



**UNIVERSITATEA MARITIMĂ DIN CONstanțA  
ȘCOALA DOCTORALĂ INGINERIE MECANICĂ ȘI MECATRONICĂ**

**Nr. Decizie ..... din .....**

**TEZĂ DE DOCTORAT**

*Contribuții în studiul tensiunilor reziduale din conductele magistrale destinate transportului de fluide*

*Contribution to the pipeline residual stresses study*

**Autor:** *ing. Dmitri Delistoian*

**Conducător de doctorat:** *prof.univ.dr.ing.Mihail Chircor*

**COMISIA DE DOCTORAT**

<b>Președinte</b>	Conf. dr. ing.Ion Omocea	de la	Universitatea Maritimă din Constanța
<b>Conducător de doctorat</b>	Prof.dr.ing. MihailCHIRCOR	de la	Universitatea Maritimă din Constanța
<b>Referent</b>	Prof.univ.dr.ing. Pavel Cristian	de la	Universitatea Tehnică Construcții București
<b>Referent</b>	Conf.univ.dr.ing. Mihai Bejan	de la	Academia Navală "Mircea cel Batrân" Constanța
<b>Referent</b>	Prof.univ.dr.ing. Remus Zăgan	de la	Universitatea Maritimă din Constanța

**CONSTANȚA**

**2018**



**Cuprins**

	Pag.
<b>INTRODUCERE.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPITOLUL 1</b>	
<b>STUDIUL ACTUAL AL INFLUENȚEI PROCESULUI DE FABRICАȚIE ASUPRA</b>	
<b>STĂRII DE TENSIUNE ȘI DEFORMАȚIE A ȚEVILOR SUDATE LONGITUDINAL.....</b>	<b>8</b>
1.1.    CONSIDERAȚII GENERALE.....	8
1.2.    METODELE DE FABRICАȚIE A ȚEVILOR DE DIAMETRUL MARE.....	9
1.3.    PROBLEMATICA TENSIUNILOR REZIDUALE DIN CORPUL ȚEVII SUDATE LONGITUDINAL.....	11
1.4.    CONCLUZII.....	11
<b>CAPITOLUL 2</b>	
<b>STUDIUL ANALITIC AL TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN ȚEVILE SUDATE</b>	
<b>LONGITUDINAL DESTINATE CONSTRUCȚIEI CONDUCTELOR MAGISTRALE.....</b>	<b>20</b>
2.1.    CONSIDERAȚII GENERALE.....	20
2.2.    TENSIUNI REZIDUALE DINTR – O PLACĂ DREPTUNGHIULARĂ DEFORMATĂ PLASTIC.....	22
2.3.    TENSIUNI REZIDUALE DIN CORPUL ȚEVII CU DEFORMАȚII INITIALE.....	22
2.4.    TENSIUNI REZIDUALE CE RĂMÂN DUPĂ OPERAȚIUNEA DE EXPANDARE.....	29
2.5.    CALCULUL ANALITIC AL TENSIUNILOR CIRCUMFERЕНȚIALE MAXIME CE APAR PE PARCURSUL OPERAȚIUNII DE EXPANDARE.....	32
2.6.    CONCLUZII.....	34
<b>CAPITOLUL 3</b>	
<b>STUDIUL NUMERIC AL TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN ȚEVILE SUDATE</b>	
<b>LONGITUDINAL DESTINATE CONSTRUCȚIEI CONDUCTELOR MAGISTRALE.....</b>	<b>35</b>
3.1.    GENERALITĂȚI.....	35
3.2.    PROGRAMUL DE ANALIZĂ CU ELEMENTE FINITE ANSYS R16.2.....	35

3.3.	MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE ÎNDOIRE A MARGINII.....	38
3.4.	MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE OBȚINERE A FORMEI „U”..	46
3.5.	MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE OBȚINERE A FORMEI „O”..	54
3.6.	MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE EXPANDARE.....	61
3.7.	CONCLUZII MODELĂRII NUMERICE.....	66

**CAPITOLUL 4**

<b>STUDIUL EXPERIMENTAL AL Tensiunilor reziduale ce apar în urma procesului de fabricație al țevilor sulate longitudinal.....</b>	<b>68</b>	
4.1.	CONSIDERAȚII GENERALE.....	68
4.2.	PROIECTAREA ECHIPAMENTULUI EXPERIMENTAL.....	68
4.2.1	<b>Proiectarea și executarea sculelor pentru îndoirea marginilor.....</b>	68
4.2.1.1.	<i>Introducere.....</i>	68
4.2.1.2.	<i>Calculul razei de îndoire pentru poanson.....</i>	69
4.2.1.3.	<i>Confecționarea matriței pentru îndoirea marginii.....</i>	71
4.2.2.	<b>Proiectarea și executarea sculelor pentru obținerea formei “U”.....</b>	73
4.2.3.	<b>Proiectarea și executarea sculelor pentru obținerea formei “O”.....</b>	75
4.2.4.	<b>Proiectarea și executarea sculelor pentru expandare.....</b>	76
4.2.4.1.	<i>Introducere.....</i>	76
4.2.4.2.	<i>Calculul de rezistență al brațelor și al articulației expandorului.....</i>	77
4.3.	MĂSURAREA DEFORMAȚIILOR CU AJUTORUL METODEI OPTICE - CORELAREA DIGITALĂ A IMAGINII (CDI).....	85
4.3.1	<b>Descrierea și principiul de funcționare a CDI.....</b>	85
4.3.2	<b>Măsurarea deformațiilor în fiecare etapă a procesului de fabricație a țevilor sulate longitudinal.....</b>	85
4.3.2.1.	<i>Îndoirea marginilor.....</i>	85
4.3.2.2.	<i>Îndoirea în forma “U”.....</i>	89
4.3.2.3.	<i>Îndoirea în forma “O”.....</i>	92
4.3.2.4.	<i>Expandarea.....</i>	96

4.4. DETERMINAREA TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN URMA STUDIULUI EXPERIMENTAL.....	101
4.5. VALIDAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE.....	104
4.6. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE.....	107
<b>CAPITOLUL 5</b>	
<b>CERCETĂRI PRIVIND EFECTUL EXPANDĂRII ASUPRA TENSIUNILOR REZIDUALE DIN ȚEVILE SUDATE LONGITUDINAL JUOE.....</b> <b>108</b>	
5.1. ANALIZA REZULTATELOR CERCETĂRII.....	108
5.1.1 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,0% .....	108
5.1.2 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,2% .....	109
5.1.3 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,4% .....	110
5.2. CONCLUZII.....	111
<b>CAPITOLUL 6</b>	
<b>CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI PRACTICE.....</b> <b>113</b>	
6.1. ANALIZA REZULTATELOR CERCETĂRII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE... <b>113</b>	
6.2 PERSPECTIVE DE CERCETARE.....	114
<b>ANEXE.....</b>	<b>116</b>
A.1. CERTIFICATUL METALURGIC A OȚELULUI L 415 MB.....	117
A.2. VALORILE DEFORMAȚIILOR OBȚINUTE ÎN URMA STUDIULUI EXPERIMENTAL.....	118
A.3. CERTIFICATUL DE ETALONARE PENTRU MAȘINA HIDRAULICĂ DE ÎNCERCĂRI MATERIALE ZDM 100.....	132
A .4. ECHIPAMENTUL UTILIZAT PENTRU EFECTUAREA STUDIULUI EXPERIMENTAL.....	133
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>136</b>

## INTRODUCERE

În prezent, industria petrolului și a gazelor în România prezintă o structură cu o dezvoltare dinamică. Una din ramurile acestei industrii este transportul prin conducte. Transportarea fluidelor din zone de extracție până la clientul final se efectuează prin un sistem de conducte magistrale pe o lungime de 6.177 km în România iar la nivel global 3.562.253 km (datele statistice noiembrie 2016) [87].

Sistemul de conducte tehnologice este important atât pentru buna funcționare a instalației tehnologice propriu-zise, cât și pentru transportul fluidelor și al gazelor. Desigur, o importanță deosebită revine controlului calității țevilor destinate construcției conductelor magistrale, începând cu procesul de fabricație a țevilor și continuă cu procesul de exploatare.

În ultimii ani, sistemul național de conducte magistrale a suferit multiple situații în care anumite zone au fost avariate. Potrivit statisticii, mai mult de 75 % din totalul distrugerilor au avut loc pe segmentul „fierbinte”, adică la o distanță de 20-30 km după stația de pompare, unde există cele mai mari presiuni și temperaturi. Potrivit Inspectoratului pentru Situații de Urgență (ISU), există un algoritm al activităților de protecție civilă în cazul producerii unui accident chimic pe timpul transportului, care presupune culegerea datelor și informațiilor despre accident. De obicei, în procesele verbale de avariere a conductelor magistrale este trecută doar presiunea de lucru la momentul avarierii, dar în momentul în care se efectuează cercetarea cauzelor care au condus la avariera conductei, acele elemente cum ar fi tensiuni ce apar pe parcursul fabricării și transportării țevilor destinate conductelor sau din procesul de exploatare, nu se iau în considerare.

