

## REZUMAT

Joncțiunile unghiulare ale elementelor tubulare cilindrice în construcție sudată, neconsolidată, sunt o alternativă larg răspândită în realizarea traseelor tehnologice tubulare. Datorită discontinuităților geometrice, în condițiile acțiunii solicitărilor specifice, acestea prezintă puternice concentrări ale tensiunilor mecanice.

Prin concentrator de tensiuni mecanice se înțelege oricare sursă sau anomalie de natură constructivă, metalurgică etc. care, în dreptul său și în imediata sa apropiere, cauzează creșteri în intensitate ale tensiunilor mecanice.

În vederea eliminării riscului tehnic previzibil și inacceptabil în exploatare, a structurilor de acest tip, este necesară stabilirea unei metode eficiente pentru cuantificarea efectelor concentratoare.

De regulă, coeficienții de concentrare a tensiunilor mecanice, se determină direct, pe baza rezultatelor numerice, acestea fiind obținute prin rezolvări analitice, pe cale experimentală sau prin simulare numerică computerizată.

Formulele fundamentale ale Rezistenței Materialelor, utilizate frecvent în practica inginerescă, sunt aplicabile și cu adevărat corecte numai pentru elementele care au secțiune constantă sau lin modificabilă, elemente considerate ca fiind simple, tipice sau etalon. Asemenea condiții se regăsesc rar în zonele puternic solicitate ale structurilor reale. Existența de orificii, canale, adâncituri, proeminențe, filete, raze de racordare și alte modificări drastice de configurație geometrică-structurală (incluziuni, goluri, nepătrunderi de sudură etc.) implică o distribuție mult mai complicată de tensiuni mecanice, în comparație cu cea corespunzătoare elementelor tipice. Ca urmare, devine inevitabilă prezența de zone cu creșteri locale ale intensității tensiunilor mecanice și asemenea efect se denumește concentrare de tensiuni mecanice.

Analiza stării de tensiuni mecanice și de deformații a elementelor de structuri/sisteme, în general și determinarea coeficienților de concentrare, în particular, se face prin metode și modalități analitice (problemele Teoriei Elasticității), numerice (metoda elementelor finite) și experimentale (fotoelasticitate, tensometrie electrorezistivă, interferometrie holografică, metoda lacurilor casante etc.). Datorită faptului că, numai pentru un număr redus de cazuri se cunosc soluții analitice exacte, în marea lor majoritate studiile se efectuează prin metode fie numerice, fie experimentale. Calculele prin metode numai numerice pot conduce la rezultate inexacte și aceasta ca urmare fie a neconcordanței condițiilor de contur date cu cele reale, fie a existenței erorilor de computerizare. Pe de altă parte, utilizarea doar a metodelor experimentale implică dificultăți, fiind limitată de particularități specifice și de cele mai multe ori nepermițând rezolvarea deplină a problemei. Rezultă de aici interesul major privind utilizarea în combinație a metodelor analitice, numerice și experimentale, care, în circumstanțele analizei de efecte concentratoare, ar putea consta din determinarea pe conturul zonei date – experimental – a condițiilor în deplasări și tensiuni mecanice (deformații) sau într-o formă asociată; plecând de la aceste condiții, ca fiind de contur, se studiază – analitic sau numeric – distribuția de tensiuni mecanice în zona respectivă. Se pot elabora, astfel, metode experimentale-numerice de analiză (tensometrie+metoda elementelor finite → MEF), a căror precizie de determinare a concentrării de tensiuni mecanice furnizează rezultate pertinente.

Metoda elementului finit cunoaște o tot mai mare dezvoltare și implementare în procesul de creație/design a produselor, programele utilizate sunt performante și din ce în ce mai specializate pe domenii. Privită în ansamblu, chiar dacă costurile unei astfel de platforme software sunt ridicate, metoda elementului finit este cea mai eficientă din punct de vedere a costului total al rezultatului obținut.

Simularea numerică permite obținerea cu ușurință a tensiunilor și deformațiilor pentru structuri geometrice complexe, însă, pentru validarea modelului numeric este necesară efectuarea unor analize experimentale care să furnizeze date comparabile în vederea validării modelului numeric. Având un model numeric validat de datele experimentale există posibilități nelimitate în ceea ce privește procesarea rezultatelor analizelor. Starea de tensiuni și deformații este accesibilă în

orice punct al structurii analizate având posibilitatea vizualizării grafice a rezultatelor, într-un mod eficace și intuitiv.

Având în vedere considerațiile cu caracter general expuse anterior, prezenta lucrare își propune ca deziderat atingerea următoarelor obiective, în contextul evaluării concentratorilor de tensiuni mecanobarice la structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior:

- evidențierea stadiului actual și al nivelului de cunoaștere în ceea ce privește evaluarea pe cale analitică, numerică și experimentală a concentrărilor de tensiuni mecanice la nivelul structurilor configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior,
- identificarea factorilor care favorizează apariția concentrărilor de tensiuni mecanobarice în cazul structurilor supuse studiului,
- conceperea unei metodologii, fundamentate pe determinări experimentale și simulări numerice, pentru cercetarea efectului concentrator de tensiuni mecanobarice,
- conceperea și realizarea unui stand experimental care să permită studiul stărilor de tensiuni și deformații pentru structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior implicând metoda de lucru experimentală tensometrică tensorezistivă,
- realizarea unui model numeric care să permită studiul stărilor de tensiuni și deformații pentru structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior, utilizând metoda elementelor finite, și validarea acestuia utilizând rezultatele experimentale,
- determinarea influenței parametrului geometric reprezentat de unghiul ramificațiilor tubulare echidiametrice asupra concentrărilor de tensiuni mecanobarice.

