



UNIVERSITATEA POLITEHNICA BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ENERGETICĂ
ȘCOALA DOCTORALĂ ENERGETICA

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**Contribuții la studiul comportării materialelor de
structură din zona activă a reactoarelor nucleare**

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Ilie PRISECARU

Student doctorand:

IONESCU Silviu - Ionuț

2017

Cuprinsul Tezei:

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUCERE | 1 |
| 1.1 | STADIUL ACTUAL AL STUDIULUI MATERIALELOR DE STRUCTURĂ DIN ZONA ACTIVĂ A REACTOARELOR NUCLEARE. | 1 |
| 1.1.1 | <i>Influența hidrogenului asupra comportării tuburilor de presiune din centralele CANDU</i> | 1 |
| 1.1.2 | <i>Efectul acumulării de hidrogen în tuburile de presiune Zr-2.5% Nb [3]</i> | 1 |
| 1.1.3 | <i>Studiul comportării fisurii inițiate în aliaje de Zr-2.5% Nb de tub de presiune hidruurate [8]</i> | 3 |
| 1.1.4 | <i>Sinteza informațiilor existente în literatura de specialitate privind tehnica de microprelevare</i> | 4 |
| 1.2 | ANSAMBLUL CANAL DE COMBUSTIBIL | 6 |
| 1.3 | INFLUENȚA ABSORBITEI DE HIDROGEN ASUPRA PROPRIETĂȚILOR MECANICE ALE TUBULUI DE PRESIUNE | 8 |
| 1.4 | UTILIZAREA ECHIPAMENTELOR ROBOTIZATE ÎN ENERGETICA NUCLEARĂ | 10 |
| 2 | TESTAREA LA TRACȚIUNE A PROBELOR DE TUB DE PRESIUNE | 12 |
| 2.1 | LUCRĂRI PREGĂTITOARE | 12 |
| 2.1.1 | <i>Proiectarea și execuția dispozitivelor necesare la realizarea experimentelor</i> | 12 |
| 2.1.2 | <i>Stabilirea rigidității mașinii de tracțiune Instron 5569 din laboratorul LEPI</i> | 12 |
| 2.2 | CONSIDERAȚII TEORETICE [24]..... | 12 |
| 2.3 | DETERMINĂRI EXPERIMENTALE | 13 |
| 2.3.1 | <i>Stabilirea temperaturii pe probă în funcție de temperatura cuptorului</i> | 14 |
| 2.4 | REALIZAREA TESTELOR..... | 19 |
| 2.4.1 | <i>Lucrări experimentale</i> | 19 |
| 2.4.2 | <i>Rezultate obținute</i> | 19 |
| 2.5 | EVALUAREA INTEGRITĂȚII STRUCTURALE A TUBULUI DE PRESIUNE CU AJUTORUL CODULUI DE CALCUL FEA-CRACK..... | 20 |
| 2.5.1 | <i>Relațiile constitutive obținute pe probele de Zr-2.5%Nb iradiate</i> | 20 |
| 2.5.2 | <i>Analizele prin metoda elementului finit a tuburilor de presiune Zr-2.5%Nb cu ajutorul codului de mecanica ruperii FEA-Crack</i> | 23 |
| 2.5.3 | <i>Parametrii de mecanica ruperii K_I și J_I obținuți în cadrul modelării prin plasticitatea de deformare și plasticitatea incrementală cu codul FEA-Crack a comportării Zr-2.5%Nb iradiat</i> | 24 |
| 2.5.4 | <i>Evaluarea integrității tubului de presiune iradiat, prezentând defecte ascuțite, prin diagramele FAD (opțiunea 1)</i> | 26 |
| 2.6 | INTERPRETAREA REZULTATELOR | 28 |
| 2.6.1 | <i>Analiza testelor de tracțiune</i> | 28 |
| 2.6.2 | <i>Compararea datelor obținute cu valorile publice la nivel internațional pentru Zr2,5%Nb</i> | 30 |
| 2.6.3 | <i>Importanța determinărilor făcute pe probe de tub de presiune</i> | 33 |
| 3 | TESTE DE MECANICA RUPERII PE PROBE DE TUB DE PRESIUNE | 34 |
| 3.1 | TUBUL DE PRESIUNE CANDU | 34 |
| 3.2 | TESTE DE MECANICA RUPERII PE PROBE DE TUB DE PRESIUNE | 37 |
| 3.2.1 | <i>Încercări tip mecanica ruperii: tenacitate – factorul K_I</i> | 37 |
| 3.3 | ÎNCERCĂRI TIP K_{IH} ȘI DHC | 40 |
| 3.4 | MODELAREA COMPORTĂRII MATERIALELOR METALICE SUPUSE SOLICITĂRILOR MECANICE | 44 |
| 3.5 | MODELUL COMPORTĂRII MECANICE ELASTO-PLASTICE DE TIP RAMBERG-OSGOOD | 47 |
| 3.6 | MODELAREA PROPAGĂRII UNEI FISURI ÎNTR-UN MATERIAL DUCTIL CU AJUTORUL MECANICII RUPERII NELINIARE..... | 47 |
| 3.6.1 | <i>Modelul zonei cu elemente coezive</i> | 48 |
| 3.6.2 | <i>Modelul micromecanic de defectare GNT (Gurson-Needleman-Tvergaard)</i> | 49 |
| 3.7 | INTEGRALA J (DE CONTUR) UTILIZATA PENTRU MODELAREA AVANSĂRII DUCTILE A UNEI FISURI..... | 50 |
| 3.7.1 | <i>Modelarea Hutchinson-Rice-Rosengren a singularității tensiunii în elasticitatea neliniară</i> | 51 |
| 3.7.2 | <i>Obținerea integralei J în metoda elementului finit</i> | 52 |
| 3.8 | REZULTATE OBȚINUTE..... | 53 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.8.1 | Analizele prin metoda elementului finit a probei CT- Zr-2.5%Nb cu ajutorul codului de mecanica ruperii FEA-Crack..... | 53 |
| 3.9 | ANALIZA COMPARATIVĂ PENTRU DETERMINAREA VALORILOR MODELARII GNT A PROPAGĂRII UNEI FISURI ÎN ALIAJUL ZR-2.5%NB | 57 |
| 4 | TESTAREA LA TRACȚIUNE A PROBELOR INELARE DE TEACĂ DE ELEMENT COMBUSTIBIL | 64 |
| 4.1 | TEACA ELEMENT COMBUSTIBIL CANDU. CONSIDERAȚII GENERALE..... | 64 |
| 4.2 | DESCRIEREA ELEMENTULUI COMBUSTIBIL | 65 |
| 4.3 | TESTAREA LA TRACȚIUNE A PROBELOR INELARE | 66 |
| 4.3.1 | Dispozitive necesare. Execuția epruvetelor folosite la realizarea testelor..... | 67 |
| 4.3.2 | Lucrări preliminare în vederea stabilirii mărimilor caracteristice ale testelor | 67 |
| 4.3.3 | Teste preliminare..... | 69 |
| 4.3.4 | Pregătirea și transferul probelor în celula pentru încercări mecanice..... | 70 |
| 4.4 | REALIZAREA TESTELOR..... | 74 |
| 4.4.1 | Teste pe inele prelevate din teacă de element combustibil experimental | 75 |
| 4.4.2 | Teste pe inele prelevate din teacă de element combustibil..... | 76 |
| 4.4.3 | Examinarea suprafeței de rupere prin microscopie electronică de baleiaj..... | 78 |
| 4.5 | SIMULAREA TESTELOR DE TRACȚIUNE PE INELE CU AJUTORUL CODULUI ANSYS | 79 |
| 4.5.1 | Analiza curbei caracteristice tensiune - deformare..... | 79 |
| 4.5.2 | Analiza distribuției stărilor de tensiune și de deformare. | 83 |
| 4.6 | INTERPRETAREA REZULTATELOR OBTINUTE..... | 92 |
| 4.6.1 | Analiza testelor de tracțiune..... | 92 |
| 4.6.2 | Compararea datelor obținute cu valorile publice la nivel internațional pentru Zy-4..... | 94 |
| 4.6.3 | Importanța determinărilor făcute pe probe de teacă de element combustibil..... | 97 |
| 5 | ECHIPAMENT MOBIL TELECOMANDAT PENTRU PRELEVARE PROBE..... | 99 |
| 5.1 | SCOPUL REALIZĂRII ECHIPAMENTULUI | 99 |
| 5.2 | CONDIȚII, CERINȚE ȘI OPERAȚII GENERALE PENTRU PRELEVARE PROBE | 99 |
| 5.3 | STABILIREA CERINȚELOR PRIVIND STRUCTURA CONSTRUCTIVĂ ȘI FUNCȚIONALĂ A ECHIPAMENTULUI..... | 99 |
| 5.4 | CONCEPTUL GENERAL AL ECHIPAMENTULUI | 100 |
| 5.5 | CONCEPTUL GENERAL PENTRU UN MODEL DE ECHIPAMENT | 103 |
| 5.6 | MODELUL DE STRUCTURĂ MECANICĂ ȘI ACȚIONARE | 105 |
| 5.6.1 | Capul de prelevare probe..... | 106 |
| 5.6.2 | Modulul de extensie..... | 107 |
| 5.6.3 | Mecanismul de închidere canal..... | 108 |
| 5.6.4 | Modulul de cuplare | 108 |
| 6 | ANALIZA PROBEI DE TUB DE PRESIUNE ÎN LEPI..... | 109 |
| 7 | CONCLUZII..... | 115 |
| 7.1 | CONCLUZII GENERALE | 115 |
| 7.2 | CONTRIBUȚII ORIGINALE | 119 |
| 7.3 | PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ | 121 |
| | BIBLIOGRAFIE..... | 122 |

