem de reduse în comparație cu materialul tubular nou.

Rezultatele obținute în urma testării inelelor atestă faptul că fenomenele specifice de degradare survenite în urma exploatării la temperaturi ridicate unde se manifestă fenomenul de fluaj, în medii care favorizează carburarea și oxidarea au un rol hotărâtor asupra degradării tubulaturilor cuptoarelor. Micșorarea efectivă a grosimii de perete și modificarea compoziției chimice a oțelurilor din care tubulaturile sunt confecționate scad considerabil proprietățile de tenacitate ale materialului tubular, reducându-i considerabil durata de viață.

Autorul propune programul propriu de monitorizare conceput în [107], pe baza studiilor din literatura de specialitate [25, 40, 52...54, 111, 118, 138, 151] în vederea evaluării stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice.

Reprezentarea schematică a programului de monitorizare a materialului tubular al cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice, propusă de autor este redată în figura 5.46. Se impune cunoașterea caracteristicilor mecanice ale tubulaturii la fiecare inspecție periodică, astfel că, la fiecare nou pas al monitorizării sunt necesare teste care să evidențieze dacă există modificări ale proprietăților materialului tubular. Cumulând rezultatele testelor cu evaluarea degradării la un anumit moment, se poate estima durata de viață remanentă a tubulaturii.

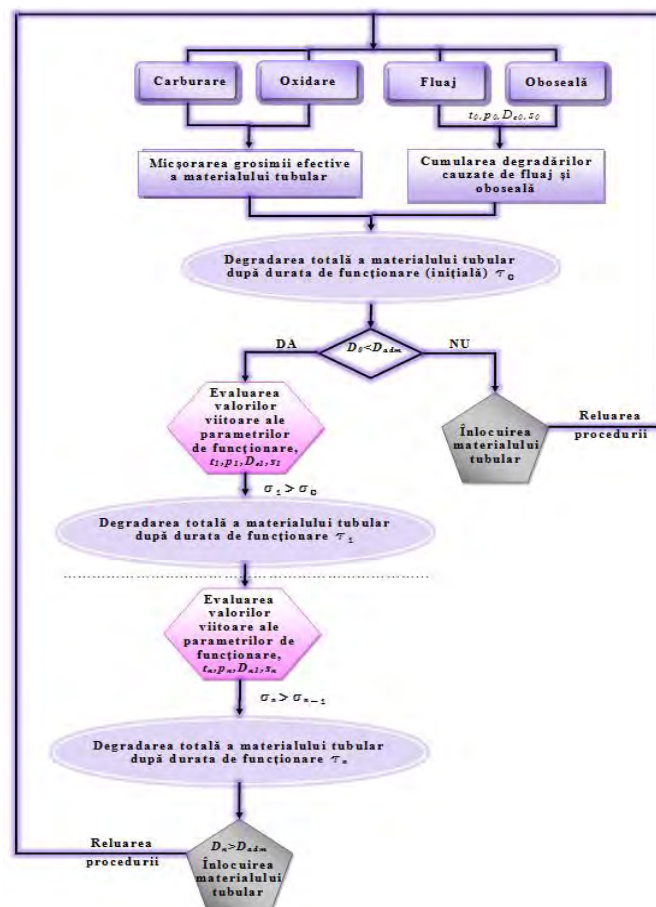


Fig. 5.46. Programul de evaluare a stării materialului tubular

## 5.4. Concluzii

Cercetările din acest capitol, privind evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice prin încercări mecanice și tehnologice permit formulare următoarelor concluzii:

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor suferă în cursul exploatării modificări notabile ale proprietăților mecanice; s-a remarcat o fragilitate accentuată a elementelor cu diferite perioade de exploatare, apărută ca urmare a funcționării la temperaturi peste pragul producerii fenomenului de fluj concomitent cu carburarea zonelor ce intră în contact direct cu fluidul tehnologic, constituit dintr-un amestec de hidrocarburi, care la temperaturi ridicate poate difuza în stratul superficial al tubulaturilor;

➤ Aprecierea stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice care se efectuează cu ocazia reviziilor periodice, implică efectuarea unor proceduri specifice necesare estimării gradului de degradare prin: a. inspecții vizuale sau controale nedistructive, cu unde sonore, lichide penetrante, prin radiografieri sau profilometrie și monitorizarea continuă a temperaturii tubulaturii prin dispozitive cu infraroșu pentru identificarea zonelor cu defecte; b. măsurarea elementelor geometrice deoarece tubulatura este susceptibilă la modificări datorate supraîncălzirii localizate sau efectelor coroziunii și eroziunii; c. încercări mecanice de tracțiune, duritate, oboseală, aplatisare, ș.a., pentru a se putea stabili eventualele modificări apărute în urma exploatării pentru diferite perioade de timp;

➤ Principalele metode de evaluare a stării tehnice a componentelor serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice prin încercări mecanice și tehnologice sunt cele prezentate în acest capitol, astfel: a. încercarea la tracțiune, pentru aflarea limitei de curgere (aparentă sau convențională), a rezistenței la rupere și a alungirii procentuale după rupere; b. încercări de duritate, cu scopul observării modificărilor survenite ca urmare a funcționării în medii active din punct de vedere chimic; c. încercări la oboseală, pentru posibilitatea construirii curbilor caracteristice tensiune – deformație la solicitări ciclice și curbilor de durabilitate oligociclică, deformație ciclică – durabilitate, pentru oțelurile elementelor tubulaturilor cuptoarelor; d. încercări la încovoiere prin șoc, pentru determinarea energiilor de rupere; e. încercări de aplatisare, efectuate cu scopul observării tendinței de fragilizare și pentru evaluarea plasticității și deformabilității;

➤ Pentru a putea aprecia starea tehnică la un anumit moment cu un nivel ridicat de încredere prin efectuarea de încercări mecanice și tehnologice cu ocazia reviziilor tehnice periodice, se vor respecta procedurile propuse și aplicate în acest capitol;

➤ Nu sunt necesare încercări sofisticate care să se întindă pe perioade lungi de timp și care necesită echipamente realizate cu costuri ridicate (de exemplu încercările la temperatură ridicată – tracțiune, oboseală) deoarece sunt neconcludente, datorită tendinței materialului de a-și crește plasticitatea la temperaturi ridicate, fiind suficiente încercările propuse și realizate în acest capitol, unde s-au utilizat o serie de încercări de bază făcându-se corelarea între acestea, în vederea evaluării, cu un grad ridicat de încredere a stării tehnice a tubulaturilor.