Atingerea acestor obiective va aduce un plus de cunoaștere cu impact direct practic și științific în ceea ce privește cunoașterea și evaluarea concentratorilor de tensiuni mecanobarice la structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior

Prezenta lucrare, constituită în teză de doctorat, este structurată pe 13 capitole urmărind o tratare progresivă, logică și argumentată a problemelor propuse a fi studiate, prezentând atât elemente teoretice cât și analize ale rezultatelor obținute prin simulare sau pe cale experimentală.

Capitolul 1 prezintă o scurtă trecere în revistă a elementelor utilizate pentru ramificarea traseelor tubulare evidențind rolul funcțional al acestora. Capitolele 2 și 3 prezintă fundamentele teoretice pentru calculul tensiunilor și deformațiilor structurilor tubulare presurizate la interior și prezintă conceptul de concentrator și coeficient de concentrare a tensiunilor particularizând cazul structurilor tubulare presurizate la interior. Capitolele 4, 5, 6 și 7 tratează metodele analitice de calcul a concentratorilor de tensiuni prezentând metode de calcul particulare pentru structuri de tip recipient și înveliș, analizând metodele de calcul standardizate și nestandardizate pentru cazul racordurilor. Capitolul 8 este dedicat în totalitate prezentării fundamentelor teoretice ale metodei tensometriei electro-rezistive utilizată în vederea determinării pe cale experimentală a tensiunilor și deformațiilor. Capitolul 9 debutează cu prezentarea fundamentelor matematice ale metodei elementelor finite și a problematicei modelării și analizei structurilor mecanice cu ajutorul acestei metode moderne, în final acest capitol prezintă tipul de element finit utilizat pentru modelarea și simularea comportamentului structurilor configurate cu ramificații tubulare, presurizate la interior. Capitolul 10 prezintă metoda de cercetare utilizată, prezentând standul experimental și modelul numeric utilizate pentru determinările tensiunilor mecanobarice. Capitolul 11 prezintă și analizează rezultatele obținute prin intermediul celor două metode, urmărind validarea modelului numeric prin intermediul rezultatelor experimentale. Capitolul 12 prezintă rezultatele unei serii de simulări numerice cu scopul determinării influenței parametrilor geometrici asupra coeficientului de concentrare a tensiunilor. Capitolul 13 prezintă concluziile acestui studiu analitic și experimental și sunt prezentate contribuțiile personale referitoare la problematica complexă a studiului concentratorilor de tensiuni.

### Cuvinte cheie:

*Joncțiuni unghiulare ale elementelor tubulare cilindrice; concentrator de tensiuni mecanice; risc tehnic previzibil și inacceptabil în exploatare; stare de tensiuni mecanice; metode analitice, numerice și experimentale; tensometrie; metoda elementelor finite; studiu analitic și experimental; influența parametrilor geometrici asupra coeficientului de concentrare a tensiunilor.*

## CUPRINS

### DIVIZIUNEA I

1.Elementele fasonate pentru ramificarea traseelor tehnologice tubulare industriale.....	1
1.1. Generalități. Clasificări .....	1
1.2. Soluții constructive pentru ramificarea traseelor tubulare industriale .....	4
2.Fundamentele teoretice ale calculului structurilor tubulare presurizate la interior .....	11
2.1. Geometria învelișurilor de revoluție .....	11
2.2. Ecuații de echilibru .....	14
2.3. Teoria fără moment .....	17
2.4. Teoria cu moment .....	17
3.Conceptul de concentrator și coeficientul de concentrare a tensiunilor privind structurile tubulare presurizate la interior.....	21
3.1. Efectul de concentrator .....	21
3.2. Efectele de concentrare volumice și locale .....	21
3.3. Factorul global de concentrare .....	22
3.4. Formula lui Neuber .....	25
4. Determinarea prin metode analitice a coeficienților de concentrare a tensiunilor .....	27
4.1. Cazul racordurilor neconsolidate presurizate la interior.....	27
4.2. Cazul racordurilor consolidate presurizate la interior .....	30
4.3. Cazul racordurilor oblice presurizate la interior.....	31
5.Coefficienții de concentrare volumici pentru structurile de tip recipient .....	33
5.1. Inelul sau cilindrul cav .....	33
5.2. Recipientul cilindric și tubulatura cilindrică presurizate la interior .....	35
5.3. Recipientul cilindric cu funduri torosferice, presurizat la interior .....	36
6.Efectul concentrator al orificiilor din componentele și structurile de tip înveliș cilindric cu perete subțire, respectiv din mantalele recipientelor și aparatelor cilindrice.....	39
6.1. Cazul orificiilor circulare normale .....	39
6.2. Cazul orificiilor circulare oblice.....	39
6.3. Cazul orificiilor eliptice.....	42
6.4. Învelișul cilindric cu orificiu circular normal, solicitat la întindere (tracțiune) axială sau presurizat la interior .....	43
6.5. Orificiile circulare din mantalele recipientelor și aparatelor cilindrice.....	45
7.Problema racordurilor .....	51
7.1. Calculul prin metode standardizate .....	51
7.1.1. Metoda compensării .....	51
7.1.2. Metoda tensiunii mecanice → mecanobarice maxime controlate .....	52
7.1.3. Metoda stării la/de limită.....	52
7.1.4. Unele considerații finale.....	52
7.2. Calculul prin metode nestandardizate .....	53
7.2.1. Metoda tensiunilor mecanice → mecanobarice la/de limită.....	54
7.2.2. Acțiunea tehnic elastociclică .....	55
7.2.2.1. Evaluarea simplificată a sarcinii .....	55
7.2.2.2. Calculul analitic al sarcinii.....	58
7.3. Categoriile de tensiuni mecanice → mecanobarice.....	60