Cuvinte cheie:

Teste mecanice, tub de presiune, teaca, element combustibil, hidrurare, materiale structura, reactor nuclear, CANDU.

Definiții și prescurtări:

| | |
|-------------|---|
| AECEB – | Atomic Energy Control Board; |
| AECL – | Atomic Energy of Canada Limited; |
| AISI – | American Iron and Steel Institute, Standard american pentru materiale metalice; |
| ANSYS – | ANSYS, Inc. - Analysis of Systems, software american de analiză computerizată cu elemente finite; |
| ASTM – | American Standard Test Method, Standard american; |
| CAN CSA – | Canadian Standards Association, Standard canadian; |
| CANDU – | CANadian Deuterium Uranium - Proiect Canadian de reactor de putere răcit și moderat cu apă grea și alimentat cu combustibil nuclear din uraniu natural; |
| CANLUB – | Strat subțire de grafit aplicat pe interiorul tecii de element combustibil; |
| CANTUP – | Cod de ANaliză a TUbului de Presiune, folosind metoda elementului finit; |
| Calandria – | Vasul cilindric al moderatorului al unei centrale CANDU; |
| CNE – | Centrală nucleare-electrică; |
| CT – | Compact Tension Specimen, tip de probă de tracțiune compactă; |
| DHC – | Delayed Hydride Cracking, fisurare datorată acumulării de hidrogen; |
| DSC – | Differential Scanning Calorimetry, calorimetrie diferențială; |
| E-MRS – | European Materials Research Society; |
| EC – | Element combustibil; |
| EFPH – | Effective Full Power Hours, ore efective de funcționare; |
| EPFM – | Elasto Plastic Fracture Mechanics, Mecanica clasică a ruperii elasto-plastice; |
| FAC – | Failure Assessment Curve, Curba Generală de Evaluare a Defectării; |
| FEA – | Finite Element Analysis, Analiză cu elemente finite; |
| FEM – | Finite Element Method, Metoda de analiză cu elemente finite; |
| GNT – | Gurson-Needleman-Tvergaard - Model micromecanic de defectare; |
| HVEMS – | Hot Vacuum Extraction Mass Spectrometry, Spectrometria de masă cu extracție în vid; |
| ICN – | Institutul de cercetări nucleare; |
| LEPI – | Laboratorul de examinare post-iradiere; |
| NLGEOM – | Non-linear geometry; parametru al programului ANSYS care ține cont de geometria elementului de analizat; |
| TC – | Tub Calandria; |
| TP – | Tub de presiune; |
| TRIGA – | Training, Research, Isotopes, General Atomics, Reactor de cercetare de producție americană. |
| UTS - | Ultimate Tensile Strength (Rezistența de rupere la tracțiune) |

1 INTRODUCERE

1.1 Importanța și actualitatea temei

Materialele joacă un rol crucial în operarea eficientă a reactoarelor nucleare, în siguranță, cu un randament cât mai bun, un termen cât mai îndelungat. Materialele folosite în reactoarele nucleare lucrează într-un mediu ostil și agresiv unde trebuie să-și păstreze integritatea și proprietățile mecanice de-a lungul unei perioade lungi de folosință. Provocările majore sunt efectele iradierii, fragilitatea, fisurarea, coroziunea, uzura, acumularea de hidrogen [1], [5].

Unul din fenomenele cu efectele cele mai supărătoare privind integritatea canalului combustibil în general și a tubului de presiune în special este acela de hidrurare, care duce la fragilizarea structurii, apariția de fisuri și chiar la rupturi ale tubului de presiune [3], [11].

Analiza comportării canalului de combustibil și a tecilor elementelor combustibile, în condițiile severe din reactor ocupă un loc central în programele de cercetare - dezvoltare, programe care au ca obiectiv securitatea și siguranța în exploatare a reactoarelor nucleare de tip CANDU [4].

1.2 Obiectivele propuse

Lucrarea își propune testarea tuburilor de presiune și a tecilor de element combustibil în vederea determinării proprietăților mecanice și contribuie la monitorizarea parametrilor acestora pe durata de funcționare. Implementarea la Laboratorul de examinare post iradiere de la ICN Pitești a testelor pentru determinarea caracteristicilor mecanice ale tuburilor de presiune și tecilor de element combustibil iradiate este obiectivul principal al tezei.

S-au realizat următoarele tipuri de teste:

- teste de tracțiune clasice pe probe de tub de presiune;
- teste de mecanica ruperii pe probe de tub de presiune;
- teste de tracțiune pe inele de element combustibil;
- determinarea conținutului de hidrogen din probe metalice (aliaje de Zr).

Testele s-au realizat pe probe iradiate sau pe probe neiradiate dar ținând cont de toate condițiile și restricțiile impuse de efectele iradierii.

2 CUPRINS

Inițial, în [capitolul 1](#) s-a făcut o documentare privind stadiul actual, la nivel mondial, al studiului materialelor de structură din zona activă a reactoarelor nucleare [1] și despre influența radiațiilor și a hidrogenului asupra comportării acestor materiale. Au fost luate în considerare tuburile de presiune (confecționate din aliajul Zr-2.5%Nb) [3] și tecile de element combustibil (confecționate din aliajul Zy-4) folosite în reactoarele nucleare CANDU-6.

Hidrurarea aliajelor de zirconiu are un puternic efect negativ asupra păstrării integrității structurale și funcționale a canalelor combustibile și implicit asupra securității nucleare a reactoarelor CANDU și de aceea acest fenomen trebuie riguros controlat și diminuat. Măsurarea concentrațiilor de hidruri este foarte importantă deoarece acestea determină variabilele de defectare ale tubului de presiune [12], [13], [15]. Principalele efecte negative ale hidrurilor asupra tubului de presiune sunt:

- fragilizarea structurii lor;
- creșterea deformărilor efective;
- creșterea probabilității de apariție a fisurilor și chiar a rupturilor direct proporțional cu concentrația de hidruri;
- creșterea valorilor tensiunilor efective;
- creșterea alungirilor axiale peste limita nominală;
- creșterea valorilor deflexiei maxime peste limita nominală.

În [capitolul 2](#) al tezei sunt prezentate lucrările realizate pentru testarea la tracțiune a probelor standard, de tub de presiune, iradiate în reactorul TRIGA de la ICN Pitești.

Am proiectat și au fost executate în ICN Pitești toate dispozitivele necesare pentru efectuarea testelor pe probe de tub de presiune în laboratorul de examinări post iradiere de la ICN Pitești, pe mașina de încercări mecanice INSTRON model 5569, din dotarea acestuia. Testele s-au realizat pe probe clasice de tracțiune, conform ASTM E8M ([Figura 1](#)) [25].