## 6. CONCLUZII. CONTRIBUȚII ORIGINALE. DIRECȚII DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

### 6.1. Concluzii

Prezenta teză de doctorat, cu tema “**CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURATEI DE EXPLOATARE A MATERIALULUI TUBULAR AL CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI INSTALAȚII PETROCHIMICE**”, și-a propus să analizeze și să soluționeze o mare parte a problemelor privind descrierea proceselor de degradare a materialului tubular al cuptoarelor din instalațiile tehnologice de prelucrare a petrolului și produselor petroliere, evidențierea factorilor principali de influență ai proceselor de degradare, alegerea rațională a calității țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor, stabilirea regimurilor optime de exploatare a cuptoarelor, care asigură maximizarea durabilității materialului tubular și minimizarea posibilității de producere a unor accidente tehnice care impun oprirea neprogramată a cuptoarelor, dezvoltarea unor metode fundamentate științific de monitorizare a stării tehnice a serpentinelor pe parcursul funcționării cuptoarelor și stabilirea metodelor de caracterizare a stării tehnice și de estimare a duratei de viață remanente pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor cuptoarelor, pe baza unor determinări experimentale, distructive sau nedistructive, care se efectuează cu ocazia reviziilor tehnice periodice ale cuptoarelor. Rezultatele cercetărilor realizate în prezenta lucrare se pot aplica în viitor în vederea creșterii siguranței în funcționare a cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice, a reducerii riscului de producere a accidentelor tehnice în cursul exploatării acestora și a obținerii unor avantaje economice importante, deoarece componentele materialului tubular sunt realizate din materiale scumpe, cu tehnologii de fabricare costisitoare și complexe, implicațiile financiare ale opririi intempestive ale cuptoarelor fiind foarte mari.

În **primul capitol al tezei – Introducere** – se definesc, noțiunile și conceptele de bază care descriu cadrul general al temei tezei de doctorat. În primă fază sunt precizate condițiile tehnice de utilizare a materialului tubular al cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice: a. temperaturi de lucru ridicate, situate în domeniul 400...700 °C în cazul cuptoarelor din rafinării și care pot ajunge în domeniul 700...900 °C în cazul cuptoarelor de piroliză; b. mediu de lucru activ, care interacționează intens cu componentele materialului tubular și produce modificarea compoziției chimice și a structurii acestora: b.1. carburarea la interior și diminuarea treptată a gradului de aliere a componentelor serpentinelor; b.2. oxidarea / arderea la exterior a componentelor care vin în contact cu atmosfera cuptoarelor; c. încărcări mecanice importante (presiunea fluidului tehnologic vehiculat prin serpentinele cuptoarelor, încărcările masice, solicitările de natură termică etc.), al căror efect de generare a tensiunilor mecanice se intensifică datorită temperaturilor de lucru ridicate și variațiilor repetate ale principalilor parametri de funcționare: temperatura și presiunea mediului de lucru vehiculat prin serpentinele cuptoarelor.

De asemenea, sunt precizate procesele de degradare ale componentelor materialului tubular în cursul exploatării: a. modificarea caracteristicilor de rezistență mecanică și de tenacitate datorită modificărilor în timp ale compoziției chimice și structurii; b. fluajul datorită temperaturilor de lucru ridicate și duratelor de exploatare îndelungate; c. oboseala datorită solicitărilor mecanice și termice cu caracter variabil.

În finalul capitolului sunt expuse procedurile originale, rezultate în urma cercetărilor efectuate, aplicabile în cadrul programelor de mentenanță ale instalațiilor tehnologice din rafinăriile de petrol, care au ajutat la atingerea obiectivelor propuse, acestea vizând: a. monitorizarea continuă a stării tehnice a materialului tubular al cuptoarelor și stabilirea fundamentată a intervalelor de timp dintre lucrările de mentenanță (revizii tehnice, reparații curente și reparații capitale); b. evaluarea stării tehnice și estimarea cu un nivel ridicat de încredere a duratei de viață reziduală a componentelor materialului tubular; c. stabilirea regimurilor de exploatare recomandate pentru exploatarea în siguranță, fără riscul apariției unor cedări intempestive a materialului tubular după fiecare lucrare de mentenanță.

**Capitolul al doilea** al tezei, având titlul *Caracteristicile constructiv-funcționale ale serpentinei cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice* a condus la formularea următoarelor concluzii:

➤ *Serpentinele* (care sunt ansambluri de țevi sau tuburi, *returbenți* sau cutii de întoarcere, *coturi* din țevă, elemente fasonate de îmbinare și/sau racordare, *plăci tubulare*, *suporturi*, *suspensii*) reprezintă unul din echipamentele cele mai importante ale cuptoarelor folosite în rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice.

➤ În funcție de instalația din care face parte cuptorul în care sunt amplasate, serpentinele sunt exploatate în condiții diferite de temperatură (temperaturile de exploatare ale serpentinei se situează în domeniul de manifestare a fenomenului de fluaj), de presiune (presiunile fluidelor de lucru constituite din amestecuri de hidrocarburi în stare de lichidă și/sau de vapori pot fi fluctuante, astfel încât solicitarea mecanică a componentelor serpentinei datorită presiunii poate fi variabilă și poate determina manifestarea fenomenului de oboseală) și de agresivitate a mediului de lucru vehiculat prin acestea (fluidele de lucru sunt active) în majoritatea cazurilor acestea putând produce fenomene de corodare și/sau de modificare (superficială sau în volum) a compoziției chimice (oxidare, cocsare, carburare etc.) și a structurii componentelor serpentinei.

➤ Forma constructivă, dimensiunile principale și particularitățile funcționale ale componentelor serpentinei cuptoarelor sunt dependente de condițiile tehnice și funcționale ale cuptoarelor în care acestea sunt amplasate; țevile și celelalte componente ale serpentinei cuptoarelor se fabrică dintr-o gamă largă de oțeluri, în lucrare sunt prezentate 14 tipuri de astfel de oțeluri, care aparțin, următoarelor grupe: grupa 1, care cuprinde oțelurile de tip C – Mn și ½Mo; grupele 5 și 6, în care se încadrează oțelurile Cr – Mo (cu adaosuri de diferite elemente de aliere); grupa 7, care cuprinde oțelurile inoxidabile feritice; grupa 8, în care se încadrează oțelurile și superaliajele inoxidabile austenitice.

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinei trebuie: a. să aibă, în funcție de tipul oțelului din care sunt fabricate, caracteristicile de compoziție chimică specifice; b. trebuie livrate în stările structurale corespunzătoare; c. să aibă garantate atât caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate și tenacitate) la temperatura ambiantă, cât și caracteristicile mecanice (de rezistență, plasticitate, tenacitate, comportare la fluaj, comportare la oboseală) în domeniul temperaturilor (ridicate) de exploatare a serpentinei.

➤ În acest capitol au fost sintetizate principalele informații privind caracteristicile mecanice (minime specificate) la tracțiune, la temperatura ambiantă  $t_a$  (limita de curgere  $R_{p0,2}$  și/sau  $R_{p1}$ , rezistența la rupere  $R_m$ , alungirea procentuală după rupere  $A$ ) și au fost prelucrate sub forma unor formule de corelare statistică informațiile privind caracteristicile mecanice (minime specificate) la diferite temperaturi  $t > t_a$ .

➤ Pentru proiectarea, construirea și monitorizarea în exploatare a serpentinei cuptoarelor este necesară și cunoașterea unor caracteristici fizice ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale acestora, atât la temperatura ambiantă cât și la cald: modulele de elasticitate longitudinală și transversală, coeficientul contracției



transversale, densitatea, coeficientul de dilatare termică, conductivitatea termică, căldura specifică și difuzivitatea termică. Prin prelucrarea datelor existente în literatura de specialitate au fost dezvoltate formule pentru determinarea acestor caracteristici la  $t > t_a$ .