### DIVIZIUNEA II

8.Determinarea experimentală a tensiunilor și deformațiilor prin tehnica tensometriei electrezistive .....	63
8.1. Traductorul electrezistiv (TER) .....	63
8.2. Caracteristicile traductoarelor electrezistive .....	63
8.3. Aplicarea traductoarelor electrezistive.....	64
8.4. Principiul tehnicii tensometriei electrezistive .....	65
8.5. Măsurarea variației $\Delta R$ a rezistenței electrice a traductorului .....	65

Contribuții privind evaluarea concentratorilor de tensiuni mecanobarice  
la structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior

---

8.5.1. Puntea tensometrică.....	66
8.5.2. Conectarea traductoarelor în punte.....	68
8.6. Erori de măsurare produse de factori externi perturbatori și compensarea lor .....	69
8.6.1. Erori produse de variația temperaturii.....	69
8.6.2. Erori produse de influența rezistenței electrice a cablurilor de legătură .....	71
8.7. Determinarea tensiunilor principale și direcțiilor principale .....	72
8.8. Etalonarea traductoarelor electrezistive .....	73
9. Analiza tensiunilor și deformațiilor utilizând fundamentele metodei elementelor finite.....	77
9.1. Căi de abordare. Ipoteze.....	77
9.2. Ecuația generală a metodei elementelor finite .....	77
9.3. Tipuri de elemente finite .....	82
9.3.1. Forma elementului finit.....	82
9.3.2. Numărul și tipul nodurilor.....	84
9.3.3. Tipul variabilelor nodale .....	84
9.3.4. Tipul funcțiilor de interpolare .....	84
9.3.5. Proprietățile funcțiilor de interpolare .....	85
9.4. Estimarea erorilor datorate discretizării .....	86
9.5. Proceduri numerice de rezolvare a sistemelor de ecuații liniare de mari dimensiuni .....	88
9.6. Etape ale analizei cu elemente finite .....	88
9.7. Analiza racordurilor prin metoda elementelor finite.....	89
<b>DIVIZIUNEA III</b>	
10. Metodologia de cercetare pentru studiul joncțiunilor tubulare echidiametrale .....	97
10.1. Proiectarea și realizarea structurii standului experimental pentru determinarea stărilor de tensiuni și deformații pentru o joncțiune tubulară, la 45 de grade, cu diametre egale.....	99
10.2. Stabilirea metodei de lucru și elaborarea planului și programului de tensometrare .....	104
10.3. Elaborarea planului și programului de experimente .....	108
10.4. Proiectarea și realizarea modelului numeric pentru analiza tensiunilor și deformațiilor prin metoda elementului finit, pentru o joncțiune tubulară, la 45 de grade, cu diametre egale .....	114
10.5. Realizarea modelului geometric și discretizarea structurii în elemente finite.....	115
10.5.1. Modelul cu elemente finite de tip TETRAEDRAL.....	117
10.5.2. Modelul cu elemente finite de tip SHELL .....	120
10.6. Definierea condițiilor la/de limită și a regimului de solicitare.....	123
11. Încercări experimentale și simulări numerice privind analiza joncțiunilor tubulare.....	125
11.1. Studiul tensiunilor și al coeficienților de concentrare implicând metoda de lucru experimentală tensometrică .....	125
11.2. Studiul tensiunilor și al coeficienților de concentrare implicând simularea numerică.....	138
11.3. Analiza și interpretarea rezultatelor obținute .....	150
12. Studiul coeficienților de concentrare a tensiunilor mecanice pentru joncțiunile tubulare unghiulare, echidiametrale, presurizate la interior.....	159
<b>DIVIZIUNEA IV</b>	
13. Concluzii. Contribuții. Ameliorări. Revendicări .....	167
13.1. Concluzii .....	167
13.1.1. Concluziile studiului analitic.....	167
13.1.2. Concluziile studiului experimental.....	167
13.1.3. Concluziile studiului numeric .....	168
13.1.4. Concluziile studiului legii de variație a coeficientului de concentrare a tensiunilor.....	169
13.2. Contribuții .....	169
13.3. Ameliorări .....	170
13.4. Revendicări .....	170
Bibliografie .....	171
ANEXE .....	177

## ABSTRACT

Tubular branched structures are a common alternative for technological pipe systems. Under specific loads, due to geometrical discontinuities, they show strong concentration of mechanical stresses.