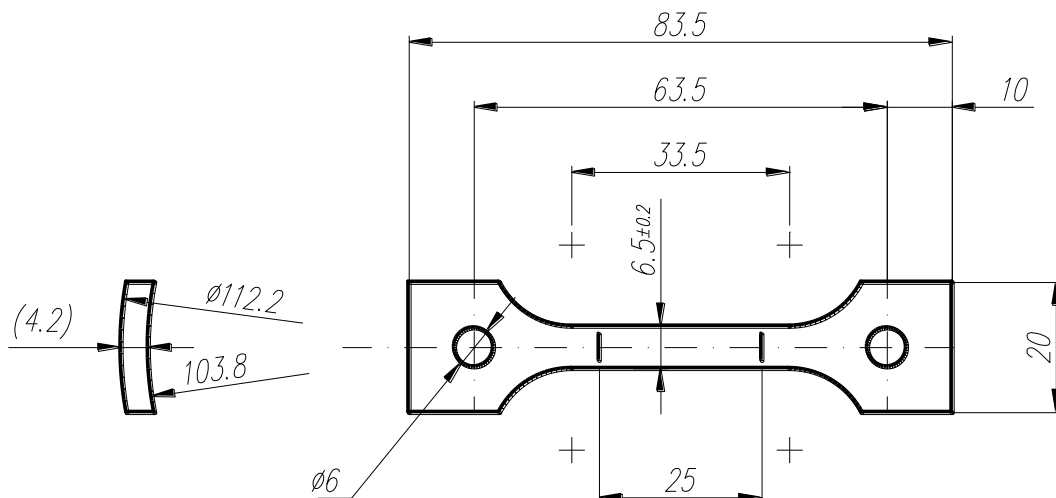


Figura 1. Epruveta standard de tracțiune (TP)

Am realizat teste pe epruvete metalice neiradiate, similare din punct de vedere dimensional cu cele iradiate pentru a calcula rigiditatea mașinii de tracțiune INSTRON 5569 și pentru determinarea unor informații utile privind caracteristicile mecanice achiziționate și prelucrate cu ajutorul softului specializat Instron Merlin Software. Prin realizarea acestor teste a fost stabilită metoda (caracteristicile de lucru ale mașinii de tracțiune) optimă de lucru care s-a aplicat pe epruvetele iradiate.

Am realizat teste de tracțiune clasice pe 16 epruvete standard de tracțiune, iradiate în reactorul TRIGA de la ICN Pitești. S-au întocmit rapoartele de încercare furnizate de softul mașinii de tracțiune Instron Merlin Software, stil ASTM E8 care prezintă condițiile în care s-a făcut testul, tabelul cu rezultatele și graficele încărcare-alungire și tensiune-deformare [25], [26].

A fost prezentată metodologia de evaluare a integrității structurale a componentelor conținând defecte. S-a realizat modelarea unui defect ascuțit de tip fisură pe fața inferioară a tubului de presiune CANDU, în planul radial-longitudinal folosind capabilitățile de pre-procesare ale codului FEA-Crack, versiunea 2.6. [30], [31].

Pentru probele prelevate din tubul de presiune, aliaj Zr-2.5%Nb, iradiate în reactorul TRIGA până la fluența 3.5×10^{24} n.m⁻² ($E > 1\text{MeV}$), au fost precizate mărimile caracteristicilor mecanice obținute în urma testelor de tracțiune din LEPI, utilizate la analizele cu metoda elementelor finite cu ajutorul codului FEA-Crack.

Au fost realizate modelări cu codul FEA-Crack ale proprietarilor de material prin plasticitatea de deformare și plasticitatea incrementală, pentru 4 probe prelevate pe direcție transversală în domeniul de temperaturi 70°C - 300°C. pentru aceste probe au fost obținute stările de tensiune von Mises care descriu plasticitatea aliajului iradiat în apropierea fisurilor, pentru o presiune internă de $P_{\text{int}}=15$ MPa:

- a. pentru modelarea cu plasticitatea incrementală se obțin valori mai mari ale tensiunilor maxime von Mises decât pentru modelarea cu plasticitatea de deformare;
- b. valorile maxime ale tensiunilor von Mises scad cu creșterea temperaturii.

Au fost obținuți parametrii de mecanica ruperii K_I și J , pentru tubul cu fisura interioară, în funcție de pasul de încărcare mecanică și în lungul frontului fisurii, pentru domeniul de temperaturi analizat:

- a. au fost obținute valori foarte apropiate pentru factorul de intensitate a tensiunii K_I între cele două modelari (plasticitatea incrementală și cea de deformare);
- b. pe domeniul de temperatură 70°C ÷ 300°C valorile factorului K_I nu se modifică semnificativ.

Au fost realizate analize ale integrității structurale a tuburilor de presiune utilizând rezultatele date de analizele de mecanica ruperii cu ajutorul codului FEA-Crack, pentru situațiile de colapsare globală și locală:

- a. s-a constatat că valorile parametrului K_r care măsoară posibilitatea inițierii fisurii scade odată cu creșterea temperaturii, datorită faptului că are loc o creștere a tenacității materialului iradiat odată cu temperatura;
- b. valorile parametrului L_r , care dau o măsură a tendinței de colapsare, cresc odată cu creșterea temperaturii, lucru explicabil prin „înmuierea” materialului;
- c. valorile parametrului L_r pentru colapsarea locală sunt mai mari decât cele pentru inițierea colapsării globale.

Pentru toate situațiile analizate, punctele de evaluare cad în interiorul suprafeței determinate de Curba Generală de Evaluare a Defectării și în consecință cazurile analizate se încadrează la „siguranța în exploatare”. Rezultatele se utilizează în evaluărilor tuburilor de presiune din reactoarele de la Cernavoda supuse inspecțiilor periodice [44].

În **capitolul 3** sunt prezentate lucrările care au avut ca scop implementarea la LEPI a testelor de mecanica ruperii pe probe de tip „C” (**Figura 2**) și de tip CT (**Figura 3**) [6].

Am proiectat dispozitivele necesare realizării testelor pe probe de tip „C” și de tip CT pe mașina de tracțiune Instron Model 5569 existentă în LEPI.

Am realizat teste de mecanica ruperii pe probe de tip „C” și CT. Am obținut parametrii de mecanica ruperii. (factorul de intensitate a tensiunii și viteza de propagare a fisurii). Aceste valori sunt utile ca date de intrare pentru aplicațiile care simulează evoluția acestor fisuri și cu ajutorul cărora se poate estima când acestea pot deveni critice în tuburile de presiune în funcțiune [51].

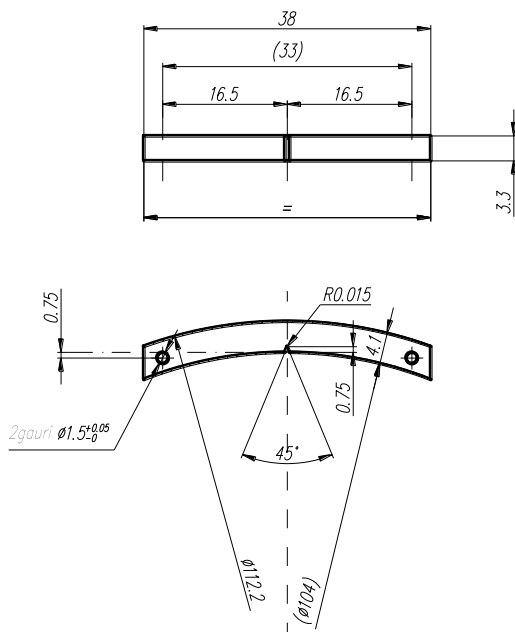


Figura 2. Epruveta tip „C”

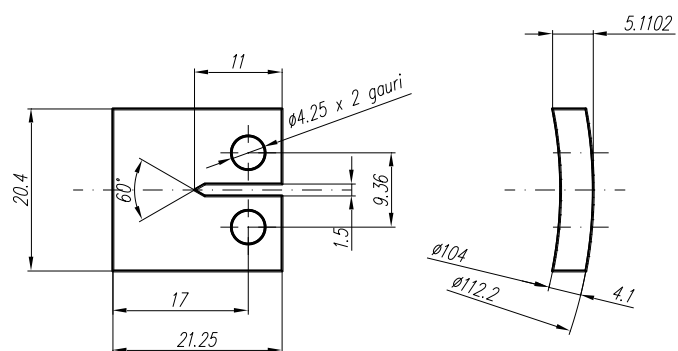


Figura 3. Epruveta tip CT

Am dezvoltat o aplicație în vederea determinării parametrilor modelului micromecanic de defectare GNT pentru modelarea inițierii ductile a propagării unei fisuri într-o probă CT, aliaj Zr-2.5%Nb. În analizele de mecanica ruperii efectuate cu codul FEA-Crack, pentru o probă CT s-a presupus că extincția elementelor finite de pe frontul de avansare a unei fisuri, la inițierea propagării, este echivalentă în plan macroscopic cu atingerea valorii critice a integralei de contur - J_{IC} . Acest lucru se bazează pe ipoteza că în acel moment se realizează de fapt decoeziunea materialului corespunzând cu atingerea valorii critice a fracției de goluri din zona respectivă [46].