➤ Deoarece prezenta teză de doctorat și-a propus găsirea soluțiilor tehnice de creștere a duratei de exploatare în siguranță a serpentinelor cuptoarelor, iar una dintre acestea are la bază evaluarea periodică a stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor, cunoașterea compoziției chimice și structurii lor metalografice inițiale (în starea de livrare de către producător) reprezintă un factor deosebit de important pentru aprecierea stării acestora după diferite perioade de exploatare. Pentru proiectarea grosimilor de perete ale țevilor cuptoarelor și pentru stabilirea duratei remanente de viață a țevilor pentru care se cunoaște istoricul lor de utilizare, standardul ISO 13704 recomandă utilizarea unor diagrame cu caracteristicile mecanice ale materialelor din care acestea se fabrică; utilizarea acestor diagrame în cadrul unor proceduri computerizate de proiectare a serpentinelor cuptoarelor și de evaluare a duratei lor de viață presupune transpunerea în formă analitică a curbelor componente.

➤ Caracteristicile tehnologice cele mai importante ale materialelor pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor, care trebuie luate în considerare la proiectarea, fabricarea și monitorizarea în exploatare a cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice, sunt cele vizând sudabilitatea și comportarea la sudare; comportarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor poate fi influențată în măsură esențială de calitatea îmbinărilor sudate dintre țevile care compun serpentinele, dintre țevi și coturile de întoarcere sau dintre țevi și plăcile tubulare. Indicațiile din acest capitol, referitoare la elaborarea procedurilor de sudare, la stabilirea variabilelor esențiale ale acestora, la stabilirea procedeelor tehnologice de sudare și a materialelor de adaos folosite la sudare sunt deosebit de utile pentru asigurarea calității îmbinărilor sudate care se execută la construirea serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice.

În **capitolul al treilea**, cu titlul *Cercetari privind solutiile tehnice de asigurare a durabilitatii serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice* principalele concuzii ce derivă din studiile și cercetările efectuate pot fi formulate astfel:

➤ Mecanismele de degradare a materialului tubular al cuptoarelor în cursul utilizării acestora în instalațiile din care fac parte sunt: fluajul, oboseala, coroziunea, eroziunea și fragilizarea (apărută datorită modificărilor structurale și/sau datorită generării unor imperfecțiuni sau defecte cu puternic efect de concentrare a tensiunilor și de reducere a tenacității); fluajul este mecanismul / procesul principal de degradare, iar interacțiunea cu mecanismele / procesele secundare (oboseala, coroziunea, eroziunea și fragilizarea) determină nivelul durabilității serpentinelor cuptoarelor.

➤ La proiectarea cuptoarelor se face mai întâi proiectarea tehnologică a serpentinei, care conduce la stabilirea / adoptarea diametrului nominal al materialului tubular din care se realizează diferitele zone specifice ale serpentinei și la stabilirea lungimii serpentinei în aceste zone, după care se trece la proiectarea mecanică a serpentinei, care constă în a stabili, pentru fiecare zonă specifică a acesteia, grosimea de perete a materialului tubular; pentru proiectarea mecanică a serpentinelor se recomandă a se utiliza procedura descrisă și produsul informatic aferent, care asigură aplicarea operativă a acesteia. După proiectarea primară a serpentinelor se trece la verificarea soluției de proiectare, prin evaluarea / estimarea comportării serpentinelor la acțiunea proceselor de degradare care se manifestă cursul exploatării lor; se ia în considerare procesul (principal) de degradare prin fluaj, dar și interacțiunea acestuia cu procesele de degradare secundare (oboseala, coroziunea etc.).

➤ Comportarea în condiții de fluaj a țevilor sau componentelor serpentinelor trebuie evaluată considerând atât istoria exploatării acestora (funcționarea înainte de momentul la

care se face analiza), cât și cerințele de operare viitoare. Istoria exploatării țevelor sau componentelor serpentinelor poate fi elaborată (în termenii solicitărilor mecanice și temperaturilor de lucru) pe baza documentelor de monitorizare a regimului de exploatare și condițiilor de funcționare ale cuptorului în care acestea sunt utilizate, iar cerințele de exploatare viitoare se pot preciza luând în considerare programele de producție ale instalației tehnologice din care face parte cuptorul respectiv; dacă regimul de exploatare și condițiile de funcționare ale cuptorului sunt variabile în timp, descrierea condițiilor anterioare și viitoare de exploatare ale țevelor sau componentelor serpentinelor trebuie făcută cu blocuri de solicitare.

➤ La evaluările privind comportarea țevelor sau componentelor serpentinelor trebuie acordată atenție deosebită stabilirii stărilor de tensiuni mecanice și deformații specifice care se generează în cursul fiecăruia din blocurile de solicitare la care acestea sunt supuse; la stabilirea acestora trebuie aplicată metoda clasificării tensiunilor.

➤ Cunoașterea caracteristicilor mecanice ale materialului din care sunt realizate țevile și celelalte componente ale serpentinelor, la temperaturile de funcționare înscrise în blocurile de solicitare care definesc regimul lor de exploatare, este esențială pentru evaluarea pertinentă a acestora și obținerea unor rezultate cu nivel de încredere ridicat. Determinarea acestor caracteristici este dificilă, având în vedere că încercările se fac la temperaturi ridicate, cu metodologii complicate și cu cerințe riguroase privind efectuarea încercărilor, precizia înregistrărilor și validarea rezultatelor. În prezent, pentru evaluarea degradării prin fluaj a țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor se folosesc curbele de selecție / durabilitate la fluaj (creep screenig curves – CSC) și curbele de degradare / deteriorare prin fluaj (creep damage curves – CDC), precum și diagramele complexe cu caracteristicile de comportare la fluaj (stress curves – SC); procedurile de verificare a comportării în exploatare a serpentinelor, prezentate în acest capitol se bazează pe cunoașterea și utilizarea unor astfel de curbe / diagrame.

➤ Pentru verificarea comportării țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor în condiții de fluaj se recomandă utilizarea mijloacelor dezvoltate în acest capitol: a. procedura și produsul informatic DFT-CDC, care utilizează curbele de degradare / deteriorare prin fluaj (creep damage curves – CDC) ale materialelor din care sunt fabricate țevile și celelalte componente ale serpentinei analizate; b. procedura și produsul informatic DFT-SC, care utilizează diagramele complexe cu caracteristicile de comportare la fluaj (stress curves – SC) ale materialelor utilizat la realizarea țevelor și celorlalte componente ale serpentinei care se evaluează.

➤ Utilizarea procedurilor și produselor informatice de verificare a comportării la fluaj a țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor a evidențiat că: a. procedurile și produsele informatice se poate aplica atât la proiectare (considerând blocurile de solicitare prevăzute pentru utilizarea ulterioară a țevelor unei serpentine care se proiectează), cât și pentru evaluarea stării tehnice a țevelor unei serpentine existente (care a fost utilizată cu mai multe blocuri de solicitare); b. la aplicarea procedurilor trebuie să se aibă în vedere că, în ceea ce privește degradarea prin fluaj a țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor, creșterea temperaturii are un efect de intensificare a degradării net superior creșterii duratelor de lucru; c. procedura bazată pe SC este mai conservativă decât cea bazată pe CDC, degradările cumulate care se obțin folosind produsul informatic DFT-SC fiind mai mari decât degradările cumulate calculate cu produsul informatic DFT-CDC; folosind DFT-SC se obțin limitele (inferioară și superioară) corespunzătoare degradării cumulate a unei serpentine supuse unui anumit program de operare, degradarea cumulată rezultată aplicând DFT-CDC, fiind situată între cele două limite.