The mechanical stress concentrator means any source or abnormality such as design, metallurgy etc., causing increases in intensity of mechanical stress at its location and in its immediate vicinity.

Is necessary to establish an efficient method to quantify the effects of stress concentration in order to eliminate unacceptable risk and allow a predictable technical exploit for such structures.

Usually, the mechanical stress concentration factors are determined directly, based on numerical results, which were obtained by analytical solutions, by experiment or by numerical computer simulation.

Fundamental formulas of strength of materials, commonly used in engineering practice, are correct and truly applicable only for elements which has constant or smoothly changeable section, elements considered simple, typical or standard.

Such conditions are uncommon for the high stressed areas of real structures. The presence of holes, grooves, protrusions, threads, rays of joints and other drastic changes, structural geometrical configuration (inclusions, holes, welding etc.) involves a more complicated distribution of mechanical stress, compared with the corresponding distribution for the typical elements. Therefore, there is inevitable the presence of zones with local increases of stress level and this effect denotes the mechanical stress concentration.

Analysis of the mechanical stresses and deformations of elements of structures/systems in general and the determination of concentration coefficients, in particular, is made by analytical methods (elasticity theory problems), numerical (finite element method) and experimental (photoelasticity, strain gages technique, holographic interferometry, brittle lacquer method etc.). Because the exact analytical solutions are known only for a small number of cases, the vast majority of studies are being carried out by numerical methods or experimental. Numerical calculation methods alone can only lead to inaccurate results and this is due to mismatch of the input conditions and the actual data or the errors of computerization. On the other hand, using only experimental methods involve difficulties, specific features are limited and often not allowing full resolution of the problem. It follows a major interest to use in combination analytical methods, numerical and experimental that allows analysis of stress concentrators effects, determining the contour area data - experimental – stress and strain conditions, based on these conditions it is studied - analytically or numerically - the distribution of mechanical stress in the area.

Finite element method is experiencing a growing development and implementation in the creative process and product design, the software used are advanced and more and more getting specialized on research fields. Taken together, even if the costs of such software are high, the finite element method is most efficient for the total cost of the outcome.

By numerical simulation it's easy to obtain stresses and strains for complex geometrical structures, however, to validate the numerical model is necessary to carry out experimental analysis to provide comparable data to check the numerical model.

With a good numerical model validated by experimental data the possibilities are unlimited in terms of analysis results processing. The stress and strain state is accessible at any point of the analyzed structure with graphic visualization of results in an effective and intuitive way.

Given the general considerations above, in the context of the stress concentration for inner pressurized tubular branched structures, the goal of this paper is to achieve the following objectives:

- highlight the current status and level of knowledge regarding the evaluation by analytical, numerical and experimental of the mechanical stress concentrations for the inner pressurized tubular branched structures,
- identify the factors favoring the occurrence of stress concentrations for this type of structures,
- designing a methodology, based on experimental measurements and numerical simulations to research the effect of stress concentrators,
- design and build the experimental tubular branched structure that allows the study of stress and strain states for inner pressurized tubular branched structures using strain gauge technique,
- design the numerical model to study stress and strain state for inner pressurized tubular branched structures, using the finite element method and its validation using experimental results,
- find the way that the branching angle affects the stress concentrator for inner pressurized tubular branched structures.

Achieving these objectives will contribute to the direct and practical knowledge with scientific impact regarding the knowledge and assessment of the stress concentrators for inner pressurized tubular branched structures.

This paper, as doctorate thesis, is divided into 13 chapters following a progressive treatment, logic reasoned of the proposed issues to be studied, presenting both theoretical analysis and the results obtained by simulation or experimentally.

Chapter 1 provides a brief overview of the elements used for branching tubular systems highlighting their functional role. Chapters 2 and 3 shows the theoretical basis for calculating the stresses and strains for inner pressurized tubular structures and presents the concept of stress concentration factor for this type of tubular structures. Chapters 4, 5, 6 and 7 deals with analytical methods for calculating the stress concentrator showing particular calculation method for container and shell type structures, analyzing standardized and nonstandardized methodologies for the branched structures. Chapter 8 is presenting the theoretical foundations of strain gauge method used to determine experimentally the stress and deformation. Chapter 9 begins with the presentation of the mathematical foundations of finite element method modeling and analysis of mechanical structures using modern methods and finally this chapter presents the type of finite element used for modeling and simulating the behavior of structures configured with tubular branches. Chapter 10 presents the research method used, showing experimental structure used for experiments and numerical model used for stress/strain measurements. Chapter 11 describes and analyzes the results obtained by the two methods, aiming to validate the numerical model using experimental results. Chapter 12 presents the results of a series of numerical simulations to determine the influence of geometrical parameters on stress concentration coefficient. Chapter 13 presents analytical and experimental conclusions of this study and shows the personal contributions to the study on the complex problem of stress concentrator.