De asemenea au mai fost realizate următoarele obiective:

- s-a pus la punct metodologia iterativă pentru identificarea parametrilor funcției potențialului de defectare Φ a modelului GNT;
- din analizele de mecanica ruperii realizate cu codul FEA-Crack pe proba CT, folosind modelul GNT, valorile integralei J în lungul frontului fisurii sunt în domeniul 8-14 kN/m pentru pasul de solicitare mecanic echivalentă în care se realizează prima extincție a elementelor finite;
- condiția de compatibilitate dintre experimentul de determinare a valorii critice J_{IC} și predicția de inițiere a propagării fisurii prin analiza cu elemente finite, pe proba CT, modelata GNT este redată de relația, $J_{IC} = 11,7 \text{ kN/m} \in [8, 14] \text{ kN/m}$, ceea ce a permis obținerea parametrilor de modelare GNT;
- s-a realizat o analiză comparativă a formei frontului de propagare a fisurii din proba modelată GNT prin metoda elementelor finite, cu cea metalografică a probei CT testată experimental pentru determinarea valorii critice J_{IC} a integralei de contur. S-a constatat că există o concordanță satisfăcătoare între experiment și modelarea GNT a propagării unei fisuri într-o probă CT, folosind proprietățile aliajului Zr-2.5%Nb de la temperatura de 300°C;

În concluzie, pentru modelarea propagării unei fisuri în aliajul Zr-2.5%Nb, datorită unei solicitări mecanice la temperatura de 300°C, parametrii modelului Gurson-Needleman-Tvergaard (GNT) pentru metoda elementelor finite din cadrul mecanicii ruperii neliniare sunt: $q_1=1,29$; $q_2=0,98$; $q_3=1,664$; porozitatea inițială este $f_0=10^{-4}$ iar porozitatea critică este $f_c=0,15$ [55], [56], [57].

Așadar aceste teste sunt importante în activitatea de monitorizare a integrității structurale a tuburilor de presiune din centralele de tip CANDU și implicit la prelungirea duratei de viață și a securității în exploatarea acestora [4].

În [capitolul 4](#) sunt prezentate lucrările efectuate în vederea testelor pe probe inelare de teacă de element combustibil – „Ring test”.

Am proiectat și s-a executat în ICN Pitești dispozitivul necesar pentru efectuarea testelor pe inele de teacă de element combustibil ([Figura 4](#)).

Am calculat lungimea calibrată pentru probele inelare pentru testul de tracțiune de tip „Ring test”. Am făcut teste pe cuptorul mașinii de tracțiune pentru a stabili raportul dintre temperatura comandată și cea reală pe probă, măsurată cu ajutorul unui termocuplu. A fost întocmit un grafic cu ajutorul căruia am stabilit corespondența dintre aceste temperaturi.

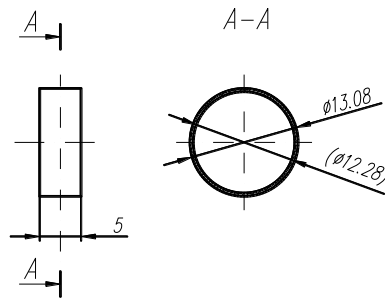


Figura 4 Epruvete inel EC

Am realizat teste de tracțiune pe probe inelare de teacă de element combustibil, „Ring test” pe epruvete experimentale iradiate în reactorul TRIGA de la ICN Pitești și iradiate în centrala nucleară. S-au obținut informații utile privind caracteristicile mecanice prelucrate cu ajutorul softului specializat Instron Merlin Software. S-au întocmit rapoartelor de încercare furnizate de programul mașinii de tracțiune, tip ASTM E8 care prezintă condițiile în care s-a făcut testul, tabelul cu rezultatele și graficele încărcare - alungire și tensiune - alungire specifică [69], [71].

Am analizat și comparat rezultatele obținute cu cele din literatura de specialitate sau din alte lucrări științifice pe aceasta tema. Ținând cont de faptul că proprietățile mecanice depind de istoricul probei, metoda de testare și condițiile în care a fost realizat testul, putem concluziona că rezultatele obținute se încadrează într-o marjă de eroare acceptabilă, mai mică de 10%.

Cu ajutorul codului de calcul ANSYS am realizat o simulare a testelor de tracțiune pe inele de teacă și am făcut o analiză a distribuției stărilor de tensiune și de deformare în diverse condiții de testare. Analiza stărilor de tensiune și deformare cu ajutorul codului de calcul ANSYS este utilă atunci când rezultatele teoretice obținute prin rularea codului se verifică prin rezultatele obținute pe cale experimentală. Faptul că valorile experimentale și cele teoretice sunt foarte apropiate arată că simularea făcută a fost bună și poate fi utilizată pentru predicții viitoare [78], [79].

În [capitolul 5](#) al tezei este prezentat un echipament mobil telecomandat de prelevare probe din tubul de presiune și/sau al canalului combustibil al reactoarelor de tip CANDU ([Figura 5](#)) [110].

Probele sunt utile pentru determinarea concentrației de hidrogen și deuteriu din structura tubului de presiune [3], [4].

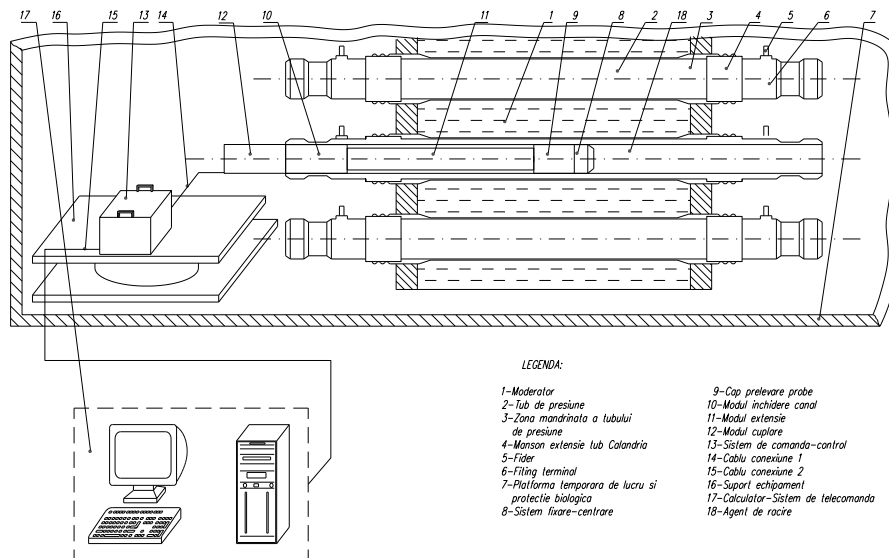


Figura 5. Echipament mobil telecomandat pentru prelevare probe

A fost analizată structura constructivă a canalului combustibil și a ansamblului Calandria cu sistemul de fideri și modul lor de așezare pe cele două fețe frontale ale reactorului CANDU, pentru stabilirea soluțiilor adecvate, a condițiilor restrictive de acces pentru montare / demontare și lucru. S-a realizat analiza condițiilor și stabilirea cerințelor generale pentru prelevarea probelor de tub de presiune (Figura 6). Ținând cont de studiile și documentarea realizate am proiectat echipamentul de prelevare probe, pentru dispozitivul mobil telecomandat cu ajutorul căruia se poate face prelevarea probelor [17].