➤ Pentru verificarea comportării țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor exploatare în condiții de solicitare variabilă (oboseală) trebuie cunoscute / definite: a.

blocurile de solicitare variabilă și caracteristicile ciclurilor de solicitare din fiecare bloc; b. caracteristicile de comportare la oboseală ale materialelor din care sunt realizate țevile și celelalte componente ale serpentinelor care trebuie verificate; se recomandă utilizarea curbelor de durabilitate la oboseală de tip Wöhler, dacă temperaturile de lucru se situează sub temperatura limită minimă de incidență a fluajului sau imediat deasupra acesteia sau a curbelor de durabilitate la oboseală de tip Manson – Coffin, dacă temperaturile de lucru se situează în domeniul de manifestare a fenomenului de fluaj. Se recomandă utilizarea procedurii propuse în acest capitol, bazată pe utilizarea unui produs informatic, care permite aplicarea operativă a acestei proceduri.

➤ Pentru a verifica comportarea la fluaj și oboseală se recomandă aplicarea procedurii descrise în acest capitol, bazată pe construirea și utilizarea diagramei de evaluare a degradării țevilor și componentelor serpentinelor supuse la acțiunea combinată a fenomenelor de fluaj și oboseală. Procedurile de proiectare a serpentinelor și de verificare a comportării lor în exploatare, prezentate în acest capitol, iau în considerare și efectele altor procese secundare (coroziune, eroziune etc.) : a. modificarea (superficială sau în volum) a compoziției chimice a țevilor sau componentelor serpentinelor, însoțită (evident) de modificări ale structurii metalografice și caracteristicilor fizico – mecanice ale acestora; b. modificarea (generală sau locală) a grosimii de perete a țevilor și componentelor serpentinelor; c. realizarea de depuneri pe suprafețele exterioară sau (mai ales) interioară ale țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor; d. generarea pe suprafețele sau în masa țevilor și componentelor serpentinelor a unor defecte, de tipul unor ciupituri sau fisuri.

➤ Procedurile ingineresti, prezentate în acest capitol, de proiectare a serpentinelor cuptoarelor și de evaluare a comportării lor în exploatare trebuie aplicate împreună cu strategia de creștere a fiabilității și durabilității acestora, de programare a reviziilor tehnice la cuptoare, de evaluare periodică (cu ocazia efectuării reviziilor tehnice) a stării tehnice a serpentinelor, de restabilire a fiabilității și disponibilității acestora prin lucrări de mentenanță și de sporirea în acest fel a duratei lor remanente / reziduale de viață. Aplicarea strategiei propuse implică verificarea periodică a stării tehnice a serpentinelor și programarea rațională a reviziilor tehnice, astfel încât pe toată durata de viață proiectată a acestora nivelul fiabilității să depășească un nivel admisibil, iar probabilitatea de înregistrare a unor cedări intempestive (în cursul etapelor de exploatare) să fie neglijabilă; în capitolele următoare sunt analizate și selectate metodele și procedeele de evaluare a stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor și de estimare a duratei lor de viață remanente / reziduale.

Cel de-al patrulea capitol al tezei de doctorat, cu titlul *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin determinări periodice ale compoziției chimice și microstructurii* a fost destinat cercetării următoarelor aspecte tehnice:

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor nu suferă în cursul utilizării modificări esențiale ale matricei lor microstructurale (aceasta rămâne feritică, în cazul elementelor fabricate din oțeluri Cr – Mo sau austenitică, în cazul celor realizate din oțeluri inoxidabile Cr – Ni sau din superaliaje de tip Ni – Fe – Cr); dacă matricea structurii de livrare a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor (din oțeluri de tip C–Mn, Mo sau Cr – Mo) conține și formațiuni perlitice, bainitice sau martensitice, acestea suferă, datorită menținerii îndelungate la temperatură ridicată, procese de transformare în ferită și carburi sferoidale. Modificările de structură în cursul utilizării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor se referă în principal la fazele secundare, cu ponderi procentuale mici, care se distribuie la marginea sau în interiorul cristalelor matricei feritice sau austenitice: carburi, nitruri sau carbonitruri (ale elementelor principale de aliere: Cr, Mo sau ale unor elementelor de aliere suplimentară, introduse în cantități mici, pentru îmbunătățirea caracteristicilor de utilizare ale țevilor și componentelor serpentinelor, cum sunt: Ti, Nb, V, W, Si, B) și compuși intermetalici.

➤ Modificările de structură, care se realizează prin mecanisme bazate pe difuzia componentelor de aliere și pe activitatea lor termodinamică (care determină posibilitățile ca acestea să formeze compuși chimici), prezintă următoarele particularități: a. sunt dependente de domeniile de temperatură în care sunt utilizate țevile și celelalte componente ale serpentinelor și, respectiv, în care sunt stabile fazele (carburi, nitruri etc.) din structura materialului acestora; b. pot fi influențate de activitatea fluidelor vehiculate prin țevile și celelalte componente ale serpentinelor și/sau atmosferei din cuptorul în care sunt utilizate acestea (care pot să contribuie la declanșarea și intensifică procesele de generare și de transformare a fazelor secundare); c. fazele secundare cu formă globulară și dimensiuni mici, uniform distribuite în cristalele matricei îmbunătățesc comportarea la fluaj a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor, în timp ce fazele secundare dispuse sub formă de rețea la marginea cristalelor matricei, au efect fragilizant și grăbesc fisurarea și cedarea prin fluaj a acestora; d. menținerile îndelungate la temperatură ridicată a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor determină coalescența particulelor de faze secundare și accelerează cedarea prin fluaj a acestora.

➤ Aprecierea stării tehnice a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și de microstructură (efectuate periodic, cu ocazia reviziilor tehnice sau reparațiilor curente) implică cunoașterea unor corelații experimentale pertinente între următoarele categorii de factori: a. compoziția chimică, microstructura și caracteristicile mecanice ale țevilor sau componentelor serpentinei; b. regimul tehnologic de utilizare a țevilor sau componentelor serpentinei, definit prin: temperatura  $t_f$ , presiunea  $p_f$ , natura și activitatea chimică / agresivitatea fluidului tehnologic transportat; c. natura și activitatea chimică / agresivitatea atmosferei din cuptorul în care se află serpentina; d. durata de viață / durabilitatea la fluaj  $\tau_f$  a țevilor sau componentelor serpentinei (în condițiile definite de categoriile de factori descrise mai înainte).

➤ Pentru a putea aprecia (cu un nivel de încredere acceptabil) starea tehnică și durata de viață reziduală a tubulaturii cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și de microstructură, efectuate periodic, după diferite etape / campanii /durate de exploatare, cu ocazia reviziilor tehnice sau reparațiilor curente, trebuie elaborate proceduri pertinente, bine fundamentate științific, care trebuie să aplice principiile propuse, justificate și comentate în acest capitol.