### **Keywords:**

*Tubular branched structures; mechanical stress concentrator; unacceptable risk and predictable technical exploit; distribution of mechanical stress; analytical, numerical and experimental methods; strain gauges technique; finite element method; studiu analytical and experimental sutdy; influence of geometrical parameters on stress concentration coefficient.*

## CONTENTS

### SECTION I

1. Shaped elements for industrial tubular branching technological routes.....	1
1.1. Overview. Classification.....	1
1.2. Constructive solutions for industrial tubular branching paths .....	4
2. Theoretical calculation of inner pressurized tubular structures.....	11
2.1. Geometry of revolution coverings .....	11
2.2. Equations of equilibrium.....	14
2.3. Theory without momentum.....	17
2.4. Theory with momentum.....	17
3. Concentrator concept and stress concentration coefficient on the inner pressurized tubular structures .....	21
3.1. The concentrator effect .....	21
3.2. The local concentration and volume effects.....	21
3.3. Overall concentration factor.....	22
3.4. Neuber's formula .....	25
4. Analytical methods to determine stress concentration factors .....	27
4.1. No strengthened, inner pressurized fittings .....	27
4.2. Strengthened connections, inner pressurized .....	30
4.3. Oblique connections, inner pressurized.....	31
5. Volume concentration ratios for container type structures .....	33
5.1. Ring or hollow cylinder.....	33
5.2. Cylindrical container and inner pressurized cylindrical tubes .....	35
5.3. Cylindrical container with torosferic bottoms, inner pressurized.....	36
6. The concentrator effect of holes as components and thin-walled cylindrical shell structures such, respectively cylindrical containers mantles equipment.....	39
6.1. Normal circular holes .....	39
6.2. Oblique circular holes .....	39
6.3. Elliptical holes.....	42
6.4. Cylindrical shell with perpendicular circular hole axial tensile stressed or inner pressurized.....	43
6.5. Circular holes in cylindrical mantle vessels and equipment .....	45
7. Connections problem.....	51
7.1. Calculated by standard methods.....	51
7.1.1. Compensation method .....	51
7.1.2. Controlled maximum stress method .....	52
7.1.3. Limit state method .....	52
7.1.4. Some final considerations.....	52
7.2. Non standardized calculation methods.....	53
7.2.1. Limit stress method .....	54
7.2.2. Elastocyclic action.....	55
7.2.2.1. Simplified evaluation of stress .....	55
7.2.2.2. Analytical calculation of stress .....	58
7.3. Mechanical stress categories .....	60

### SECTION II

8. Experimental determination of stress and deformation using strain gauges technique.....	63
8.1. Strain gauge.....	63
8.2. Strain gauge characteristics .....	63
8.3. Strain gauge mounting.....	64
8.4. Strain gauge measuring .....	65
8.5. Measuring the electrical resistance variation $\Delta R$ of the transducer .....	65
8.5.1. Strain gauge bridge.....	66
8.5.2. Transducer connecting bridge .....	68

Contribuții privind evaluarea concentratorilor de tensiuni mecanobarice  
la structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior

---

8.6. Measurement errors caused by disturbing external factors and their compensation.....	69
8.6.1. Errors caused by temperature variation.....	69
8.6.2. Errors caused by the influence of the electrical resistance of the connecting cables.....	71
8.7. Determination of main stress and main directions.....	72
8.8. Calibration of stain gauges.....	73
9. Analysis of stresses and strains foundations using finite element method.....	77
9.1. . Ways of approach. Assumptions.....	77
9.2. The general equation of the finite element method.....	77
9.3. Types of finite elements.....	82
9.3.1. Finite element shape.....	82
9.3.2. Number and type of nodes.....	84
9.3.3. Type of nodal variables.....	84
9.3.4. Type interpolation functions.....	84
9.3.5. Properties of interpolation functions.....	85
9.4. Errors estimation due to mesh.....	86
9.5. Numerical procedure for solving large systems of linear equations.....	88
9.6. Stages of finite element analysis.....	88
9.7. Joints analyse by finite element analysis.....	89
<b>SECTION III</b>	
10. Research methodology for studying echidiametral tubular joints.....	97
10.1. Design and experimental realization of stand structure for determining states of stress and strain for tubular junction at 45 degrees, with equal diameters.....	99
10.2. Work method and strain gauges disposal plan.....	104
10.3. Develop of plan and program of experiments.....	108
10.4. Design and implementation of the numerical model for stress and deformation analysis by finite element method for a tubular junction at 45 degrees, with equal diameters.....	114
10.5. Geometric model and finite element mesh structure.....	115
10.5.1. TETRAEDRAL finite element model.....	117
10.5.2. SHELL finite element model.....	120
10.6. Loads and boundary condition.....	123
11. Experimental tests and numerical simulations for tubular joints analysis.....	125
11.1. Study of stress concentration factors and method of work involving experimental strain gauge ..	125
11.2. Study of stress concentration coefficients involving numerical simulation.....	138
11.3. Analyse and results interpretation.....	150
12. Study of mechanical stress concentration factors for echidiametral angular tubular junctions, inner pressurized.....	159
<b>SECTION IV</b>	
13. Conclusions. Contributions. Improvements. Claims.....	167
13.1. Conclusions.....	167
13.1.1. Analytical study conclusions.....	167
13.1.2. Experimental study conclusions.....	167
13.1.3. Numerical study conclusions.....	168
13.1.4. The law of variation of stress concentration factor conclusions.....	169
13.2. Contributions.....	169
13.3. Improvements.....	170
13.4. Claims.....	170
Bibliography.....	171
ANNEX.....	177