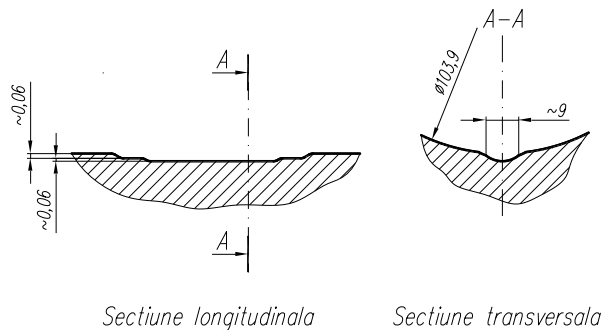


Figura 6. Dimensiuni așchie (scrape)

Realizarea și utilizarea echipamentului de prelevare probe este importantă, pe de o parte în analiza securității nucleare a canalelor combustibile și a reactorului CANDU în general, iar pe de altă parte, compararea valorilor măsurate de hidruri cu cele determinate prin calcul, duce la îmbunătățirea modelelor matematice de estimare a comportării tubului de presiune în timpul funcționării. Controlul în timp al evoluției hidrurilor din tuburile de presiune funcție de parametrii de funcționare ai reactorului, poate conduce la îmbunătățirea funcționării reactorului pe toată durata lui de viață.

În final, în [capitolul 6](#) este prezentată metoda de analiza conținutului de hidrogen în LEPI. Aceasta metodă este calorimetria diferențială, DSC (Differential Scanning Calorimetry) [112] care măsoară solubilitatea finală a solidului, pentru un eșantion, care este legată de

concentrația de H_{eq} în mostră. Forma și dimensiunile probei de tub de presiune sunt redată în [Figura 6](#).

Această metodă de analiză fiind nedistructivă poate fi folosită împreună cu HVEMS (Hot Vacuum Extraction Mass Spectrometry (spectrometria de masă cu extracție în vid), pentru o mai mare încredere în rezultate. Principiul metodei constă în măsurarea diferenței dintre cantitatea de căldură necesară pentru a crește temperatura unei probe și a unei referințe până la o anumită valoare. Concentrația de hidrogen este determinată cu ajutorul calorimetrului diferențial TA Instruments DSC Q2000 din dotarea LEPI din ICN Pitești [113], [114].

3 CONTRIBUȚII ORIGINALE

În cadrul tezei am dezvoltat și adaptat metodele clasice de teste mecanice pe probe de tub de presiune și teaca de element combustibil CANDU cu scopul implementării acestora la condițiile specifice de la Laboratorul de examinare post-iradiere de la ICN Pitești. În acest sens am proiectat și s-au realizat dispozitive specifice pentru testarea diverselor tipuri de epruvete iradiate pe mașina de tracțiune Instron Model 5569.

1. Am realizat teste de tracțiune clasice pe 16 epruvete standard de tracțiune, iradiate în reactorul TRIGA de la ICN Pitești [28]. Caracteristicile mecanice obținute au fost utilizate pentru modelarea unui defect ascuțit de tip fisură pe fața inferioară a tubului de presiune CANDU, în planul radial-longitudinal folosind capabilitățile de pre-procesare ale codului FEA-Crack, Am realizat modelări cu codul FEA-Crack ale proprietarilor de material prin plasticitatea de deformare și plasticitatea incrementală, pentru 4 probe din cele 16, prelevate pe direcție transversală în domeniul de temperaturi 70°C - 300°C și am obținut stările de tensiune von Mises care descriu plasticitatea aliajului iradiat în apropierea fisurilor. Pentru toate situațiile analizate, punctele de evaluare cad în interiorul suprafeței determinate de Curba Generală de Evaluare a Defectării și în consecință cazurile analizate se încadrează la „siguranța în exploatare”. Rezultatele se utilizează în evaluărilor tuburilor de presiune din reactoarele de la Cernavoda supuse inspecțiilor periodice [44].
2. Am realizat teste de mecanica ruperii pe probe de tip „C” și am obținut parametrii de mecanica ruperii (factorul de intensitate a tensiunii și viteza de propagare a fisurii). Aceste valori sunt utile ca date de intrare pentru aplicațiile care simulează evoluția acestor fisuri și cu ajutorul cărora se poate estima când acestea pot deveni critice în tuburile de presiune în funcțiune. Așadar aceste teste sunt importante în activitatea de monitorizare a integrității structurale a tuburilor de presiune din centralele de tip CANDU și implicit la prelungirea duratei de viață și a securității în exploatare a acestora [98].
3. Am dezvoltat o aplicație în vederea determinării parametrilor modelului micromecanic de defectare GNT pentru modelarea inițierii ductile a propagării unei fisuri într-o probă CT, aliaj Zr-2.5%Nb. Am realizat o analiză comparativă a formei frontului de propagare a fisurii din proba modelată GNT prin metoda elementelor finite, cu cea metalografică a probei CT testată experimental pentru determinarea valorii critice J_{IC} a integralei de contur. Am constatat că există o concordanță satisfăcătoare între experiment și modelarea GNT a

propagării unei fisuri într-o probă CT, folosind proprietățile aliajului Zr-2.5%Nb la temperatura de 300°C.

4. Am realizat teste de tracțiune pe probe inelare de teaca de element combustibil, „Ring test” pe epruvete prelevate din teci neiradiate, iradiate în reactorul de cercetare de la Pitești și din teci folosite în centrala nucleară [69], [71]. Am analizat și comparat rezultatele obținute cu cele din literatura de specialitate sau din alte lucrări științifice pe aceasta temă. Ținând cont de faptul că proprietățile mecanice depind de istoricul probei, metoda de testare și condițiile în care a fost realizat testul, putem concluziona că rezultatele obținute se încadrează într-o marjă de eroare acceptabilă, mai mică de 10%.
5. Cu ajutorul codului de calcul ANSYS am realizat o simulare a testelor de tracțiune pe inele de teacă și am făcut o analiză a distribuției stărilor de tensiune și de deformare în diverse condiții de testare. Analiza stărilor de tensiune și deformare cu ajutorul codului de calcul ANSYS este utilă atunci când rezultatele teoretice obținute prin rularea codului se verifică prin rezultatele obținute pe cale experimentală. Faptul că valorile experimentale și cele teoretice au fost foarte apropiate arată că simularea făcută a fost bună și poate fi utilizată pentru predicții viitoare [78], [79].
6. Am proiectat și prezentat un robot mobil telecomandat care poate să realizeze examinare vizuală și să colecteze probe de tub de presiune de la suprafața interioară a acestuia în vederea determinării concentrației de hidrogen din tub [17], [110]. Măsurarea concentrației de hidrogen din tubul de presiune se face la Laboratorul de examinare post-iradiere prin metoda Calorimetriei Diferențiale (Differential Scanning Calorimetry - DSC) cu ajutorul calorimetrului diferențial DSC Q2000. Monitorizarea concentrației de hidrogen este o problemă de maximă importanță și în permanență de actualitate deoarece depășirea pragului critic de hidruri din TP conduce la scoaterea acestuia din funcțiune din rațiuni de securitate nucleară [113], [114].
7. Utilizarea acestui robot mobil telecomandat este un factor de noutate întrucât poate înlocui echipamentele utilizate în prezent care sunt mai rudimentare și nu pot fi folosite decât manual [115]. Folosirea acestui echipament va duce la reducerea dozei de radiații încasată de personalul expus care lucrează în centrală. Așadar în activitatea de monitorizare continuă a unei centrale nucleare, acest echipament este legat direct atât de siguranța centralei cât și de cea a personalului.

4 ÎNDEPLINIREA OBIECTIVELOR

Compararea rezultatelor obținute cu datele publicate în literatura de specialitate și în lucrări științifice elaborate în alte laboratoare, prezentate în conferințe științifice internaționale sau publicate în reviste din domeniul nuclear, certifică aceste date și atestă îndeplinirea obiectivelor propuse.