➤ Principalele metode de evaluare a stării tehnice a componentelor serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice pe baza determinărilor periodice privind compoziția chimică și microstructura acestora sunt cele prezentate în acest capitol: a. metoda nivelurilor / gradelor sau claselor de degradare; b. metoda bazată pe aplicarea teoriei cinetice modificate, care utilizează parametrii microstructurali; c. metoda bazată pe construirea și utilizarea atlaselor metalografice; d. metoda parametrului Z. Analiza, comentarea și elaborarea procedurilor de aplicare ale acestor metode a evidențiat că nivelul de încredere al rezultatelor aplicării lor și al deciziilor privind starea tehnică a componentelor serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice crește odată cu: a. creșterea volumului determinărilor de compoziție chimică și examinărilor metalografice și cu complexitatea procedeele de efectuare a acestora (folosirea spectrometrelor de mare rezoluție, examinarea metalografică completă, nu numai prin microscopie optică, dar și prin microscopie electronică etc.) ; b. investigarea în paralel cu examinările de microstructură și a urmelor specifice degradării prin fluaj (aparitia microgolurilor și coalescența acestora, formarea microfisurilor etc.); c. coroborarea informațiilor obținute prin determinările de compoziție și microstructură cu cele furnizate de efectuarea unor încercări mecanice sau tehnologice.

**Capitolul al cincilea** al tezei de doctorat prezintă *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice*. Studiile și cercetările efectuate în acest capitol, au condus la evidențierea următoarelor concluzii:

➤ Țevile și celelalte componente ale serpentinelor suferă în cursul exploatării modificări notabile ale proprietăților mecanice; s-a remarcat o fragilitate accentuată a elementelor cu diferite perioade de exploatare, apărută ca urmare a funcționării la temperaturi peste pragul producerii fenomenului de fluj concomitent cu carburarea zonelor ce intră în contact direct cu fluidul tehnologic, constituit dintr-un amestec de hidrocarburi, care la temperaturi ridicate poate difuza în stratul superficial al tubulaturilor.

➤ Pentru a putea aprecia starea tehnică la un anumit moment cu un nivel ridicat de încredere prin efectuarea de încercări mecanice și tehnologice cu ocazia reviziilor tehnice periodice, se vor respecta procedurile propuse și aplicate în acest capitol.

➤ Principalele metode de evaluare a stării tehnice a componentelor serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice prin încercări mecanice și tehnologice sunt cele prezentate în acest capitol, astfel: a. încercarea la tracțiune, pentru aflarea limitei de curgere (aparentă sau convențională), a rezistenței la rupere și a alungirii procentuale după rupere; b. încercări de duritate, cu scopul observării modificărilor survenite ca urmare a funcționării în medii active din punct de vedere chimic; c. încercări la oboseală, pentru posibilitatea construirii curbilor caracteristice tensiune – deformație la solicitări ciclice și curbilor de durabilitate oligociclică, deformație ciclică – durabilitate, pentru oțelurile elementelor tubulaturilor cuptoarelor; d. încercări la încovoiere prin șoc, pentru determinarea energiilor de rupere; e. încercări de aplatizare, efectuate cu scopul observării tendinței de fragilizare și pentru evaluarea plasticității și deformabilității.

➤ Din pricina tendinței de creștere a plasticității la temperaturi ridicate a oțelurilor folosite la fabricarea elementelor de tubulatură, evaluarea stării tehnice se va baza pe încercările realizate la temperatura ambiantă, întrucât costurile și duratele de realizare ale testelor sunt mai scăzute și nu necesită echipamente sofisticate, iar gradul de precizie prin prisma încercărilor mecanice specifice este cel mai ridicat, astfel oferindu-se posibilitatea evaluării degradării țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor la un anumit moment de timp și a duratei de viață remanente cu un grad ridicat de încredere.

## 6.2. Contribuții originale

Pe parcursul tratării și soluționării problematicei complexe legate de temă, autorul prezentei teze de doctorat a adus contribuțiile originale prezentate în continuare.

În cadrul primului capitol, cu titlul *Introducere*, contribuțiile originale ale autorului tezei se referă la identificarea și enumerarea principalelor aspecte negative descoperite cu ocazia activităților de documentare și colaborare la rafinăriile de petrol din zona industrială a municipiului Ploiești, astfel s-a descoperit că: a. istoricul regimurilor de lucru ale serpentinelor cuptoarelor, caracterizat prin valorile înregistrate continuu sau la anumite intervale de timp ale temperaturilor și presiunilor de lucru (în zonele cu regim termic distinct ale serpentinelor) și prin duratele de lucru ale fiecărei componente de material tubular, nu este disponibil; b. nu există un sistem de monitorizare continuă a securității tehnice a serpentinelor prin corelarea regimurilor de lucru (temperaturi și presiuni), cu duratele de lucru și cu mărimea degradării cumulate a componentelor serpentinelor, care să furnizeze informațiile necesare estimării intervalelor de timp dintre lucrările de mentenanță (revizii tehnice, reparații curente etc.); c. nu este uzuală expertizarea tehnică a componentelor care au fost înlocuite pentru a se determina nivelului efectiv al degradărilor și a se estima cauzele care le-au

determinat, cu ocazia reviziilor efectuate pentru verificarea stării tehnice a materialului tubular din cuptoare.

Capitolul al doilea al tezei, cu titlul *Caracteristicile constructiv-funcționale ale serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice* conține următoarele contribuții originale ale autorului:

➤ Prelucrarea datelor existente în documentele normative actuale și în literatura de specialitate în vederea determinării valorilor constantelor necesare pentru determinarea principalelor caracteristici mecanice la diferite temperaturi, a oțelurilor folosite la fabricarea materialului tubular al serpentinelor cuptoarelor.

Datele privind caracteristicile anterior nominalizate, au fost prelucrate de autorul prezentei lucrări în sensul exprimării lor într-o formă analitică generală, care să poată fi preluată și utilizată cu ușurință în cadrul produselor informatice dezvoltate pentru proiectarea, construirea și monitorizarea în exploatare a serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice. Forma formulelor propuse și dezvoltate de autorul tezei pentru determinarea caracteristicilor mecanice (minime specificate) la  $t > t_a$  are două avantaje esențiale: a) caracteristicile mecanice la  $t > t_a$  au ca referință valoarea unei caracteristici mecanice la  $t_a$ , care se poate verifica experimental ușor; b) intervenția temperaturii  $t > t_a$  este redată printr-o funcție separată, a cărei formă se poate presupune că nu depinde de nivelul caracteristicii de referință și, ca urmare, formulele se pot utiliza nu numai pentru determinarea caracteristicilor mecanice minime specificate la diferite temperaturi  $t > t_a$ , ci și pentru determinarea caracteristicilor mecanice efective la  $t > t_a$ , cunoscând valoarea determinată experimental (efectivă) a caracteristicii de referință la  $t_a$ .

Contribuțiile originale aduse în capitolul al treilea al tezei, cu titlul *Cercetări privind soluțiile tehnice de asigurare a durabilității serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice*, sunt:

➤ Elaborarea și transpunerea într-un produs informatic a unei proceduri pentru dimensionarea primară a țevilor serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice cu aplicarea acesteia pe un studiu de caz, ale cărui date de intrare se pot identifica cu ușurință deoarece prezentarea procedurii este însoțită de explicații și comentarii, componentele / secvențele de lucru aparând înscrise în mai multe casete numerotate ca tabele.