## RÉSUMÉ

Jonctions angulaires d'éléments cylindriques tubulaires en construction soudée, non consolidées, sont un itinéraire alternatif pour atteindre la technologie des tubes très répandue. Discontinuités produites par l'action géométrique sous des demandes spécifiques, sont des concentrations de contraintes mécaniques très fortes.

Le concentrateur de contrainte mécanique, toute source ou de la nature des anomalies constructive, comme le métal et ainsi, dans son droit et son voisinage immédiat, produisent des augmentations de l'intensité du contraintes mécanique.

Afin d'éliminer le risque technique prévisible et inacceptable de telles structures est nécessaire d'établir une méthode efficace pour quantifier les effets de concentrateurs. Habituellement, les facteurs de concentration de contraintes mécaniques sont directement déterminés sur les résultats numériques, qui sont obtenus par des solutions analytiques, expérimentale ou de simulation numérique par ordinateur.

Les formules fondamentales de résistance des matériaux, couramment utilisés dans la pratique d'ingénierie, ne sont applicables que vraiment précis sur l'article qui sont constants ou lentement variable, les articles considérés comme simple, typique ou la norme. Ces conditions se retrouvent rarement dans les domaines forts de structures réelles requises. L'existence de trous, canaux, rainures, des saillies, des fils, des poutres de liaison et d'autres changements radicaux dans la configuration géométrique et structurelle (inclusions, les vides, défauts de pénétration de soudage) ne sont pas précisée par les normes, impliquant une distribution plus compliqué d'une contrainte mécanique, par rapport à la correspondance d'éléments typiques. En conséquence, la présence de zones avec une intensité augmente de le contraintes mécanique locale et de la concentration devient inévitable. Cet effet est appelé à une contrainte mécanique.

L'analyse de la contrainte mécanique et de déformation des éléments de structures ou systèmes en général est faite pour déterminer les coefficients de concentration, en particulier, par des méthodes analytiques (problèmes de théorie de l'élasticité), numérique (MEF - méthode des éléments finis) et expérimentale (photoélasticité, tensiomètre électrique résistive, laques holographiques, méthode d'interférométrie fragiles, et ainsi). Parce que seulement un petit nombre de solutions analytiques exactes sont connus, les études sont le plus souvent réalisées par des méthodes numériques ou expérimentales. Seules les méthodes de calcul numérique, peuvent conduire à résultats inexacts en raison des conditions contradictoires avec les données réelles de contour, soit pour des erreurs de l'informatisation. D'autre part, en utilisant uniquement des méthodes expérimentales impliquent des difficultés, les caractéristiques spécifiques sont limitées et souvent ne permet pas la résolution des problèmes pleine. Il suit les principaux avantages de l'utilisation de la combinaison de méthodes analytiques, numérique et expérimentale, qui analyse des effets de concentrateurs circonstances, consisteront à déterminer les données de la zone de contour - expérimentale - les conditions en déplacements et le contraintes mécanique associé (déformations) ; de ces conditions, que la forme, l'étude - analytiquement ou numériquement - de la distribution des contraintes mécaniques dans la région (tensiomètres électriques résistive + MEF), la précision de la détermination de la concentration de contrainte mécanique fournit des résultats pertinents.

La méthode des éléments finis connaît un développement croissant et la mise en œuvre dans le processus de création / conception des produits, la performance et les programmes utilisés sont de plus en plus spécialisées. Dans l'ensemble, même si une telle plate-forme logicielle coûts est élevée, la méthode des éléments finis est la plus efficace pour le coût total du résultat.

La simulation numérique permet une détermination facile de contraintes et de déformation pour les structures complexes géométriques ; cependant, pour valider le modèle numérique est nécessaire une analyse expérimentale qui fournir des données comparables afin de valider le modèle numérique. Avec un modèle numérique validé, Il ya des possibilités illimitées dans le traitement des résultats des tests. L'état de contraintes et de la déformation est accessible à tout point de la structure analysée avec visualisation graphique et des résultats dans un fichier, efficace et intuitive.