În literatura de specialitate este menționat faptul că tehnologia de fabricație a țevilor are un rol important în apariția și dezvoltarea fisurilor. În acest context, prezenta teză de doctorat propune să aducă contribuții referitoare la problematica tensiunilor reziduale ce ramân în corpul țevilor sudate longitudinal în urma procesului de fabricație.

Scopul propus se atinge prin rezolvarea următoarelor aspecte:

- analiza stadiului actual al problematicii tensiunilor reziduale în țevile sudate longitudinal destinate construcției conductelor magistrale;
- studiul analitic al modelului fizic începând cu placa dreptunghiulară și terminând cu învelișul cilindric subțire;
- modelarea numerică, utilizând metoda elementelor finite, a procesului de fabricație a unei țevi sudate longitudinal;
- modelarea experimentală a unui proces tehnologic de fabricare a unei țevi sudate longitudinal, utilizând metoda de fabricație a țevilor sudate longitudinal – UOE.

Activitatea de cercetare în vederea realizării tezei de doctorat presupune următoarele etape:

- o cuprindătoare documentare cu privire la domeniul fabricării țevilor sudate longitudinal;
- activități de cercetare practică în laboratoarele de încercări mecanice;
- utilizarea unei tehnici moderne de măsurare a deformațiilor;
- vizite efectuate la fabrica de țevi SC Zimtub SA, Zimnicea;
- validarea rezultatelor obținute în urma activității de cercetare.

Teza de doctorat este structurată în cinci capitole principale:

**Capitolul 1** este destinat analizei stadiului actual al realizărilor privitoare la starea de tensiune și deformăție a țevilor sudate longitudinal. Pe baza acestui studiu s-au pus direcțiile principale ale tezei de doctorat, în ceea ce privește problematica procesului de fabricație și influența acesteia asupra stării de tensiune și deformăție.

**Capitolul 2** evidențiază contribuțiile autorului referitoare la dezvoltarea unui studiu analitic al modelului fizic ce reprezintă o țeavă sudată longitudinal.

**Capitolul 3** trece în revistă modelarea și simularea procesului de fabricație unei țevi sudate longitudinal cu ajutorul metodei elementelor finite. Cu ajutorul programului specializat, ANSYS R16.2, a fost posibilă modelarea tuturor etapelor tehnologice ce sunt necesare fabricării unei țevi sudate longitudinal, dar și analiza stării de tensiune și deformăție după fiecare etapă tehnologică.

**Capitolul 4** este destinat unui studiu experimental. Acest capitol cuprinde proiectarea și executarea unor echipamente necesare fabricării unei țevi sudate longitudinal în condiții de laborator și monitorizarea întregului proces cu ajutorul echipamentului de măsurare a deformățiilor principale - Q-400, care are la bază principiul corelării digitale a imaginii. Tot în acest capitol s-au determinat tensiunile reziduale în zonele similare cu cele din studiul numeric prin compararea rezultatelor obținute pe cale experimentală cu cele rezultate în urma simulării numerice, am validat modelul analitic.

**În capitolul 5** utilizând modelul analitic validat, am realizat cercetări privind influența parametrilor operațiunii de expandare asupra tensiunilor reziduale.

**Capitolul 6** prezintă principalele concluzii, o sinteză a contribuțiilor tezei, la care se adugă posibilele perspective de cercetare în domeniul fabricării țevilor destinate transportului prin conducte magistrale.

Referințe bibliografice, la care se fac trimiteri în lucrare, cuprind un număr de 88 de titluri.

După cele spuse, doresc să aduc cele mai sincere mulțumiri dlui **Prof.univ.dr.ing. Chirchor Mihael**, conducător științific, pentru îndrumarea de înalt profesionalism, pentru sprijinul permanent și încrederea acordată pe parcursul redactării tezei.

Mulțumiri deosebite se cuvin a fi aduse SC METROPTICS SRL pentru sprijinul acordat pe parcursul determinărilor experimentale din cadrul prezentei lucrări.

De asemenea, ţin să mulțumesc Departamentului de producție din cadrul SC ZIMTUB SA și SC GRAND DESIGN SRL pentru suportul oferit în vederea realizării lucrării.

Nu în ultimul rând, adresez cele mai calde mulțumiri familiei mele și prietenilor pentru ajutorul moral acordat pe toată perioada stagiului de doctorat.

Constanța 2018

Autorul

## CAPITOLUL 1

### **STADIUL ACTUAL AL INFLUENȚEI PROCESULUI DE FABRICATIE ASUPRA STĂRII DE TENSIUNE SI DEFORMAȚIE A ȚEVILOR SUDATE LONGITUDINAL**

#### 1.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Prezența tensiunilor reziduale în corpul unei țevi sudate longitudinal este cunoscută de mult timp, însă abia în ultimii ani s-au dobândit cunoștințele necesare cu privire la originea, distribuția și evaluarea lor.

Tensiunile reziduale sunt cele care rămân într-un corp solid elastic, după ce se îndepărtează toate sarcinile [37]. Notiunea de tensiune reziduală este într-o anumită masură, convențională. Ea are sens numai dacă tot corpul se consideră ca un mediu continuu. Dacă din corp separăm un element, tensiunile reziduale pot deveni exterioare, în raport cu elementul considerat [4].

Tensiunile reziduale au fost considerate până în prezent ca fiind nedorite, ele constituind adesea cauze de defecțiuni în exploatare sau de fisuri ori deformări nedorite ale pieselor, chiar în timpul procesului de prelucrare sau al tratamentului termic. Această poziție față de prezența tensiunilor reziduale a predominat mulți ani, cu toate că, încă de la sfârșitul secolului trecut, au fost fabricate tuburi freatice utilizându-se tensiunile reziduale. Având, la început, aplicații în industria militară, astăzi sistemele ce au la bază efectul pozitiv al tensiunilor reziduale sunt folosite pe scară largă, în numeroase cazuri ele reprezentând mijlocul principal pentru sporirea rezistenței structurilor.

O particularitate a tensiunilor reziduale este aceea că ele formează un sistem echilibrat, în lipsa solicitărilor exterioare[47].

Se deosebesc două feluri de tensiuni reziduale:

1. Tensiunile reziduale orientate se datorează forțelor exterioare care împiedică deplasarea liberă a elementelor structurii. Încărcările neuniforme produc deformării care, în unele structuri cu legături static nedeterminate, nu se pot desfășura, fiind împiedicate. Aceste tensiuni interesează în general un volum mare de material, și se pot atinge valori ridicate, ajungând până la limita de curgere a materialului și chiar depășind-o. Dacă se pleacă de la notiunea de energie de deformare, cunoscută și folosită în rezistența materialelor, se poate ajunge la anumite concluzii utile în legătura cu mărimea și distribuția tensiunilor. Având o stare de eforturi date, se poate exprima energia de deformare în funcție de componente tensiunilor și de coeficienți de elasticitate cunoscute ai materialului. În cazul tensiunilor reziduale orientate, care afectează un volum mare de material, - uneori chiar întreaga structură, - energia de deformare poate atinge valori foarte mari. Prin modificarea legăturilor, prin suprimarea uneia dintre ele, sau prin introducerea altora, printr-o anumită succesiune în executarea sudurilor, prin tăierea unei părți din material se poate influența mărimea și distribuția tensiunilor reziduale, eliberându-se o parte din energia de deformare și reducând astfel mărimea lor. Energia de deformare se reduce și prin apariția fisurilor în regiunile mai solicitate [67].
2. Tensiunile reziduale structurale sunt cauzate de transformările interne în urma răciri neuniforme a materialului, de schimbările de structură metalurgică sau de deformațiile plastice ce au avut loc la temperaturi ridicate. Astfel, în cazul

îmbinărilor sudate, aceste tensiuni apar atât în materialul de bază influențat termic, cât și în cusătură, iar valoarea lor scade cu distanța de la cusătură de sudură. Ele există chiar dacă materialul este omogen și nu depinde de sarcinile exterioare. Aceste tensiuni interesează un volum restrâns de material și unii autori le-au denumit microtensiuni [44]. Pentru tensiunile reziduale structurale, care afectează un volum mai mic de material, energia de deformatie înmagazinată în acest volum va fi mică. Ea poate fi eliberată prin modificarea structurii, de exemplu prin recoacere, dar ea poate să producă fisuri locale, care pot căpăta importanță, îndeosebi în cazul sarcinilor ciclice.

În cazul țevilor sudate longitudinal destinate construcției conductelor magistrale, tensiunile reziduale sunt prezente în corpul țevii începând cu procesul de fabricație și continuând cu toată durata de exploatare. Având în vedere efectele mediului înconjurător, solicitările ciclice, dar și factorul uman, riscul avarierii conductei crește semnificativ. Din cauza aceasta a apărut nevoia de a cunoaște valoarea tensiunilor reziduale ce rămân în corpul țevii după procesul de fabricație dar și identificarea zonelor ce reprezintă concentrații de tensiuni reziduale.