➤ Dezvoltarea unei proceduri de determinare a degradării cumulate a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cu mai multe blocuri de solicitare pe baza informațiilor și recomandărilor din literatura de specialitate, care folosește caracteristicile de comportare la fluaj.

➤ Elaborarea unei proceduri de determinare a degradării cumulate, care folosește caracteristicile de comportare la fluaj a țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cu mai multe blocuri de solicitare, dezvoltată pe baza recomandărilor din lucrările de specialitate. În cadrul procedurii s-au determinat următoarele: a. constantele din expresiile analitice ale curbilor principale ale SC pentru principalele tipuri de oțeluri termorezistente folosite pentru fabricarea țevilor și componentelor serpentinelor; b. nomogramele de determinare a duratelor (minimă și medie) de rupere prin fluaj pentru: țevi din oțel X6CrNi18-10, respectiv X10CrMoVNb9-1.

➤ Dezvoltarea unei proceduri de determinare a degradării cumulate a țevilor unei serpentine cu mai multe blocuri de solicitare care folosește caracteristicile de comportare la oboseală sintetizate sub forma curbilor de durabilitate de tip Manson – Coffin, în cadrul căreia s-au realizat următoarele elemente: a. exprimarea analitică a curbilor de durabilitate de tip Wöhler și determinarea constantelor din expresiile analitice ale acestora, prin prelucrarea datelor din literatura de specialitate, pentru principalele oțeluri termorezistente folosite la fabricarea țevilor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor; b. exprimarea

analitică a curbelor de durabilitate de tip Manson – Coffin și determinarea prin prelucrarea datelor din lucrările de specialitate a constantelor din expresiile analitice ale acestora, pentru principalele oțeluri termorezistente folosite la fabricarea țevelor și celorlalte componente ale serpentinelor cuptoarelor.

În capitolul al patrulea, cu titlul *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin determinări periodice ale compoziției chimice și microstructurii*, au fost aduse următoarele contribuții originale:

➤ Elaborarea unei variante de corelare a nivelurilor de degradare microstructurală cu gradele / clasele de degradare prin fluaj în vederea aprecierii stării tehnice a serpentinelor cuptoarelor realizate cu material tubular din oțeluri cu matricea feritică.

➤ Realizarea unui atlas metalografic prin prelucrarea datelor din literatura de specialitate, rezultat ca urmare a examinării la microscop a imaginilor structurilor eșantioanelor metalografice ale oțelului  $2\frac{1}{4}\text{Cr}-1\text{Mo}$ , livrat în stare recoaptă, după cedarea prin fluaj.

➤ Alcătuirea schemei de utilizare a metodei parametrului  $Z$  pentru estimarea duratei de viață reziduale a materialului tubular realizat din oțel turnat centrifugal  $25\text{Cr}-25\text{Ni}$ .

Contribuțiile originale ale autorului în capitolul al cincilea al tezei, cu titlul *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice*, sunt:

➤ Realizarea unui amplu program experimental pe eșantioane debitate atât din diferite zone (porțiuni drepte și zone curbe) ale materialului tubular al cuptoarelor (din zonele de radiație cât și din cele de convecție) cu compararea rezultatelor obținute cu valorile garantate de standardele de specialitate în vederea estimării gradului de degradare la un anumit interval de timp.

➤ Propunerea unui criteriu propriu capabil să estimeze nivelul de degradare al materialului tubular la un anumit interval de timp – criteriul energetic, bazat pe compararea energiilor disipate la ruperea prin aplatisare a materialului tubular; în urma încercărilor experimentale efectuate s-a constatat că valorile reduse ale energiei de rupere sunt caracteristice eșantioanelor prelevate din material tubular degradat (cu cât energia de rupere este mai redusă cu atât materialul tubular este mai degradat).

➤ Conceperea unui dispozitiv (ansamblul dorn – inel) menit să evalueze starea tehnică a tubulaturilor cu un nivel înalt de încredere, realizat în construcție simplă și fără costuri ridicate.

➤ Conceperea unui program de monitorizare pentru evaluarea stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice bazat pe posibilitatea estimării, la fiecare interval de timp, a degradării rezultate în urma investigațiilor specifice realizate cu ocazia reviziilor tehnice periodice ale țevelor și celorlalte elemente componente ale tubulaturilor cuptoarelor.

### 6.3. Direcții de continuare a cercetărilor

Datorită complexității și volumului mare al problematicii tratate în cadrul tezei de doctorat nu a fost posibilă abordarea și soluționarea tuturor aspectelor pe care le implică tema acestei lucrări. Câteva dintre direcțiile în care pot fi continuate cercetările sunt:

➤ Stabilirea unor viitoare colaborări cu principalele companii din domeniul prelucrării țiteiului ca justificare a aplicabilității în mediul economic a cercetărilor întreprinse;

➤ Crearea unei baze de date complexe cu interconectarea cauzelor producerii fenomenelor de degradare cu duratele și parametrii de funcționare în vederea monitorizării eficiente a proceselor tehnologice din cadrul cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice în contextul reducerii cheltuielilor de exploatare;

- 
- Efectuarea unui program experimental consistent, pentru elementele secundare ale serpentinelor cuptoarelor din rafinăriile de petrol și instalațiile petrochimice: plăci tubulare, suporturi și elemente de suspendare;
  - Cercetarea cu metodologiile dezvoltate în cadrul tezei a posibilităților de aplicare a monitorizării și evaluării stării tehnice a piesele turnate centrifugal, din cauza faptului că studiile de specialitate făcute până în acest moment nu sunt suficiente în contextul în care influența parametrilor și a mediului de lucru asupra acestor repere este extrem de ridicată. Ipotezele care intervin în studiul pe acest gen de elemente se bazează pe calitatea mai slabă a suprafețelor acestora [76], efectul de radiație fiind mai intens și tendința de depunere specifică proceselor tehnologice mai accentuată în zona razei minime interioare;
  - Cercetarea teoretică și experimentală în cazul îmbinărilor sudate dintre țevi și coturi, respectiv dintre țevi și colector, aferente tubulaturilor din domeniul studiat;



## BIBLIOGRAFIE

(extras)