Compte tenu des considérations ci-dessus en général, ce document vise à atteindre les suivants objectifs dans les structures configurés avec des branches creuses: le concentrateur de contraintes mecanobarique sous pression en intérieur :

- Mise en évidence l'état actuel et le niveau d'évaluation des connaissances en ce qui concerne le niveau des concentrations de contraintes mécaniques dans les structures tubulaires avec des branches configurées en interne sous pression par méthodes analytiques, numérique et expérimentale,
- Identifier les facteurs qui favorisent le développement de concentrations de contraintes pour les structures à l'étude,
- Conception et d'une méthodologie, basée sur des mesures expérimentales et des simulations numériques pour la recherche de l'effet de concentrateur de contraintes mécanique,
- La conception et la réalisation d'un stand expérimental pour permettre l'étude du contraintes et les états de contrainte pour les structures tubulaires ramifiés, pressurisé en interne en impliquant une méthode de travail par la jauge tension électrique résistive souche expérimentale,
- Créer un modèle numérique qui permet l'étude la contrainte et les états de contrainte pour les structures tubulaires ramifiés, configurés en surpression interne en utilisant la méthode des éléments finis et de sa validation à l'aide des résultats expérimentaux,
- Déterminer l'influence du paramètre géométrique représentée par l'angle de ramification tubulaire de même diamètre sur les concentrations de contraintes mécanique.

La réalisation de ces objectifs apportera une connaissance pratique par répercussions directes et de la connaissance scientifique et l'évaluation en ce qui concerne le concentrateur mecanobarique de tension sur les structures tubulaires ramifiés configuré et sous pression.

Ce travail constitue la thèse de doctorat est divisé en 13 chapitres suit un traitement progressif, logique et raisonnée des questions proposées pour l'étude, présentant les éléments théoriques et l'analyse des résultats obtenus par simulation ou expérimenta.

Le premier chapitre donne un bref aperçu des éléments utilisés pour le branchement des voies tubulaires en soulignant leur rôle fonctionnel. Les chapitres 2 et 3 montrent la base théorique pour le calcul des contraintes et des déformations des structures tubulaires sous pression intérieur et présente le concept de facteur et coefficient de concentration de contraintes, en particulier pour les structures tubulaires pressurisée a l'intérieure. Les chapitres 4, 5, 6 et 7 traite les méthodes analytiques pour le calcul de la contrainte, montrant les méthodes de calcul particulier pour les structures de type coque, récipient, en analysent les méthodes de calcul normalisées et standardisées pour les jonctions. Le chapitre 8 est entièrement engagé à présenter les fondements théoriques de la méthode de la tonométrie électro-résistive utilisée pour déterminer expérimentalement les contraintes et les déformations. Le chapitre 9 commence par la présentation de fondements mathématiques de problèmes de modélisation et d'analyse par des éléments finis et des structures mécaniques en utilisant les méthodes modernes ; au fin ce chapitre présente le type d'élément fini utilisée pour modeler et simuler le comportement des structures tubulaires configurés avec des ramifiées a l'intérieur, sous pression. Le chapitre 10 présente la méthode de recherche utilisée, montrant le modèle expérimental et numérique utilisé pour mesures les tensions mecanobarique. Le chapitre 11 décrit et présente l'analyse des résultats obtenus par deux méthodes, suivant la validation du modèle numérique, à partir des résultats expérimentaux. Le chapitre 12 présentes les résultats d'une série de simulations numériques pour déterminer l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de concentration des contraintes. Chapitre 13 présentes les résultats analytiques et expérimentaux de cette étude et les contributions personnelles sur les questions complexes liées à l'étude de la concentration de contraintes.

### **Mots-clés:**

*Jonctions angulaires d'éléments tubulaires cylindriques, concentrateur de contraintes mécanique, risque technique prévisible et inacceptable, la contrainte mécanique, méthodes analytiques, numériques et expérimentaux tensiomètres, éléments finis, étude analytique et expérimentale, l'influence des paramètres géométriques sur le coefficient de concentration contraintes.*