Dezvoltarea industriei petroliere mondiale a condus la impunerea condițiilor drastice producătorilor, și anume: diametrul țevii este din ce în ce mai mare, presiuni de lucru și distanțe sunt din ce în ce mai mari, dar și regulile sunt mai stricte privind protecția mediului. Aceste condiții au condus inevitabil la schimbarea țevilor tradiționale sudate elicoidal cu cele sudate longitudinal. În continuare sunt prezentate principalele dezavantaje ale țevilor sudate elicoidal, privind utilizarea în domeniul conductelor magistrale, după cum se vede mai jos [84]:

Dezavantajele:

- neuniformitatea caracteristicilor mecanice pe toată lungimea ruloului;
- grosimea limitată a ruloului pentru oțeluri de clasă înaltă de rezistență;
- lungimea mai mare a cordonului de sudură (mai mult de 1,5 ori);
- nivelul ridicat de tensiuni reziduale;
- lipsește operațiunea de expandare, ceea ce duce la necesitatea asigurării rezistenței mărite a materiei prime;
- valoarea redusă a rezistenței la impact a ruloului (Ex. Tabla X 65 - 350-450 J/cm<sup>2</sup> și Rulou X65 - 200-250 J/cm<sup>2</sup> ).

Țevile sudate longitudinal de diametrul mare sunt fabricate prin deformarea plastică la rece a tablei. Procesul de fabricație prin care trece tabla se numește UOE [85]. Abrevierea UOE își are originea în etapele prin care trece tabla până la momentul în care se obține forma unei țevi. Litera „U” provine din etapa în care tabla, după ce este îndoită cu ajutorul unei prese hidraulice prin compresiune, ajunge la forma literei U. Litera „O” simbolizează etapa în care tabla, prin deformare plastică la rece trece de la forma „U” la formă „O”, iar „E” reprezintă operațiunea de expandare [77]. Operațiunea de expandare este o etapă în care țeava este calibrată. Prințipiu de funcționare al expandării este următorul: în interiorul țevii rezultate după etapa „O” se introduce un expandor mecanic care printr-o acționare radială, expandează corpul țevii conform standardului American Petroleum Institute (API) [75]. În continuare, abrevierea UOE va fi completată cu litera J, care reprezintă prima etapă și anume îndoirea marginilor. Astfel UOE devine JUOE.

Țevile JUOE au o răspândire destul de mare atât în proiecte pe uscat cât și în cele maritime. În ultimii 15 ani, utilizarea acestui tip de țevi este în creștere, chiar în anumite zone geografice reprezintă un instrument geopolitic [19]. Cele mai cunoscute proiecte sunt următoarele:

- Trans Alaska Pipeline System;
- Sistemul Național de Transport Gaze Naturale TRANSGAZ;
- Nord Stream;

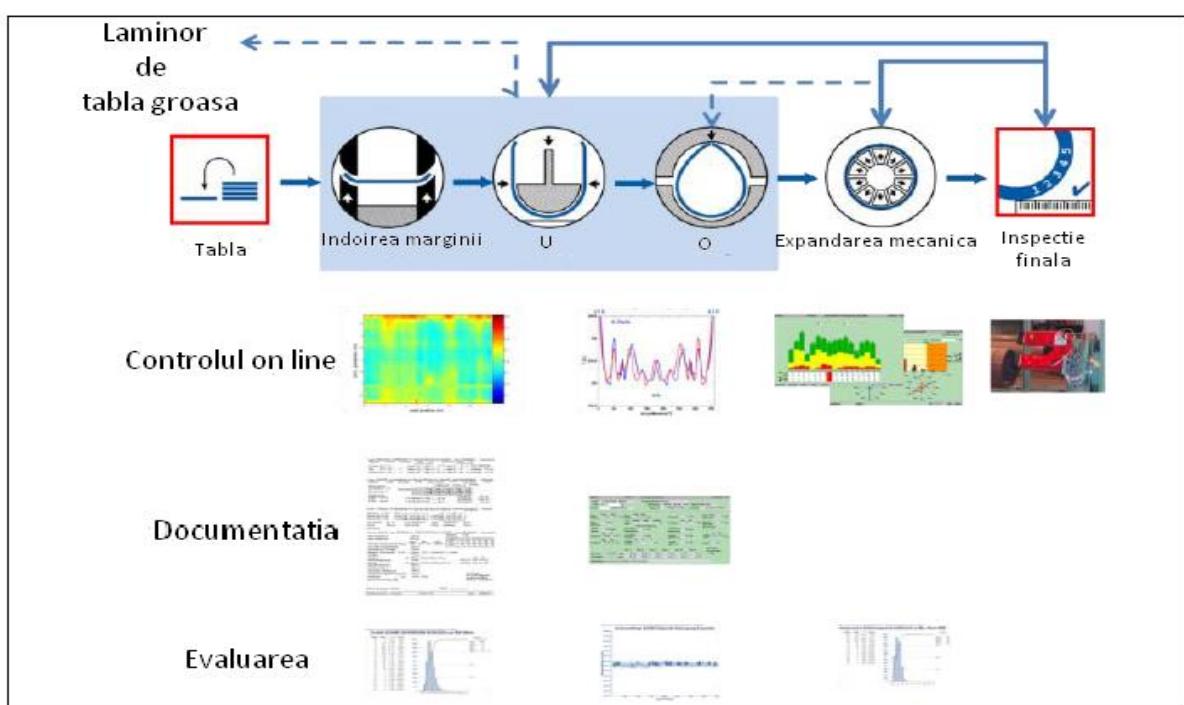
- South European Pipeline;
- United Kingdom Oil Pipelines.

Fabricele producătoare de țevi sudate longitudinal au o capacitate mare de fabricare a acestora, dar spre finalul proceselor de producție s-a constatat că fiecare etapa de fabricație prezintă unele particularități, ce influențează fiabilitatea conductelor magistrale construite din țevi sudate longitudinal.

## 1.2. METODELE DE FABRICAȚIE A ȚEVILOR SUDATE LONGITUDINAL

Mulți autori au studiat problematica tensiunilor reziduale prezente în corpul unei țevi sudate longitudinal. Conform cercetătorilor în domeniu, Liessem A., Oesterlein L., Kersting T., Kalwa C, apariția tensiunilor interioare în materialul supus prelucrării, se datorează procesului de fabricație. Tabla laminată din care se produce țeava de diametrul mare deja conține unele tensiuni reziduale, datorită deformației plastice neuniforme și regimului termic din timpul laminării și a tratamentului de revenire ulterior laminării [36]. S-a demonstrat experimental că tensiunile, ce apar în plăci laminate din lingouri cu secțiunea circulară sunt mai mari decât cele laminate din lingouri cu secțiunea dreptunghiulară, chiar dacă nu pare la prima vedere. Chiar dacă în oțeluri nu apar tensiuni atât de mari, totuși se observă distribuirea neuniformă a deformațiilor reziduale după laminare. În cazurile descrise mai sus, controlul stării de tensiune și deformație se efectuează cu metoda ultrasunetelor, de aceea nivelul tensiunilor reziduale are o valoare medie în funcție de grosimea tablei. Înlăturarea acestor tensiuni la sfârșitul procesului de fabricație este imposibilă, ea putând fi realizată doar în momentul fabricării tablei [54].

Procesul de fabricație a țevilor sudate longitudinal de diametrul mare prezintă unele particularități. La ora actuală, aceste țevi sunt fabricate prin două metode - JUOE și JCOE. Ambele procese de fabricație sunt foarte asemănătoare, diferența majoră constând în procesul de îndoire al tablei, așa cum este prezentat în figura 1.1. Metoda JUOE în principiu constă din două etape: - „U” și „O”. Metoda JCOE parcurge aceleași etape în şase pași (Figura 1.2), prin care corpul țevii prezintă un nivel redus de tensiuni reziduale, dar în același timp rentabilitatea producției scade foarte mult [36], [78], [80].



**Fig.1.1** Metoda de fabricație JUOE

**Fig.1.2** Metoda de fabricație JCOE

Efectuând o analiză comparativă a proceselor de fabricație putem trage următoarele concluzii :

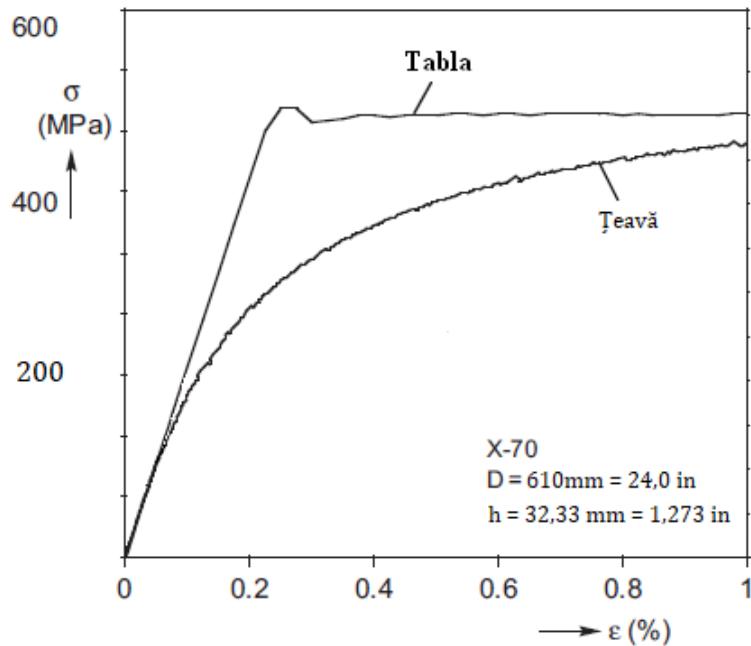
- eficiența și capacitatea de producție a metodei JUOE sunt mai potrivite pentru o producție de capacitate mare a unui singur tip de produs, iar metoda JCOE este mai puțin eficientă la capitolul acesta, dar este mai potrivită pentru un volum mai mic de producție și diversificat;
- prin metoda JUOE sunt fabricate țevile cu diametrul și grosimi mai mici decât prin metoda JCOE;
- din punct de vedere calitativ, metoda JCOE este superioară celei JUOE. Comparând cele două metode, în corpul țevii fabricate prin metoda JUOE se regăsește o cantitate mai mare de tensiuni reziduale în comparație cu cea care este fabricată prin metoda JCOE.