1. Abdulaziz Al-M., Metal Dusting of Heat-Resistant Alloys, dissertation, University of Cambridge, Department of Materials Science and Metallurgy, Hughes Hall, Cambridge, 2008
2. Agüero A., Gutierrez M., Korcakova L., Nguyen T. T. M., Hinnemann B., Saadi S., Metal Dusting Protective Coatings. A Literature Review, Springer Science Business Media, ISSN 0030-770X, 2011
3. Ainsworth R.A., Lei Y., Creep crack growth assessment methods, *Anales de Mecánica de la Fractura* 26, Vol. 1 (2009), p.3-9
4. Archisman R., Anant R., Bangsidhar G., Ashok Kumar R., Damage mechanism of service exposed reformer tubes in petrochemical industries – a review, *IJETR*, vol.3, oct. 2015, p.1-11
5. Babakr A., Habiby F., Lengthening, Cracking and Weldability Problems of Fe–Ni–Cr Alloy Tube, *Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering*, Vol. 8, No.2, 2009, p. 133-148
6. Cursaru D, **Ramadan I.**, Tănăsescu C, Rîpeanu R, Study of the tribological behavior of different carbonaceous nanomaterials such as antiwear additives for an environmentally friendly lubricant, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, Vol. 8, No 2, 2013, p. 805- 815
7. Cursaru D., Brănoiu Gh., **Ramadan I.**, Miculescu F., Degradation of automotive materials upon exposure to sunflower biodiesel, *Industrial Crops and Products*, 54, 2014, p. 149- 158
8. Grabke H.J., Carburization, Carbide Formation, Metal Dusting, Coking, *Materiali in Tehnologije* 36, ISSN 1580-2949, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, Düsseldorf, Germania, 2002
9. Gupta G., Was S.G., Interpretation of improved creep properties of a 9Cr-1Mo-Nb-V (T91) steel by grain boundary engineering, *TMS Letters*, Volume 2, Issue 3: Materials Issues for Advanced Nuclear Systems, 2005, p.71-72
10. Hünecke J., Schöne D., Klingbeil D., Bork C.P., Advanced life prediction by microstructural simulation of short cracks in a low carbon steel, *International Journal of Fatigue* 28, pag. 993–1000, 2006
11. Jara D-R., 9-12 % Cr heat resistant steels: alloy design, TEM characterization of microstructure evolution and creep resistant at 650 °C, Disertation Doktor-Ingenieur, Fakultat für Maschinenbau der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2011
12. Kushima H., Watanabe T., Murata M., Kamihira K., Tanaka H., Kimura K., Metallographic Atlas for 2.25Cr-1Mo Steels and Degradation due to Long-term Service at the Elevated Temperatures, *ECCC Creep Conference*, 12–14 September 2005, London, p. 223-234
13. Laudăcescu E., **Ramadan I.**, Petrescu M. G., Moroșanu M., Ilie B. - The Effect Of The Surface Roughness On The Corrosion Behavior Of S235J2G3 Carbon Steel, book 2A, Vol. 22 of *Journal of the Balkan Tribological Association*, 2016
14. Li Xing, Jie Zhao, Fuzhong Shen and Wei Feng, Z-parameter Method for Damage Evaluation in HK40 Steel, *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 23, no.3, 2007, p. 329-332
15. Mazaheri M., Djavanroodi F., Nikbin K.M., Creep life assessment of an overheated 9Cr-1Mo steel tube, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 87 (2010), p 746-752
16. Muramatsu M., Suzuki T., Nakasone Y., Effects of Microstructure on Creep-fatigue Properties in Modified 9Cr-1Mo Steel, 9th International Conference on Fracture & Strength of Solids, June 9-13, 2013, Jeju, Korea

17. Neacșa A., Diniță A., Baranowski P., Sybilski K., **Ramadan I.**, Malachowski J., Blyukher B., Experimental and Numerical Testing of Gas Pipeline Subjected to Excavator Elements Interference, Journal of Pressure Vessel Technology, Volume 138, Issue 3, iunie 2016
18. Perez I.U., Da Silveira T.L., Cunha Furtado H., Graphitization in Low Alloy Steel Pressure Vessels and Piping, J Fail. Anal. and Preven., 2011, p. 3-9
19. Potirniche G., Prediction and monitoring systems of creep-fracture behavior of 9Cr-1Mo steels for reactor pressure vessels, NEUP 2009 Project 09-835 (09-458), Final Report, Mechanical Engineering Department, University of Idaho, Oct. 31, 2013
20. **Ramadan I.**, The Structure of Monitoring the Technical Condition of Furnace Tubes from Refineries and Petrochemical Plants, Buletinul UPG, Seria tehnică, vol. LXVIII, No. 2, 2016
21. Roberts R.D., Heater tube inspection and remaining life evaluation, Inspectioneering Journal, May/June. 2014, p. 6-14
22. Serna A., Rapp R. A., Carburization of austenitic and ferritic alloys in hydrocarbon environments at high temperature, Revista de Metalurgia Madrid Vol. Extr., 2003, p. 162-166
23. Šeruga D., Fajdiga M., Nagode M., Creep Damage Calculation for Thermo Mechanical Fatigue, Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering, 57(2011)5, p. 371-378
24. Silveira T.L., May I.L., Reformer Furnaces: Materials, Damage Mechanisms, and Assessment, The Arabian Journal for Science and Engineering, Vol. 31, Nr. 2C, Decembrie 2006
25. Slabbert G.A., Mulaudzi F.M.L., Cornish L.A., Papo M.J., Morudu V., Zhang J., The effect of the matrix structure on the metal dusting rate in hydrocarbon environments, The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 113, 2013
26. Tabuchi M., Hongo H., Evaluation of microstructure and creep damage in high-Cr ferritic steel welds, Acta Metall. Sin., Vol. 24 no. 3, June 2011, p. 225-234
27. Wilks G.W., Remaining Life Assessments of Refinery Coker Furnace Tubes, NACE International, March 11-15, Salt Lake City, Utah, S.U.A., ISBN: 01190 2012 CP, 2012, <http://www.nace.org/cstm/Store/Product.aspx?id=c3666019-82ed-e111-ac69-0050569a007e>
28. Wilshire B., Scharning P.J., Extrapolation of creep life data for 1Cr-0.5Mo steel, International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 85, March 2008, p. 739-743
29. Young D.J., Cottis B., Graham M., Lindsay R., Lyon S., Richardson T., Scantlebury D., Stott H., Carburisation and metal dusting, Shreir's Corrosion, 4th Edition, vol. 1, pag. 273-301, Elsevier, Amsterdam, Olanda, 2010
30. Zecheru Gh., **Ramadan I.**, Fitness-For-Service assessment of steel tubes operating in oil refineries furnace, Buletinul UPG, Seria tehnică, vol LXVII, nr 4/2015, p. 67-79
31. Zecheru Gh., **Ramadan I.**, Dumitrescu A., Technical state assessment of the furnace tubes from oil refineries and petrochemical plants by examining their chemical composition and microstructure, Buletinul UPG, Seria tehnică, vol LXV, nr 2/2013, p. 1-8
32. Zheng-Fei Hu, Heat-Resistant Steels, Microstructure Evolution and Life Assessment in Power Plants, [www.intechopen.com](http://www.intechopen.com)
33. \* \* \* API/ANSI 530:2004, Calculation of heater-tube thickness in petroleum refineries
34. \* \* \* API STD 560:2016, Fired Heaters for General Refinery Services
35. \* \* \* API RP 571-2003, Damage mechanisms affecting fixed equipment in the refining industry
36. \* \* \* API RP 573-2011, Inspection of fired boilers and heaters
37. \* \* \* API 579-1/ASME FFS-1 Fitness-For-Service Part 10, Assessment Of Components Operating In The Creep Range, S.U.A., 2007
38. \* \* \* BS 7910:2005, Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures
39. \* \* \* Inspectioneering Journal - Heater Tube Inspection and Remaining Life Evaluation, vol. 20, Mai 2014
40. \* \* \* ISO 13704:2001, Petroleum, petrochemical and natural gas industries – Calculation of heater tube thickness in petroleum refineries

Prezentarea **sintetică a tezei de doctorat cu titlul****“Cercetări privind creșterea duratei de exploatare a materialului tubular al cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice”**

Prezenta teză de doctorat, cu tema “**CERCETĂRI PRIVIND CREȘTEREA DURATEI DE EXPLOATARE A MATERIALULUI TUBULAR AL CUPTOARELOR DIN RAFINĂRII ȘI INSTALAȚII PETROCHIMICE**”, a avut ca obiective analiza și soluționarea principalelor probleme vizând descrierea proceselor de degradare, alegerea rațională a calității materialelelor, stabilirea regimurilor optime de exploatare, dezvoltarea unor metode de monitorizare a stării tehnice în timpul funcționării și precizarea unor metode de caracterizare a stării tehnice și de estimare a duratei de viață remanente pentru țevile și celelalte componente ale serpentinelor cuptoarelor. Rezultatele cercetărilor contribuie la creșterea siguranței în funcționare, la reducerea riscului de producere a accidentelor și la avantaje economice importante.