De asemenea publicarea rezultatelor obținute în reviste de prestigiu din domeniu atestă importanța lucrărilor desfășurate și faptul că aceste obiective au fost realizate.

Rezultatele testării la tracțiune a probelor de Zr-2,5% Nb iradiate în capsula C5 le-am prezentat la conferința internațională E-MRS Spring Meeting - Nice 2006 și le-am publicat în

Journal of Nuclear Materials 362 (300–308) din 31 mai 2007 în articolul „The irradiation effects on zirconium alloys” [22], [23].

Testele mecanice pe probe prelevate din elementul combustibil iradiat la ciclaj de putere și testele mecanice pe probe prelevate din elementele combustibile experimentale iradiate în reactorul TRIGA le-am prezentat la conferința internațională E-MRS Spring Meeting - Strasbourg 2008 și le-am publicat în Journal of Nuclear Materials 385 (2009) 387–391 din 31 martie 2009 în articolul „Pressurized heavy water reactor fuel behaviour in power ramp conditions” [71].

Am înregistrat un brevet de invenție împreună cu domnul Popa Ilie pentru un robot cu deplasare autonoma în interiorul suprafețelor cilindrice. Eu am proiectat structura mecanică și cinematica iar domnul Popa Ilie s-a ocupat de partea de comandă și automatizare a robotului [110].

Am realizat un articol cu titlul „Remote controlled robot for visual inspection and sampling of the interior of CANDU pressure tubes”, care prezintă modelul robotului proiectat pentru prelevarea probelor TP, propus pentru a fi publicat în revista Progress in Nuclear Energy.

Am realizat și propus pentru a fi publicat în Buletinul Universității Politehnica București articolul „Ring tests on CANDU fuel elements sheath samples” care prezintă analiza rezultatelor obținute în urma testării tecilor de element combustibil.

Am participat la conferința internațională E-MRS 2015, SPRING MEETING unde am prezentat lucrarea „Investigative technique of CANDU pressure tubes out of service” care prezintă tehnicile de investigare a tuburilor de presiune scoase din funcțiune.

Am participat alături de domnul Vasile RADU la elaborarea articolului „Micromechanical model for the crack initiation and grow in the CANDU pressure tube (Zr-2.5%Nb alloy)”, care este propus să fie publicat în Journal of Mechanical Science and Technology – Springer.

De asemenea am participat alături de domnul Alexandru Nitu la elaborarea articolului "Investigation of the ODS steels mechanical properties by means of non-standard tests" care este propus să fie publicat în Journal of Mechanical Science and Technology – Springer.

In cadrul susținerii din școala doctorală s-a concluzionat ca lucrarea îndeplinește condițiile unei teze de doctorat și s-a propus susținerea publică.

BIBLIOGRAFIA TEZEI

1. *Structural Mechanics in Reactor Technology Conference*. **Puls, Manfred P.** Washington DC : SMiRT 16 – August 2001, 2001.
2. *Materials development for Indian nuclear power programme: an industry perspective*. **M Narayana Rao, Mishra Dhatu Nigam Limited, Hyderabad.** Chennai, India : Asian Nuclear Prospects (ANUP), 10-13 October 2010, 2010.
3. *Effect of Hydrogen Isotope and Concentration on Delayed Hydride Crack Growth Rates in Zr-2.5Nb Pressure Tubes*. **Gordon K. Shek, Harry Seahra.** Xi'an, China : ICONE18-29786, May 17-21, 2010, 2010.
4. **IAEA.** *Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: CANDU Pressure Tubes*. 1998. TECDOC-1037.
5. **Leger, Marc.** *Fuel Channel Life Management*. Cernavoda NPP : IAEA Workshop on Plant Ageing Management, iunie 11-14, 2001.
6. **ASTM E 399.** *Standard Test Method for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*. ASTM E 399.
7. **G. Lin, R.L.Eadie.** *Monitoring Cracking Advance Using Combined Acoustic Emission and Potential Drop in Zr-2.5%Nb*.
8. *The Effect of Load Reduction on Crack Initiation Behavior of Hydrides From Flaws in Zr-2.5Nb Pressure Tube Material*. **Jun Cui, Gordon K. Shek.** s.l. : ICONE18-29880, 2010.
9. *Examination of Parameters Affecting Overload Fracture Behavior of Flaw-Tip Hydrides in Zr-2.5Nb Pressure Tubes in CANDU Reactors*. **Shek, J. Cui and G.K.** Nice, France, May 13-18 : ICAPP 2007, 2007.
10. **M.P.Puls.** *Assessment of ageing of Zr-2.5%Nb pressure tubes in CANDU Reactors*. s.l. : Nuclear Engineering and Design, 1997. 171, pp 137-148.
11. *Evaluation of the Influence of Hydrides to the Stress Intensity Factor of Zirconium –2.5% Niobium Alloy*. **Janulionis, Remigijus, et al.** Orlando, Florida, USA : ICONE16, May 11-15, 2008.
12. **V.Radu, ș.a.** *Influența absorbției de hidrogen asupra proprietăților mecanice - comparație între experiment și evaluare în codul CANTUP*. Pitești : ICN Pitești, 1996. Raport Intern.
13. **P. Janzen, R. Joynes, L. W. Green, V. Urbanic.** *MONITORING PRESSURE TUBE HEALTH BY MICRO-SAMPLING*. Korea : the 4th IAEA, 1996 April 21 to 26.
14. *Studiul modificărilor microstructurii aliajului Zr-2,5%Nb în decursul ciclurilor termice de tip loca*. **Maria Mihalache, Tiberiu Meleg, Margarit Pavelescu.** Bucuresti : Revista Română de Materiale, 2010, Vols. 40 (4), 349 - 358.
15. **IAEA.** *Ageing management for Nuclear Power Plants, IAEA Safety Guide No. NS-G-2.12*. Viena : IAEA, 1998. TECDOC-1037-1998.
16. **N. Dănilă, I. Prisecaru.** *Centrale nucleare electrice*. București : Editura didactică și pedagogică, 1980.
17. **Popa, I.** *ROBICN.1 – Robot mobil telecomandat pentru examinare vizuala a îmbinărilor mandrinate ale tuburilor de presiune si Calandria. Execuție model experimental. Sistem de Comanda si Control*. Pitesti : SCN Pitesti, 1998.

18. **Halsall, MHE Larcombe and JR.** *Robotics in nuclear engineering*. London : Graham & Trotman, 1989.
19. **H. Lee Martin, D.P. Kuban.** *Teleoperated robotics in hostile environments*. Michigan : Deaborn, 1990.
20. **Ionescu, S.** *Testarea la tractiune a probelor de Zr-2.5%Nb iradiate in capsula C5*. Pitesti : ICN Pitesti, 2004. Raport Intern.
21. **Berinde, Alexandru.** *Elemente de fizica si calculul reactorilor nucleari*. Bucuresti : Editura Tehnica, 1977.
22. **Gh. Negut, M. Ancuta, V. Radu, S. Ionescu, V. Stefan, O. Uta, I. Prisecaru, N. Danila.** *The irradiation effects on zirconium alloys*. s.l. : Journal of Nuclear Materials, 31 may 2007. 362, pg. 300–308.
23. *Nuclear Materials and Materials for Fusion*. **Editor, Degueldre.** Netherlands : Elsevier - Science Direct, 2007, Vol. 203. Pg,300-308.
24. **Gh.Buzdugan.** *Rezistența materialelor*. București : Ed.Tehnică, 1980.
25. **ASTM E 8M.** *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2004. ASTM E 8M.
26. **SR EN 10002-1.** *Materiale metalice – Încercarea la tracțiune*. s.l. : Standard Roman, 1995. SR EN 10002-1.
27. **ASTM E-21.** *Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*. 2003. ASTM E-21.
28. **Radu, V.** *Procedura privind testarea la tracțiune si examinarea post-iradiere a probelor de Zr-2.5%Nb iradiate in capsula C5*. Pitești : ICN Pitesti, 2002. Raport Intern.
29. **ICN Pitești.** *Procedura “Încercarea la tracțiune”*. Pitești : ICN Pitești. Procedura ICN.
30. **BEGL.** *Assessment of the Integrity of Structures Containing Defects, Published in the UK*. Barnwood : British Energy Generation Ltd, 2001. R6/Revision 4.
31. **BS 7910.** *Guide on methods of assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. London : British Standards Institution, 2000. BS 7910.
32. **M. Ancuta, s.a.** *Inercarea la iradiere in mediu inert a aliajului Zr-2.5%Nb in capsula C5, camapania a V-a Finalizarea test*. s.l. : ICN Pitesti, 1998. Raport Intern.
33. **M. Ancuta, sa.** *Inercarea la iradiere in mediu inert a aliajului Zr-2.5%Nb in capsula C5*. s.l. : ICN Pitesti, 2000. Raport Intern.
34. **Ursu, Ioan.** *Energia Atomica*. Bucuresti : Editura Stiintifica, 1973.
35. **Garbea, Dan.** *Analiza cu elemente finite*. București : Editura Tehnica, 1990.
36. **D.A.Scarth, E.Smith.** *Developments in flaw evaluation procedures for Zr-Nb pressure tubes*. s.l. : Fuel Channel Seminar Proceedings, 2004.
37. **S.T. ROLFE, J.M. BARSOM.** *Fracture and Fatigue Control in Structures*. New Jersey : Prentice-Hall.Inc.
38. *Tensile Properties of Zr-2.5Nb Pressure Tube Alloy between 25 and 800 °C*. **R. N. Singh, R. Kishore, T. K. Sinha and S. Banerjee.** Mumbai-400-085 : Materials Science Division Bhabha Atomic Research center, 2000.
39. *Minutes of the meeting on the specification of Zr-2.5Nb pressure tube material and comments of Metallurgy division in this regard*. **Banerjee, S.** June 1990. Ref: Met/Zr-Nb/90/1274.
40. **Ursu, Ioan.** *Fizica și tehnologia materialelor nucleare*. București : Editura Academiei, 1968, reeditată în 1982.