### 1.3. PROBLEMATICA Tensiunilor reziduale din corpul țevii sudate

#### LONGITUDINAL

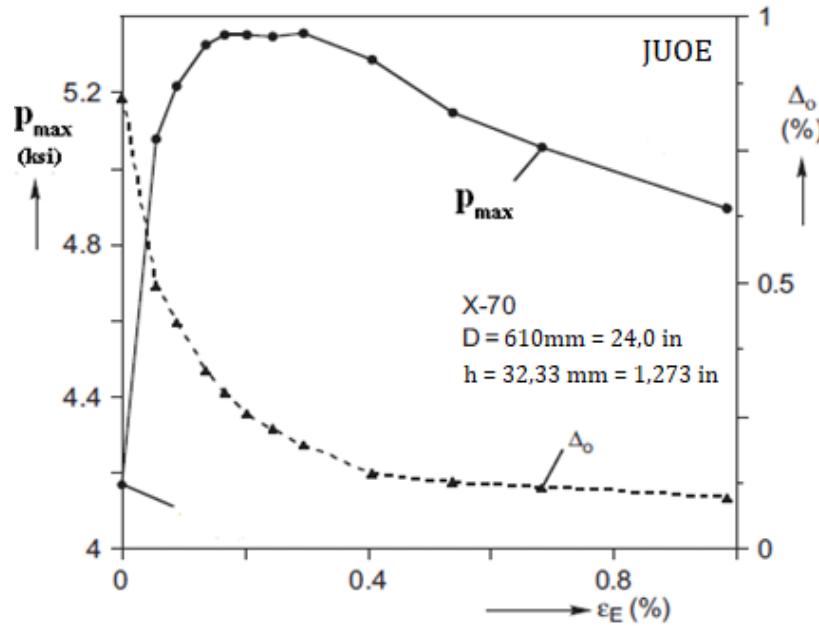
În acest subcapitol sunt prezentate structurate studiile efectuate de cercetători din domeniul Astfel, M.D. Herynk de la The University of Texas at Austin demonstrează că toate acele 4 etape JUOE, dar în special operațiunea de expandare, produc modificări în starea de tensiune pe direcție circumferențială. S-a efectuat un studiu pe o conductă maritimă Oman-India[62]. A fost efectuat testul de compresiune pe o țevă de 610 mm (24 inch) livrată de la

3 producători diferiți (oțel X70,  $h=32,33$  mm sau 1,273 inch). A fost calculată presiunea de rupere a țevii. Valoarea la care se produce ruperea țevii este de 348,9 MPa (5059 psi), iar pentru tablă din care a fost fabricată țeava valoarea este de 517,8 MPa (7508 psi). S-a trasat curba caracteristică pentru ambele probe, aşa cum este prezentat în figura 1.3. Concluzia acestui test a fost următoarea: presiunea de rupere determinată pentru proba prelevată din tablă nedeformată este cu 48% mai mare în comparație cu proba prelevată din corpul țevii [21]. Acest studiu demonstrează o influență directă al procesului de fabricație a țevilor asupra stării de tensiune și deformație dar și asupra condițiilor de operare.



**Fig.1.3** Reacția la compresiune a probelor prelevate din tablă și din corpul țevii

Cercetarea a continuat cu studiul influenței deformațiilor rezultate în urma operațiunii de expandare ( $\varepsilon_E$ ) asupra ovalității ( $\Delta_0$ ) și presiunii maxime de lucru ( $p_{max}$ ). După standardele API, creșterea diametrului exterior al țevilor expandate după sudarea longitudinală, este cuprinsă între 0,3 % și 1,5%. În momentul începerii operațiunii de expandare ( $\varepsilon_E = 0$ ), corpul țevii prezintă o ovalitate  $\Delta_0 = 0,848\%$  și  $p_{max} = 287,7$  MPa (4171 psi). S-a constatat că odată cu creșterea deformației  $\varepsilon_E$ , scade valoarea ovalității și a presiunii de lucru. Mai exact la valoarea deformației  $\varepsilon_E = 0,3\%$  presiunea maximă de lucru are valoarea  $p_{max} = 369$  MPa (5356 psi) corespunzător ovalității  $\Delta_0 = 0,848\%$ , iar cu deformația  $\varepsilon_E = 0,98\%$ , ovalitatea are valoarea  $\Delta_0 = 0,096\%$  iar valoarea presiunii de lucru scade brusc la  $p_{max} = 337,6$  MPa (4895 psi). După efectuarea acestor încercări și trasarea curbei  $p_{max} - \Delta_0$ , s-a demonstrat că la o valoare deformației  $\varepsilon_E < 0,3\%$ , presiunea maximă de lucru are valoare optimă [49], [29]. Rezultatele cercetării sunt prezentate în figura 1.4.



**Fig.1.4** Efectele expandării asupra presiunii de lucru  $p_{max}$  și ovalității  $\Delta_0$

Recent, Andreea Assannelli a efectuat cercetări privind influența expandării asupra stării de tensiune prin efectuarea unor teste pe inele provenind dintr-o țeavă de 324 mm (12,75") cu grosimea peretelui  $h = 12,7$  mm și dintr-o țeavă de 450 mm (18") cu grosimea peretelui  $h = 27,5$  mm. După ce a fost simulat procesul de fabricație, a fost determinată deformația plastică, pe baza deplasărilor orizontale a nodurilor, ce se regăsesc în punctul de maximă compresiune pe parcursul procesului de obținere a formei „O”, a semifabricatului utilizând formula de mai jos [2]:

$$\varepsilon = \frac{(D_a - D_b) \cdot h \cdot E}{(D_b - h)^2 (1 - \mu^2)} \quad (1.1)$$

unde:

$D_a$  = diametrul țevii după expandare, [mm];

$D_b$  = diametrul țevii înaintea expandării, [mm];

$h$  = grosimea tablei, [mm];

$E$  = modulul de elasticitate longitudinal, [MPa];

$\mu$  = coeficientul lui Poisson;

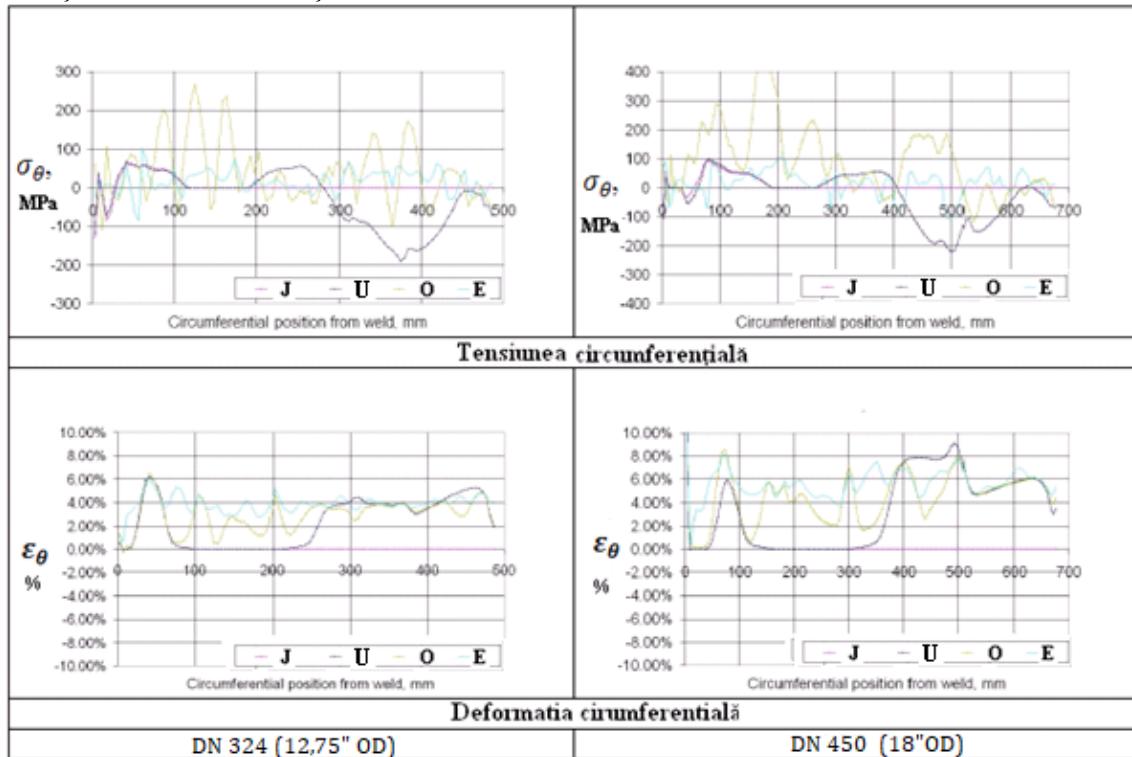
Rezultatele studiului sunt prezentate în tabelul 1.1.