Cuptoarele din rafinăriile de petrol și din instalațiile petrochimice sunt utilaje complexe, de mare gabarit cu un rol funcțional de importanță majoră pentru realizarea procesele tehnologice de prelucrare a petrolului și/sau de obținere a produselor petrochimice. Sintagma „material tubular”, se referă atât la serpentinele cuptoarelor, alcătuite din țevi, curbe, coturi, returbenți etc., cât și la componentele auxiliare ale acestor serpentine, cum sunt plăcile tubulare, suporturile și suspensiile.

În **primul capitol al tezei – Introducere** – se definesc noțiunile și conceptele de bază care descriu cadrul general al temei tezei de doctorat fiind precizate obiectivele urmărite prin realizarea lucrării și modalitățile de atingere a acestora.

**Capitolul al doilea al tezei**, având titlul *Caracteristicile constructiv-funcționale ale serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice* a fost destinat cercetării aspectelor legate de condițiile și mediile de lucru specifice proceselor tehnologice care au loc în cuptoare, de prezentare a principalelor elemente componente ale serpentinelor tubulare (țevi/tuburi, returbenți, coturi, plăci tubulare, suporturi și elemente de suspendare) și a tehnologiilor de fabricare ale acestora și de caracterizare complexă a materialelor utilizate la fabricarea acestora, pe baza: compoziției chimice, rezistenței mecanice, tenacității și plasticității, microstructurii, caracteristicilor fizico-chimice și caracteristicilor privind sudabilitatea și comportarea la sudare.

În **capitolul al treilea**, cu titlul *Cercetări privind soluțiile tehnice de asigurare a durabilității serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice* sunt analizate mecanismele de degradare a materialului tubular în cursul utilizării, stabilindu-se că mecanismul principal al degradării componentelor serpentinelor îl constituie fluajul, care poate interacționa cu mecanismele de degradare prin oboseală (datorită fluctuațiilor ciclice ale presiunii fluidului tehnologic circulat prin serpentine cuptoarelor și variațiilor ciclice ale temperaturii componentelor acestora în cursul operării cuptoarelor) și prin acțiunea mediului de lucru (cu efecte de tip coroziune sau de tip modificare de compoziție chimică – structură – proprietăți fizico-mecanice). Se propune o procedură de proiectare a tubulaturii cuptoarelor, transpusă într-un produs informatic care permite stabilirea operativă a dimensiunilor specifice ale materialului tubular: diametrul nominal și grosimea de perete și sunt dezvoltate metodologii și produse informatice de verificare a comportării în exploatare a serpentinelor proiectate, considerând acțiunea separată a proceselor de fluaj și de oboseală, precum și

interacțiunea; modul de utilizare a procedurilor și produselor informatice de proiectare și verificare a serpentinelor cuptoarelor este sugestiv ilustrat cu ajutorul unor studii de caz.

În cel de-al **patrulea capitol** al tezei de doctorat, cu titlul *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin determinării periodice ale compoziției chimice și microstructurii* sunt prezentate și analizate principalele aspecte legate de aprecierea degradării caracteristicilor de utilizare ale materialului tubular al serpentinelor cuptoarelor datorită campaniilor de exploatare anterioare, prin evidențierea modificărilor de compoziție chimică și microstructură. Sunt propuse mai multe metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza determinărilor de compoziție chimică și microstructură: metoda nivelurilor / gradelor (claselor) de degradare, metoda bazată pe aplicarea teoriei cinetice modificate, utilizând parametrii microstructurali, metoda bazată pe utilizarea atlaselor metalografice și metoda parametrului Z; metodele sunt transpuse în procedure de lucru, cu produse informatice de utilizare operative, iar utilizarea acestora este exemplificată cu ajutorul unor studii de caz sugestive.

**Capitolul al cincilea** al tezei are ca obiect *Evaluarea stării tehnice și duratei de viață remanente a tubulaturii cuptoarelor prin încercări mecanice și tehnologice*. bazate pe principiile și criteriile evaluării stării tehnice survenite ca urmare a modificărilor proprietăților mecanice ale tubulaturii în cursul exploatării cuptoarelor. Sunt propuse mai multe metode de evaluare a stării tehnice a tubulaturii cuptoarelor pe baza determinării dimensiunilor caracteristice ale materialului tubular (diametru și grosime de perete), pe baza determinării unor caracteristici mecanice și pe baza efectuării unor încercări tehnologice. Principalele încercări tehnologice (care se efectuează pe probe / epruvete inelare prelevate din materialul tubular nou sau utilizat) propuse, analizate și aplicate, folosind dispozitive concepute și realizate de autorul tezei de doctorat, sunt: încercarea la aplatizare și încercarea de expandare.

**Capitolul al șaselea** al tezei cuprinde *Concluzii. Contribuții originale. Direcții de continuare a cercetărilor*. Se evidențiază strategia propusă în teză privind creșterea durabilității (duratei de viață) a materialului tubular al serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice: a. proiectarea pe baza procedurilor propuse, cu considerarea acțiunii proceselor de fluaj și modificărilor de grosime produse de procesele de degradare datorită agresivității mediilor de lucru; b. monitorizarea parametrilor de regim (temperatură – presiune – agresivitate fluide procesate) în cursul exploatării cuptoarelor, estimarea degradării în timp a materialului tubular și programarea pe această bază a lucrărilor de mentenanță; c. evaluarea periodică a stării tehnice a materialului tubular și corectarea caracteristicilor considerate în produsele informatice folosite la evaluarea degradării acestuia; d. stabilirea programelor de exploatare viitoare ale serpentinelor cuptoarelor în funcție de constatările făcute la evaluarea stării tehnice a materialului tubular.

Principalele contribuții originale ale tezei de doctorat se referă la: a. realizarea unei baze de date cu caracteristicile fizico-mecanice ale oțelurilor folosite la realizarea materialului tubular al serpentinelor cuptoarelor; b. dezvoltarea unor proceduri și produse informatice pentru proiectarea serpentinelor cuptoarelor și pentru verificarea comportării acestora în cursul utilizării; c. dezvoltarea unor proceduri și produse informatice pentru evaluarea stării tehnice a materialului tubular pe baza determinării compoziției chimice și microstructurii și prin efectuarea de încercări mecanice și tehnologice, cu ocazia reviziilor tehnice periodice ale cuptoarelor; d. conceperea unei strategii coerente de creștere a duratei de viață a materialului tubular al serpentinelor cuptoarelor din rafinării și instalații petrochimice, vizând proiectarea optimală, monitorizarea continuă în exploatare, verificarea periodică a stării tehnice și planificarea rațională a lucrărilor de mentenanță.