41. **Bement, A. L.** *Irradiation Effects on Structural Alloys for Nuclear Reactor Applications*. Philadelphia, Pa: American Society for Testing and Materials : ASTM International; Symposium on Irradiation Effects on Structural Alloys for Nuclear Reactor Applications., 1970. ISBN 10: 0803100698, ISBN 13: 9780803100695.
42. **CAN/CSA.** *Material Standards for Reactor Components for CANDU Nuclear Power Plants*. CAN/CSA N285.6.
43. **AECL.** *Cold Worked Zirconium-2.5 Wt% Niobium Extruded and Drawn Pressure Tubes*. TS-XX-31110-5.
44. **CAN/CSA.** *Periodic Inspection of CANDU Nuclear Power Plants Components*. s.l. : CAN/CSA, 1994. N285.4.
45. **Nuclear Energy Agency.** *Technical Report on Micromechanical versus Conventional modelling in Non-Linear Fracture Mechanics*. s.l. : Nuclear Energy Agency, JT00110912, , 17 July 2001. NEA/CSNI/R(2001) 6.
46. **M. Raki and al.** *Micromecanism of ductile fracture initiation-void nucleation and growth*. s.l. : Mechanical Engineering. vol1, nr 7, 2000, pp. 825-833.
47. **E.G.Price.** *Fuel Channel- Introduction and Review*. s.l. : Fuel Channel Seminar Proceedings, 15-16 Noiembrie 2004, 2004.
48. **Wong, H., Moan, G., Richinson, P., Sarth, D.** *Pressure tube fitness for service in CANDU reactors*. Bombay, India : presented at third IAEA Tech. Comm. Mtg. on Operational Safety Experience for Pressurized Heavy Water Reactors, 1994.
49. **G.K.Shek, M.Resta Levi.** *Experimental data for assessment of DHC initiation and growth from flaws in Zr-2.5%Nb pressure tubes*. s.l. : Fuel Channel Seminar Proceedings, 15-16 Noiembrie 2004, 2004.
50. *Technical Requirements for In-service Evaluation of Zirconium Alloy Pressure Tubes in CANDU reactors*. s.l. : CSA. N285.8-05.
51. **M. Roth, sa.** *Metodologie de analiză/evaluare a tuburilor de presiune CANDU înlocuite în CNE Cernavodă*. Pitesti : ICN Pitesti, 2011. Raport Intern.
52. **Ionescu, S.** *Procedurarea tehnicilor de investigare a TP inlocuite la CNE-Cernavodă*. Pitesti : ICN Pitesti, 2012. Raport Intern.
53. **S. Ionescu, I. Man.** *Metodologie de măsurare a parametrilor specifici mecanismului DHC pe probe iradiate*. Pitesti : ICN Pitesti, 2010. Raport Intern.
54. **Ionescu, S.** *Procedura de prelevare a probelor CT și C-ring din tubul de presiune CANDU*. Pitesti : ICN Pitesti, 2009. Raport Intern.
55. **ESRD Inc.** *StressCheck-Finite Element Software*. s.l. : Advanced Guide, ESRD-USA, May 2001. Release 6.0.
56. **Rohit Rastogi, et. al.** *Assessment of integrity of components in piping of 500 Mwe PHWR: using R-6 method*. 2002. NED 212 (2002), pp. 99-108.
57. **Park, Y.W. et al.** *Structural Integrity assessment of pressure tubes for Wolsong Unit 1 based on operational experiences*. 2002. NED 212 (2002), pp.41-48.
58. **Rasmussen, Kim JR.** *Full-range Stress-strain Curves for Stainless Steel Alloys*. Sydney : The University of Sydney, Centre for Advanced Structural Engineering, (<http://www.civil.usyd.edu.au/>) , November 2001. Research Report N0 R811.
59. **W.Brocks, et all.** *Computational Aspects of Nonlinear Fracture Mechanics*. s.l. : Elsevier Pergamon, 2003. Comprehensive Structural Integrity, vol. 3, pp. 127-209.

60. **T.L.Anderson.** *Fracture Mechanics. Fundamentals and Applications.* s.l. : CRC Press, 1995. second edition.
61. **B. Karihaloo, Q.Z.Xiao.** *Linear and Nonlinear Fracture Mechanics.* s.l. : Elsevier Pergamon, 2003. Fundamental Theories and Mecanisms of Failure in Comprehensive Structural Integrity, vol.2.
62. **V.Radu, M.Roth.** *Studiu privind stabilirea metodologiei de testare pentru determinarea parametrului de mecanica ruperii –“integrala J”- pe probe de tub de presiune.* Pitesti : ICN Pitesti, 2006. Raport Intern.
63. **AECL.** *Fuel Design Manual.* 1988.
64. **Östberg, G. Anevi and G.** *A Study of Ring Test for Determination of Transverse Ductility of Fuel Element Canning.* Nyköping, Sweden : Studsvik, 1971.
65. **Petterson, K.** *A Critical Analysis of the Ring Expansion Test on Zircaloy Cladding Tubes.* Nyköping, Sweden : Studsvik, 1974.
66. **D. G. Hardy, J. R. Stewart and A. L. Lowe Jr.** *Development of a Closed End Burst Test Procedure for Zircaloy Tubing.* Ontario Canada : Chalk River, Lab.
67. **Kitano, K.** *Optimization of Sample Geometry in Modified Ring Tensile Test.* s.l. : Japan Atomic Energy Research Institute, 1998.
68. **Östberg, G. Anevi and G.** *A Study of Ring Test for Determination of Transverse Ductility of Fuel Element Canning.* Studsvik, Nyköping, Sweden : s.n., 1971.
69. **S. Ionescu, s.a.** *Teste mecanice pe probe prelevate din elementul combustibil testat la ciclaj de putere în capsula C9.* Pitesti : ICN Pitesti, 2007. Raport Intern.
70. **S. Ionescu, sa.** *Teste mecanice pe probe prelevate din elementele combustibile experimentale iradiate în reactorul TRIGA.* Pitesti : ICN Pitesti, 2008. Raport Intern.
71. **S. Ionescu.** *Pressurized heavy water reactor fuel behaviour in power ramp conditions.* Strasbourg : Jurnal of Nuclear Materials, 2009. 385.
72. **ASTM - E 453.** *Practice for Examination of Fuel Element Cladding Including the Determination of the Mechanical Proprieties.* 1979. ASTM E 453.
73. **Ionescu, S.** *Experimentări în vederea standardizării metodei de încercare mecanică a tecii de Zy4 utilizând epruvete sub formă de inele.* Pitești : ICN Pitești, 2003. Raport Intern.
74. **Ionescu, Silviu.** *Teste de tracțiune pe epruvete de teacă de Zy-4 în condiții de ciclaj.* Pitești : ICN Pitești, 2004. Raport Intern.
75. **Ionescu, S.** *Elaborarea unei metode și a tehnicii asociate pentru încercarea mecanică a tecilor iradiate prin teste la tracțiune pe inele.* Pitești : ICN Pitești, 2002. Raport Intern.
76. **M. Pârvan, șa.** *Examinarea post-iradiere a unui element combustibil iradiat tip CANDU depozitat intermediar uscat în puțurile de stocaj din interiorul celulelor fierbinți de la LEPI.* Pitești : ICN Pitești, 2003. Raport Intern.
77. **M. Pârvan, șa.** *Examinarea post-iradiere a unui element combustibil iradiat tip CANDU depozitat intermediar uscat în puțurile de stocaj din interiorul celulelor fierbinți de la LEPI.* 2005 : ICN Pitești. Raport Intern.
78. **Alexandru Nitu, Dragos Ionescu, s.a.** *EFACTUL PRECIPITATELOR DE HIDRURI ASUPRA COMPORTARII MECANICE A TUBURILOR DE ZIRCALOY-4 ALE FASCICULULUI SEU-43. ETAPA 2.* Pitesti : ICN, 2014. Raport Intern.
79. **Roman, Roxana.** *Le comportement de Zircaloy-4 en conditions de fonctionnement dans le réacteur CANDU – avancé.* Pitesti : Nuclear 2016, 2016.