## TABLE DES MATIÈRES

### SECTION I

1. Éléments formé pour les voies industrielles tubulaires technologie de branchement .....	1
1.1. Vue d'ensemble. Classifications .....	1
1.2. Des solutions constructives pour de branchement industrielles au chemin tubulaire.....	4
2. Calcul théorique de structures tubulaires pressurisée à l'intérieur.....	11
2.1. Géométrie pour coquille de révolution .....	11
2.2. Les équations d'équilibre .....	14
2.3. Théorie sans moment.....	17
2.4. Théorie avec le moment .....	17
3. Concept de concentrateur et le coefficient de concentration des contraintes sur les structures tubulaires pressurisée à l'intérieur .....	21
3.1. L'effet de concentrateur .....	21
3.2. Les effet de la concentration volumique et locale .....	21
3.3. Facteur de concentration globale.....	22
3.4. La formule Neuber .....	25
4. Les méthodes analytiques de déterminer les facteurs de concentration des contraintes .....	27
4.1. Connexions non renforcées pressurisée à l'intérieur .....	27
4.2. Connexions renforcées pressurisée à l'intérieur .....	30
4.3. Connexions obliques renforcées sous l'intérieur pression.....	31
5. Coefficients de concentration volumiques pour les structures de type récipient .....	33
5.1. Anneau ou cylindre creux .....	33
5.2. Récipient cylindrique sous pression ou tubes cylindriques pressurisée à l'intérieur .....	35
5.3. Conteneurs cylindriques avec le fonds torosferic, pressurisée à l'intérieur.....	36
6. Le concentrateur de trous dans les composants et des structures telles paroi mince coquille cylindrique, manteaux, respectivement conteneurs cylindriques et de l'équipement.....	39
6.1. Trous circulaires normales .....	39
6.2. Trous circulaires obliques .....	39
6.3. Trous elliptiques.....	42
6.4. Coque cylindrique avec trou circulaire normales sollicitée à la traction axial ou pressurisée à l'intérieur .....	43
6.5. Trous circulaires dans les vaisseaux du manteau cylindrique et de l'équipement.....	45
7. Problème de connexions.....	51
7.1. Méthodes de calcul normalisées.....	51
7.1.1. Méthode de compensation.....	51
7.1.2. Méthode de tension mécanique maximale contrôlée .....	52
7.1.3. Méthode de limite état.....	52
7.1.4. Quelques considérations finales .....	52
7.2. Méthodes de calcul non normalisées.....	53
7.2.1. Méthode de contrainte mécanique limite .....	54
7.2.2. L'action technique elastocyclique .....	55
7.2.2.1. L'évaluation simplifiée de la charge .....	55
7.2.2.2. Calcul analytique de la charge.....	58
7.3. Catégories de contraintes mécaniques.....	60
SECTION II	
8. La détermination expérimentale de la contrainte et de déformation avec technique de jauge extenso métrique .....	63
8.1. Transducteur electrorezistiv .....	63
8.2. Caractéristiques du transducteur electroresistiv .....	63
8.3. Application de transducteurs electrorezistive.....	64
8.4. Le principe technique de jauge extenso métrique .....	65
8.5. Mesurer la variation de résistance électrique du transducteur.....	65
8.5.1. Passer pont de jauges .....	66
8.5.2. Pont reliant transducteur .....	68
8.6. Les erreurs de mesure causées par des facteurs externes perturbatrices et leur compensation .....	69

Contribuții privind evaluarea concentratorilor de tensiuni mecanobarice  
la structurile configurate cu ramificații tubulare presurizate la interior

---

8.6.1. Erreurs provoquées par des variations de température .....	69
8.6.2. Les erreurs provoquées par l'influence de la résistance électrique des câbles de liaison .....	71
8.7. Détermination de la contrainte principale et les directions principales .....	72
8.8. Étalonnage des transducteurs électroresistive .....	73
9. L'analyse des contraintes et des déformations à l'aide de fondements de la méthode des éléments finis....	77
9.1. Approche. Hypothèses .....	77
9.2. L'équation générale de la méthode des éléments finis .....	77
9.3. Types d'éléments finis .....	82
9.3.1. Forme des éléments finis .....	82
9.3.2. Nombre et type de noeuds .....	84
9.3.3. Type de variables nodaux .....	84
9.3.4. Type de fonctions d'interpolation .....	84
9.3.5. Propriétés de fonctions d'interpolation .....	85
9.4. Estimation des erreurs dues à mesh .....	86
9.5. Procédure de résolution numérique pour les systèmes d'équations linéaires grandes .....	88
9.6. Etapes de l'analyse par éléments finis .....	88
9.7. Jonctions par l'analyse des éléments finis .....	89
<b>SECTION III</b>	
10. La méthodologie de recherche pour l'étude des joints tubulaires de même diamètre .....	97
10.1. Conception et réalisation expérimentale de la structure pour la détermination des états de contraintes et de déformation pour une jonction tubulaire à 45 degrés, avec le même diamètre .....	99
10.2. La méthode de travail et le plan de développement du transducteur plan .....	104
10.3. Élaborer un plan et un programme d'expériences .....	108
10.4. Conception et mise en œuvre du modèle numérique pour l'analyse des le contraintes et déformations par la méthode des éléments finis pour une jonction tubulaire à 45 degrés, avec le même diamètre .....	114
10.5. La géométrie du modèle et la structure par éléments finis .....	115
10.5.1. Modèle par éléments finis TETRAEDRAL .....	117
10.5.2. Modèle par éléments finis SHELL .....	120
10.6. Définir les conditions et des charges .....	123
11. Des essais expérimentaux et des simulations numériques de l'analyse de jonction tubulaire .....	125
11.1. Etude des facteurs de concentration des contraintes impliquant méthode expérimentale jauge de contrainte .....	125
11.2. Étude des coefficients de concentration des contraintes impliquant la simulation numérique .....	138
11.3. Analyse et interprétation des résultats .....	150
12. Étude des facteurs de concentration des contraintes mécaniques pour les jonctions tubulaires de même diamètre angulaire, sous pression intérieure .....	159
<b>SECTION IV</b>	
13. Conclusions. Contributions. Améliorations. Revendications .....	167
13.1. Conclusions .....	167
13.1.1. Conclusions de l'étude analytique .....	167
13.1.2. Conclusions de l'étude expérimentale .....	167
13.1.3. Conclusions de l'étude numérique .....	168
13.1.4. Les conclusions de la loi de variation du coefficient de concentration des contraintes .....	169
13.2. Contributions .....	169
13.3. Améliorations .....	170
13.4. Revendications .....	170
Bibliographie .....	171
ANNEXE .....	177