**Tab. 1.1 Tensiunile reziduale  $\sigma_{rez}$  rezultate după simулare**

Deformația plastică	$\varnothing 324$ $D/h = 25.5$ $\sigma_{rez}$ [MPa]	$\varnothing 450$ $D/h = 18$ $\sigma_{rez}$ [MPa]
0,2%	9,20	7,7
0,3%	21,7	-
0,4%	33,0	-
0,5 %	44,3	59,07
1,0%	96,4	140,8

Acstea rezultate demonstrează că tensiunile reziduale cresc cu deformarea plastică și scad când raportul  $D/h$  crește.

Cercetarea a continuat cu studiul stării de tensiune pentru ambele semifabricate și mai exact cu distribuția tensiunilor și deformărilor circumferențiale pe parcursul întregului proces de fabricație. În continuare, în figura 1.5 este prezentată evoluția tensiunilor și deformărilor în funcție de dimensiunile țevilor.



**Fig. 1.5** Evoluția tensiunii și deformației circumferențiale pe parcursul întregului proces de fabricație

Urmărind evoluția stării de tensiune din figura de mai sus, se observă că valorile deformărilor circumferențiale  $\varepsilon_\theta$  pentru țeava cu DN 450 mm (18" OD) cu grosimea peretelui de  $h = 25,4$  mm (1") sunt mai mari față de țeava cu DN 324mm (12.75" OD) cu grosimea peretelui de  $h = 12,7$  mm (0.5"). La fel se întâmplă și cu tensiunile circumferențiale  $\sigma_\theta$ . Tensiunile la fel ca și deformărilile prezintă o distribuție circumferențială (0 – reprezintă cordonul de sudură) [3], [64].

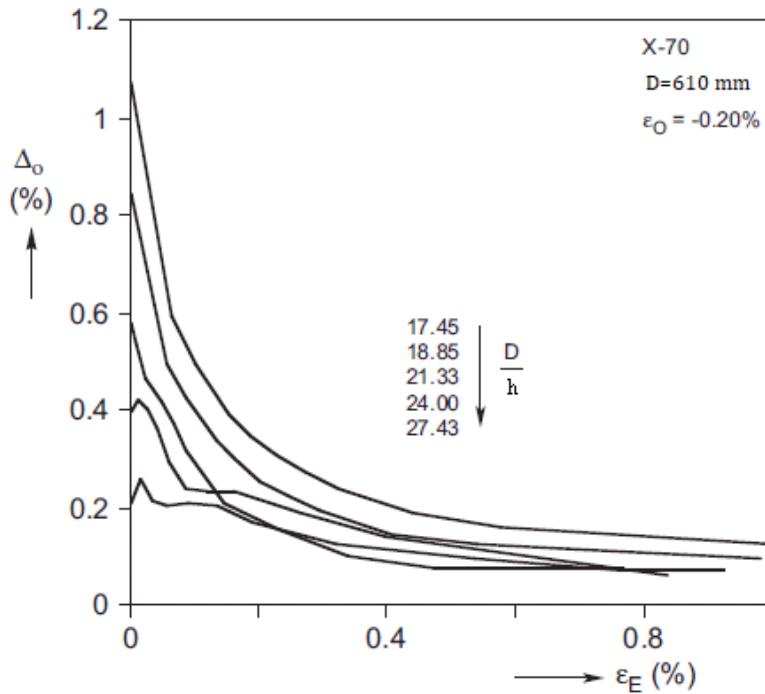
În continuare S. Kyriakides de la The University of Texas prin experimentul efectuat a scos în evidență efectul expandării asupra presiunii maxime de lucru în funcție de raportul  $D/h$ , [21], [30].

Semifabricatul utilizat în acest test experimental este o țeavă cu diametrul  $D = 610$  mm (24 inch), dar grosimea variază astfel încât se obțin următoarele rapoarte:

**Tab. 1.2 Variația raportului  $D/h$ , în funcție de grosime**

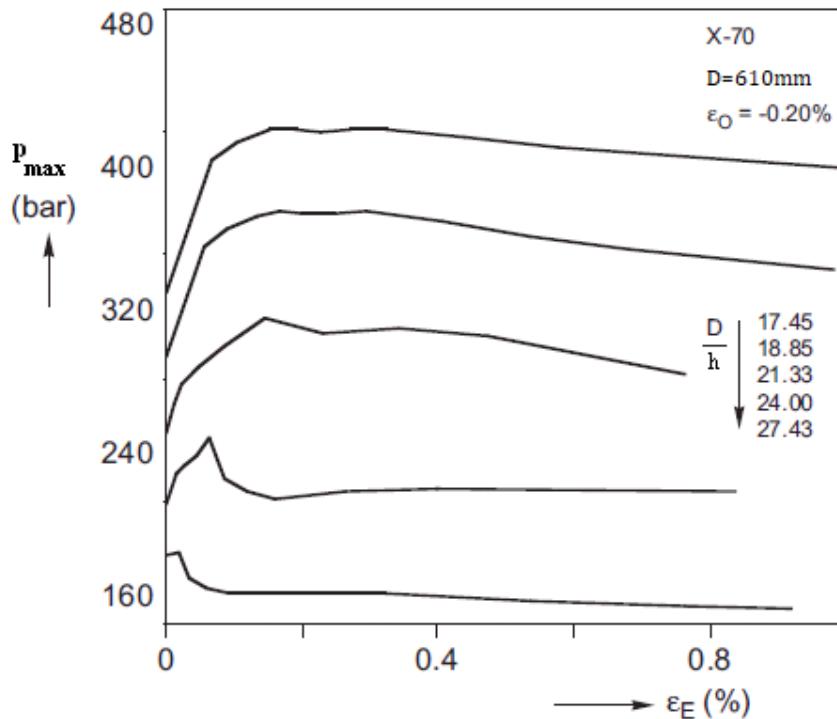
$D/h$	17,45	18,85	21,33	24,00	27,44
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Rezultatele acestui studiu experimental pentru toate aceste 5 valori sunt prezentate în figura 1.6 și figura 1.7.



**Fig. 1.6** Efectul expandării asupra ovalității țevii

Având la bază, rezultatele prezentate în figura de mai sus au rezultat următoarele concluzii: expandarea are un efect pozitiv asupra ovalității pentru toate rapoartele  $D/h$ , în același timp, reducerea ovalității este mai pronunțată la valori mai mici ale raportului  $D/h$ . În toate cazurile, reducerea majoră a ovalității se realizează cu deformația  $\epsilon_E = 0,35\%$ . După cum se vede în figura 1.7, valoarea presiunii maxime de lucru este invers proporțională cu valoarea deformației  $\epsilon_E$ . Pentru valoarea deformației  $\epsilon_E = 0,3\%$ , presiunea maximă de lucru  $p_{max}$  atinge valori maxime, dar cu cât valoarea deformației crește, cu atât presiunea  $p_{max}$  scade. Pentru raportul  $D/h = 24$  valoarea presiunii maxime  $p_{max}$  atinge valori maxime la deformația  $\epsilon_E = 0,064\%$ . Valorile mari ale deformațiilor ce apar în timpul operațiunii de expandare nu conduc la valoari mai mari presiunii maxime de lucru. Pentru raportul  $D/h = 27,43$ , expandarea reduce valoarea presiunii  $p_{max}$  la nivelul cel mai de jos dintre celelalte rapoarte [30]. În cazul acesta, expandarea doar reduce ovalitatea. Având în vedere că expandarea reduce ovalitatea, simultan reduce rezistența la compresiune, ceea ce duce la scăderea valorii presiunii maxime de lucru.



**Fig.1.7** Efectul expandării asupra presiunii maxime de lucru

În completarea celor demonstate, s-au observat că, cu cât raportul  $D/h$  crește, cu atât modul de distrugere în planul orizontal al simetriei țevii înlocuiește pe cel vertical. Pentru trei țevi cu  $D/h \leq 21,33$ , în toate cazurile distrugerea se produce în modul vertical. Pentru  $D/h = 24,00$  distrugerea se produce în modul orizontal. La fel este și pentru  $D/h = 27,43$ .