80. **S. Ionescu.** *Teste de tracțiune pe epruvete de Zy-4 pentru determinarea proprietăților mecanice.* Pitești : ICN Pitești, 2005. Raport Intern.
81. **Ionescu, S.** *Teste de tracțiune pe inele de Zircaloy-4 la temperaturi cuprinse între 20°C și 300°C.* Pitești : ICN Pitești, 2006. Raport Intern.
82. *Mechanical And Irradiation Properties Of Zirconium Alloys Irradiated In Hanaro.* **Oh-Hyun Kwon, Kyong-Bo Eom, Jae-Ik Kim, Jung-Min Suh, Kyeong-Lak Jeon.** Daejeon, Korea : KEPCO Nuclear Fuel Co. Ltd, 2011.
83. *Damage, in : Solids.* **A. Seeger and U. Essman, Radiation.** New York and London : Academic Press, 1962.
84. *Effect of Neutron irradiation on the Tensile Properties of Zircaloy-2 and Zircaloy-4.* **H. R. Higgy, F. H. Hammad.** p. 215, 1972, s.l. : Journal of Nuclear Materials, Vol. 44.
85. **Baroch, E. N. Harbinson and C. J.** p. 107, 1968, s.l. : Journal of Materials, Vol. 3.
86. **Whitmarsh, C. L.** *Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 Properties Relevant to N.S. Savannah Reactor Design.* Oak Ridge, Tennessee : OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, 1962.
87. **AECL.** *AECL Industrial Symposium on Equipment Manufacturing and Development Problems for Nuclear Power Systems.* Chalk River, Ontario : AECL-990., April 19 and 20, 1960.
88. **J. A. De-Mastry, F. R. Shober, R. F. Dickerson.** *Development of High-Strength Corrosion-Resistant Zirconium Alloys.* s.l. : BMI-1418, Feb. 22, 1960.
89. **United Nations.** *Properties of Reactor Materials.* Geneva, New York : Part I, Proceedings of the Second United Nations International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 1958. Vol. 5, pp 1—310.
90. **Perryman, E. C. W.** *A Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 Properties Relating to the Design Stress of CANDU Pressure Tubes.* s.l. : CRMet-937, June 1960.
91. **J. G. Goodwin, F. L. Shubert.** *The Effects of Primary Processes on the Properties of Zircaloy-4.* s.l. : WAPD-ZH-23, March 1960. pp 1-6 in Zirconium Highlights.
92. **M. Mincu, S. Ionescu, sa.** *Examinarea post-iradiere a fascicolului *** iradiat in Unitatea * de la CNE Cernavoda.* Pitesti : ICN Pitesti, 2013, 2014, 2015, 2016. Rapoarte Interne.
93. **M.Gafițeanu.** *Organe de mașini.* București : Ed.Tehnică, 1983.
94. **Moncea, J.** *Geometrie descriptivă și desen tehnic.* București : Editura Didactică și Pedagogică, 1982.
95. **Marin Dumitru, sa.** *Desen tehnic industrial pentru construcția de mașini - Îndrumar.* București : Institutul Politehnic București, 1998.
96. **Georgescu, G.S.** *Îndrumător pentru ateliere mecanice.* București : Editura Tehnică, 1978.
97. **J.T.Dunn, s.a.** *CANDU-PHWR fuel channel replacement experience.* s.l. : AECL-7538, Canada, nov. 1982.
98. **B.Strachan, D.R.Brown.** *Operating performance and reliability of CANDU PHWR fuel channels in Canada.* s.l. : AECL-7543, Canada, march 1983.
99. **M.N.E. Larcombe, J.R. Nolsall.** *Robotica in nuclear engineering the comission of the European Communities.* Viena : AIEA, 1989.
100. **M.G. Lipsett, K.H. Rody.** *Mobile Robotics for CANDU Maintenance.* s.l. : canadian Nuclear Society Bulletin, winter 1996. vol. 17, No. 1.
101. **K.Uematsu.** *Remate and automation technologies.* Tokio : Review of Japan's experience, 1988.
102. *****.** *Secvențe cap M.I.D.* Pitești : I.C.N. Pitești, 1992.

103. **D. Drimer, s.a.** *Roboți industriali si manipolatoare*. București : Ed. Tehnica, 1985.
104. **V. Ispas, s.a.** *Roboti industriali*. Cluj-Napoca : Ed. Dacia, 1985.
105. **A. Davidovici, s.a.** *Modelarea, simularea si comanda manipuloarelor si roboților industriali*. București : Ed. Tehnica, 1986.
106. **N. Lee Martin, Daniel P. Kuban.** *Teleoperated robotics in hostile environment*. Michigan : Bearborn, 1986. 48121.
107. **George Sindilaru, Alin Nicolae Bobolea.** *Dozimetria si protectia contra radiatiilor*. Bucuresti : Editura BREN, 2002.
108. **Georgescu, VI.** *SMC Sistem Manipulare Combustibil pentru reactorul CANDU 600, IRNE Pitești, Departamentul Proiectare București*. Măgurele : s.n., 1989.
109. *Închidere canal - Memoriu de prezentare*. **N. Pană, ș.a.** Pitești : I.R.N.E. Pitești, Compartimentul Proiectare București-Măgurele, 1983. Nr.doc 0-1-31140-M.P..
110. **I. Popa, I.S. Ionescu.** *Robot mobil telecomandat pentru examinarea vizuală a îmbinării mandriate a tuburilor de presiune și Calandria - ROBICN.1*. București : OSIM, 30.10.2000. Brevet de Invenție Nr. 114427.
111. *The Metallurgy of Pressure Tubes*. **R.G.Fleck.** s.l. : OH Research Report, 1990. no.89-270 - K/1990.
112. *Influenta modului de preparare a probelor in determinarea concentratiei de hidrogen utilizand metoda calorimetriei cu scanare diferentia*. **Marinescu Răzvan, Mincu Marin.** Pitesti : s.n., 2014. Nuclear 2014.
113. *Determinarea concentratiei de hidrogen in tuburile de presiune utilizand calorimetria cu scanare diferentia*. **R. Marinescu, M.Mincu.** Pitesti : s.n., 2015. Nuclear 2015.
114. *Determinarea concentratiei de hidrogen in aliaje de zirconiu prin calorimetrie cu scanare diferentia*. **R. Marinescu, M. Mincu.** Bucuresti : s.n., 2014. FOREN 2014.
115. **Mehmi, A.** *Fuel Channel Replacement Tooling and Technical Support for Wolsong 1*. Ontario, Canada : AECL CANDU.