Un aport la studiul analitic este adus de către Šinkin V.N. de la National University of Science and Technology MISiS Moskova. S-a studiat influența tensiunilor reziduale asupra rezistenței oțelului din timpul procesului de expandare [58].

Prima etapa presupune studiul tensiunilor reziduale după operațiuni ce implică solicitarea de încovoiere.

Fie  $b$  și  $h$  - lățimea și grosimea plăcii,  $r_p$  - raza poansonului cu care s-a efectuat încovoierea,  $\rho = r_p + h/2$  - raza fibrei medii,  $\sigma_c$  și  $E$  - limita de curgere și modulul de elasticitate longitudinal.

Momentul de încovoiere este egal cu expresia prezentată mai jos[59]:

$$M_x = \frac{1}{4}bh^2\sigma_c - \frac{1}{3}b\rho^2\frac{\sigma_c^3}{E^2} + \frac{bE}{12}\left(\frac{h}{2\rho} - \frac{\sigma_c}{E}\right)\left(h^2 - h\rho\frac{\sigma_c}{E} - 2\rho^2\frac{\sigma_c^2}{E^2}\right) \quad (1.2)$$

Raza remanentă -  $r_{rem}$  a semifabricatului după înlăturarea solicitării se determină cu ecuația de mai jos [58]:

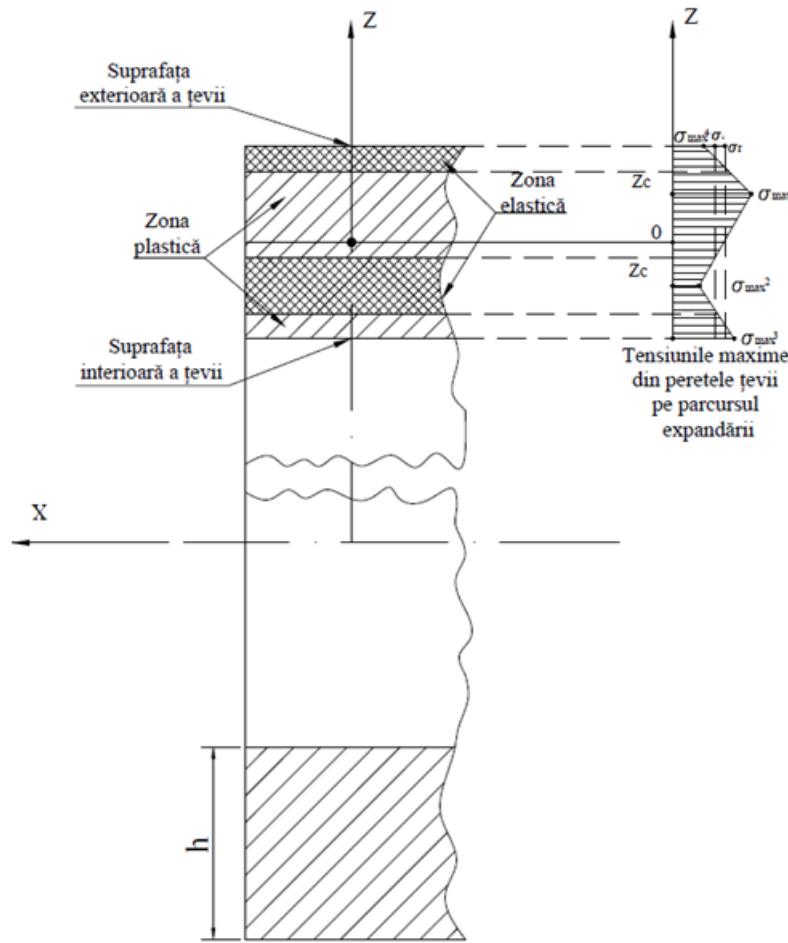
$$\frac{\mu_1}{\rho_{rem}} = \frac{1}{\rho} - \frac{12M_x}{Eh^3b} \quad (1.3)$$

unde  $\mu_1$  - coeficient ce are în vedere viteza de deformare a oțelului;

Tensiunile maxime reziduale sunt exprimate sub următoarele forme [59]:

$$\sigma_{rez}^1 = \sigma_c + E(\varepsilon_{max} - \varepsilon_c) - \frac{6M_x}{bh^2} < 0, \quad (1.4)$$

$$\sigma_{rez}^2 = \sigma_c - \frac{12M_x\sigma_c\rho}{bh^3E} > 0 \quad (1.5)$$



**Fig. 1.8** Tensiunile maxime din peretele țevii pe parcursul expandării

Secțiunea transversală a plăcii se împarte în două zone - plastică și elastică (Fig. 1.8). Mărimea ce exprimă granița dintre cele două zone este -  $z_c = \varepsilon_c \rho = \frac{\sigma_c \rho}{E}$ . Rezultatele calculelor demonstrează că tensiunile reziduale din corpul țevii pot atinge valori de 79 – 81% din limita de curgere și de 1.63 – 1.66 ori mai mari decât tensiunile reziduale de pe suprafață interioară și exterioară a țevii.

După solicitările de încovoiere, țeavă nu are ovalitate acceptată și diametrul țevii este cu 0,3 – 1,5% mai mic decât cea acceptată. Obținerea diametrului necesar și a ovalitații minime se realizează prin operațiunea de expandare.

Fie  $r_{1e}$  - raza fibrei medii înaintea expandării,  $r_{2e}$  - raza interioară maximă din timpul procesului de expandare și  $r_{3e}$  - raza necesară după expandare. Între acestea există următoare relație  $r_{1e} < r_{2e} < r_{3e}$ .

Raza interioară maximă din timpul procesului de expandare se determină din ecuația de mai jos [58]:

$$r_{2e} = \left( \left( \frac{r_{3e} + \sqrt{r_{3e}^2 - 2r_{1e}h}}{2\mu_2 r_{1e}} - 1 \right) \middle/ \frac{\sigma_c}{E} + 1 \right) r_{1e} - \frac{h}{2 \left( \left( \frac{r_{3e} + \sqrt{r_{3e}^2 - 2r_{1e}h}}{2\mu_2 r_{1e}} - 1 \right) \middle/ \frac{\sigma_c}{E} + 1 \right)} \quad (1.6)$$

unde  $\mu_2$  – coeficientul ce caracterizează viteza de deformare a oțelului pe parcursul operațiunii de expandare;

Tensiunile circumferențiale pe suprafața fibrei medii numai din procesul de expandare sunt exprimate prin relația de mai jos [59]:

$$\sigma_{max}^{exp} = \sigma_c + E \left( \frac{r_{2e} + \sqrt{r_{2e}^2 + 2r_{1e}h} - 2r_{1e}}{2r_{1e}} - \frac{\sigma_c}{E} \right) > 0 \quad (1.7)$$

- După efectuarea calculelor analitice s-a ajuns la următoarele valori și concluzii:
1. Tensiunile circumferențiale maxime din corpul țevii după expandare, pentru o țeavă cu diametrul  $D = 1420\text{mm}$  ( $r_{3e} = 710\text{mm}$ ) cu limita de curgere  $\sigma_c = 500 \text{ MPa}$ , depășesc limita de curgere. Din cauza aceasta în peretele țevii expandate se pot crea tensiunile însumate (tensiunile reziduale după solicitări de încovoiere + tensiunile reziduale ce rămân după expandare) ce depășesc rezistența la rupere,  $\sigma_r$ .
  2. Pentru țeavă analizată mai sus cu grosimea peretelui  $h = 21\text{mm}$  și cu rezistența la rupere  $\sigma_r = 600 \text{ MPa}$ , valoarea maximă a tensiunilor reziduale în corpul țevii este  $1,524 \sigma_r$ , dar pe suprafețele interioare și exterioare tensiunile circumferențiale sunt egale cu  $1,254 \sigma_r$  respectiv  $0,437 \sigma_r$ .

#### 1.4. CONCLUZII

În acest capitol ne-am propus să efectuăm un studiu al problematicii privind fabricarea și starea de tensiune și deformație a țevilor de diametrul mare sudate longitudinal. În acest scop s-a pus accent pe etapele de fabricație și comportamentul corpului țevii după fiecare etapă dar mai ales după ultima, mai exact după etapa de expandare.

Acest capitol a început cu o analiză a metodelor de fabricație. În prezent cele mai răspândite sunt JUOE și JCOE. Cele două metode sunt foarte asemănătoare ca principiu de fabricație, dar principală diferență o reprezintă numărul etapelor prin care trece semifabricatul până la produsul finit. Metoda JCOE din punct de vedere al preciziei dimensionale și a valorilor tensiunilor reziduale este superioră celei JUOE, dar privind din perspectiva economică metoda JCOE are dezavantajul productivității scăzute. Acest aspect poate constitui obiectul unui viitor proiect de cercetare.

În continuare, am trecut în revistă studiile efectuate de alți cercetători. În urma acestui demers s-a ajuns la următoarea concluzie: expandarea reduce ovalitatea țevii, dar în același timp reduce și proprietățile mecanice de rezistență la compresiune. Valorile mari ale presiunii de expandare conduc la scăderea presiunii maxime de lucru cu toate că ameliorează considerabil îmbunătățirea ovalității. În practică curentă expandarea țevii peste valoarea optimă reduce proprietățile mecanice ale țevii. S-a demonstrat că presiunea maximă de lucru are valori maxime pentru valoarea expandării  $\varepsilon_E = 0,35\%$ . Această se întâmplă în ciuda faptului că țevile neexpandate au o ovalitate puțin mai mare față de cele expandate. A apărut nevoie alegării unei valori optime de expandare care să asigure atât o ovalitate -  $\Delta_o$

acceptabilă cât și proprietăți mecanice pentru a crește valoarea presiunii maxime de lucru -  $p_{max}$ .

Am trecut în revistă studiile efectuate în timpul expandării vizind corelația dintre presiunea maximă de lucru și raportul  $D/h$ . În toate cazurile presiunea maximă de lucru  $p_{max}$  își atinge maximul pentru  $\varepsilon_E = 0,3\%$ . Practica actuală de a expanda până la valoarea de 1% este prea mare și defavorabilă pentru proprietățile mecanice. Cu cât  $D/h$  crește, valoarea expandării ce maximizează presiunea maximă de lucru  $p_{max}$  descrește. Presiunea maximă de lucru depinde în general de expandare  $\varepsilon_E$  și scade când expandarea crește.

Urmărind evoluția stării de tensiune, aceste rezultate demonstrează că tensiunile reziduale cresc cu creșterea expandării și scad când raportul  $D/h$  crește. În urma efectuării studiului analitic prezentat în capitolul 1, s-a ajuns la concluzia că în peretele țevilor expandate pot apărea tensiunile circumferențiale însumate ce pot depăși rezistența la rupere a materialului. În cazul acesta tensiunile tangențiale maxime din peretele țevii și de pe suprafața interioară vor fi mai mari de jumătatea limitei de curgere. Având ca baza a treia teorie de rezistență, în pereții țevii și pe suprafețele interioare pot apărea defecte (inexistente pe suprafața exterioară) - microfisuri, ce pot conduce la reducerea capacitatei de rezistență (oboseală) a oțelului la solicitări ciclice.

Plecând de la metodele de fabricație, s-a ajuns la concluzia că valoarea expandării influențează direct starea de tensiune și deformație a țevii.

## CAPITOLUL 2.

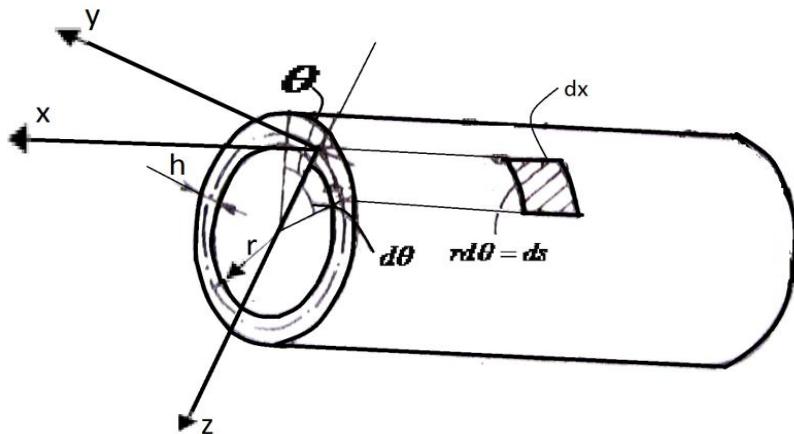
### STUDIUL ANALITIC AL TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN TEVILE SUDATE LONGITUDINAL DESTINATE CONSTRUCȚIEI CONDUCTELOR MAGISTRALE

#### 2.1. CONSIDERAȚII GENERALE

O influență majoră asupra stabilității, rezistenței și durabilității conductelor magistrale o reprezintă tensiunile, ce sunt condiționate de:

- tehnologia de fabricație;
- montaj;
- exploatare.

Studiul analitic al tensiunilor necesită aplicarea modelelor fizice. În cazul de față, ca model fizic se consideră învelișul cilindric cu pereți subțiri. Învelișul cilindric constituie un caz particular de plăci curbe subțiri, caracterizate din punctul de vedere geometric, prin curba directoare de rază  $r$ , lungimea generatoarei  $l$  și grosimea plăcii  $h$  (Fig. 2.1) [51]. Noțiunea de placă subțire implică raportul  $h/r \ll 1$ , ceea ce permite neglijarea deformațiilor din forțele tăietoare. Se va admite de asemenea  $\sigma_z = 0, \varepsilon_z = 0$ .



**Fig. 2.1** Învelișul cilindric cu pereți subțiri

În cazul teoriei de momente, tensiunile se distribuie neuniform pe grosimea învelișului și torsorul eforturilor are atât componente forțe, cât și componente moment, raportate la o unitate de lungime de placă și se exprimă în  $N/mm^2$  (Fig. 2.2). Pentru învelișuri subțiri raportate la unitatea de lungime de placă, există următoarele relații de echivalentă [48]:

$$N_x = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x dz; N_{x\theta} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{x\theta} dz$$

$$(2.1)$$

$$T_z = - \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{zx} dz; M_\theta = - \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_x z dz; M_{\theta x} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{\theta x} z dz;$$

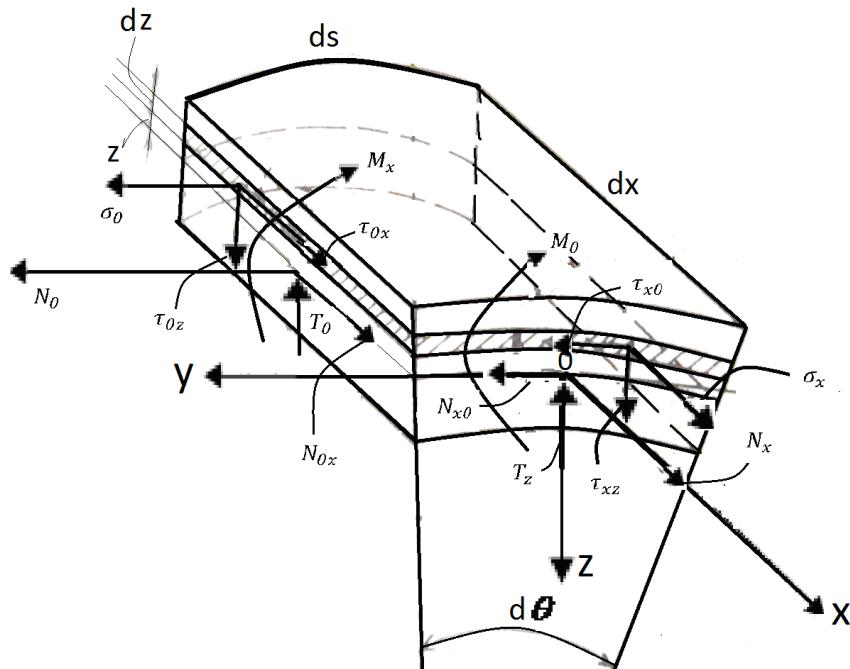
În mod similar, în centrul secțiunii apar următoarele solicitări:

$$N_\theta = \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_\theta dz; N_{\theta x} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{\theta x} dz; T_\theta = - \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{\theta z} dz;$$

(2.2)

$$M_x = - \int_{-h/2}^{+h/2} \sigma_\theta z dz; M_{\theta x} = \int_{-h/2}^{+h/2} \tau_{\theta x} z dz;$$

Trebuie menționat că în urma solicitărilor din procesele tehnologice, periodic țeava este încărcată simetric. Datorită simetriei față de axa țevii, sunt nule eforturile  $N_{x\theta}, N_{\theta x}, T_\theta, M_{x\theta}, M_{\theta x}$ .



**Fig. 2.2** Distribuția tensiunilor pe o unitate de lungime  $dx$

Starea de tensiune a oțelurilor, ce se schimbă în timpul proceselor de laminare la rece și la cald, de fabricare a țevilor, de asamblarea în conductă și exploatarea îndelungată, este un factor - cheie în reducerea sau majorarea riscului apariției fisurilor în anumite zone, ce va influența operabilitatea și rezistența conductelor magistrale [5],[70].

După cele prezentate în capitolul anterior, fabricarea țevilor sudate longitudinal JUOE se realizează în câteva etape principale, cum ar fi [17]:

- îndoirea capetelor "J". Trebuie menționat că în această etapă este prezentat cazul încovoierei unei plăci dreptunghiulare subțiri. În această operațiune, capetele longitudinale sunt îndoite cu o anumită rază de curbură la ambele capete;
- obținerea formei "U". Această operațiune este una de tranzit, deoarece tabla este îndoită cu raza egală cu raza țevii respective;
- obținerea formei „O” cu ajutorul unei prese hidraulice și a unor scule specializate. În această etapă pentru obținerea dimensiunilor, țeava este supusă la o deformare plastică în presă cu micșorarea perimetrului cu 0,4 – 0,7 %. Această operațiune are un impact asupra fiabilității țevii;
- sudarea țevilor se execută în 3 trecheri. Orientarea longitudinală a cordonului de sudură - prezintă un dezavantaj al țevilor sudate longitudinal deoarece presiunea interioară a fluidului transportat creează în direcția circumferențială (perpendicular cordonului) o intensitate a tensiunilor dublă față de direcția axială [44]. Această rezultă din

rezolvarea analitică a problemei imersiunii unei țevi închise ce se află sub o presiune interioară rezolvată de către Gabriel Lame în secolul 19 [82]. Aceasta este una din puținele probleme ale elasticității, ce permit rezolvarea analitică, care afirmă că starea de tensiune a unei țevi cu pereti subțiri se poate considera plană, deoarece tensiunile radiale ce apar din cauza presiunii interioare, se compensează cu cele axiale și circumferențiale. În prezent rezolvarea acestei probleme este prezentată în mai multe lucrări de teorie elasticității;

- expandarea țevii. După sudare, țeava ajunge la expandor hidraulic, unde datorită măririi perimetrlui țevii cu 0,3-1,5% se ajunge la calibrarea după diametru [75], [81].

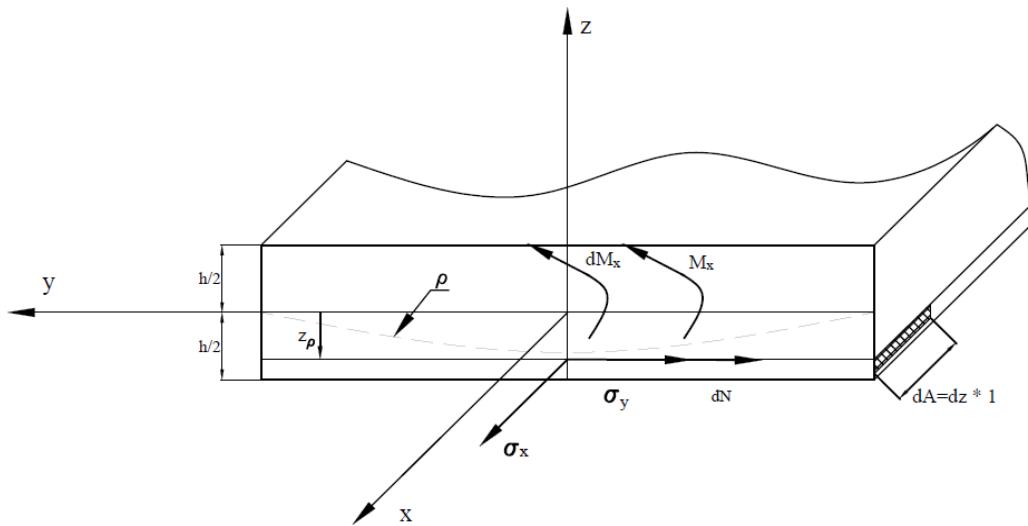
Ca rezultat al acestor operațiuni tehnologice, se produce modificarea formei și dimensiunilor semifabricatului. Aceasta înseamnă că s-a produs deformația plastică iar rezultatul acesteia sunt tensiunile reziduale ce se regăsesc pe toată circumferința țevii.

În continuare se prezintă un studiu analitic al tensiunilor reziduale ce apar în urma deformației plastice.

## 2.2. TENSIUNI REZIDUALE DINTR – O PLACĂ DREPTUNGHIULARĂ DEFORMATĂ PLASTIC

Se propune o abordare analitică a tensiunilor reziduale ce apar într-o placă supusă la încovoiere, ceea ce reprezintă de fapt operațiunea de îndoire a marginilor. Determinarea analitică a tensiunilor reziduale, ce apar în urma revenirii elastice poate fi determinată cu ajutorul teoremei de revenire a cercetătorului Heinrich Hencky (1924) [22]. Potrivit acesteia tensiunile reziduale sunt egale cu diferența dintre tensiunile reale din corpul elasto-plastic cu cele care ar fi create în cazul elasticității ideale a materialului. Aceasta teoremă de revenire a avut o mai mare dezvoltare după ce a fost aplicată pentru stațarea tablelor.

În continuare în figura 2.3 este prezentată o placă dreptunghiulară supusă la încovoiere de momentul încovoiotor  $M_x$ .



**Fig.2.3** Placa supusă la încovoiere

Dacă mărimea momentului încovoiotor este în aşa fel încât tensiunea normală la încovoiere rezultată este  $\sigma_y \leq \sigma_c$ , atunci tabla se regăsește în domeniul deformației elastice [9], [33]:

$$\sigma_y^{max} = \frac{6M_x}{bh^2} \leq \sigma_c \quad (2.3)$$

Cu condiția

$$M_x > \frac{1}{6} \sigma_c b h^2 \quad (2.4)$$

în zona fibrelor exterioare apare deformația plastică.

Pentru valoarea respectivă a momentului  $M_x$  zona deformației plastice va fi de la  $\frac{1}{2}h_1$  până la  $\frac{1}{2}h$  (Fig.2.4). În zona această tensiunea normală la încovoiere este egală cu tensiunea la curgere ( $\sigma_y = \sigma_c$ ). Pentru  $z < \frac{1}{2}h_1$  valoarea tensiunilor se modifică liniar[9]:

$$\sigma_y = \sigma_c \frac{2z}{h_1} \quad (2.5)$$

Din condiția de echilibru

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma_y z b dz = \frac{1}{4} \sigma_c b (h^2 - h_1^2) + \frac{1}{6} \sigma_c b h_1^2 = M_x \quad (2.6)$$

De unde

$$h_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{\sigma_c b}} \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_c b h^2 - M_x}$$

Tensiunea normală la încovoiere  $\sigma_y$  este definită de următoare condiție:

$$\sigma_y = \begin{cases} \sigma_c \frac{2z}{h_1}; & |z| \leq \frac{1}{2}h_1; \\ \sigma_c; & \frac{1}{2}h_1 < |z| < \frac{1}{2}h; \end{cases} \quad (2.7)$$

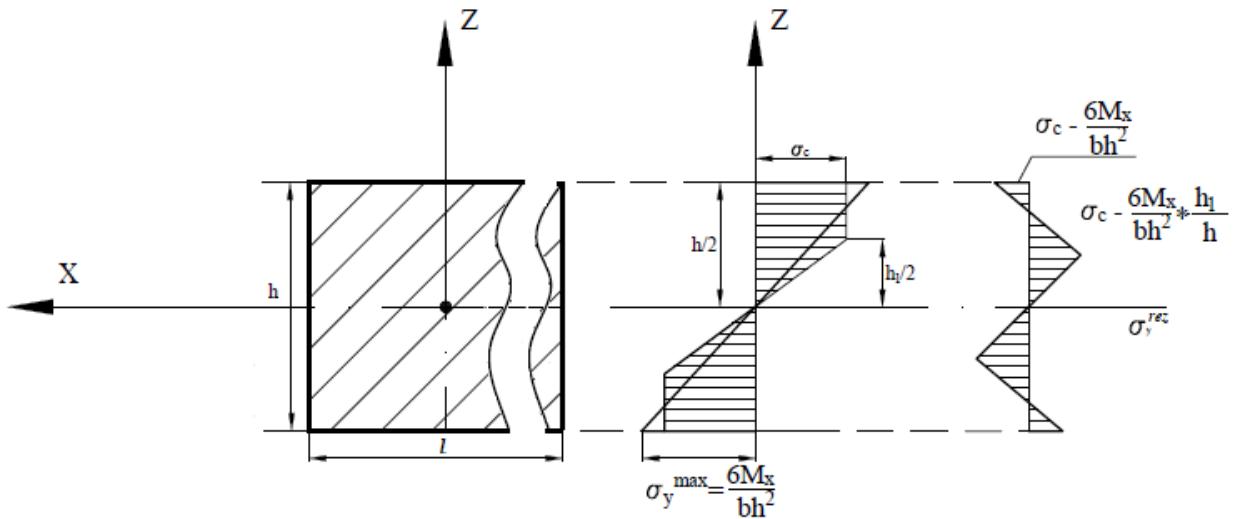
Dacă materialul tablei ar fi fost elastic, atunci distribuția tensiunilor ar fi fost liniară:

$$\sigma_y^* = \frac{12 M_x}{bh^3} z \quad (2.8)$$

Aici tensiunea maximă:

$$\sigma_y^{max} = \frac{6M_x}{bh^2} \quad (2.9)$$

Distribuția tensiunilor reziduale este demonstrată în figura 2.4.



**Fig. 2.4** Tensiunile reziduale rezultate după deformație plastică

Având în vedere teorema de revenire, tensiunile reziduale în tablă (după înlăturarea momentului  $M_x$ ) vor fi egale cu [24]:

$$\sigma_y^{rez} = \sigma_y - \sigma_y^*$$

De exemplu:

$$\text{Pentru } z = \frac{1}{2}h$$

$$\sigma_y^{rez} = \sigma_c - \frac{6M_x}{bh^2} \quad (2.10)$$

$$\text{Pentru } z = \frac{1}{2}h_1$$

$$\sigma_y^{rez} = \sigma_c - \frac{6M_x}{bh^2} \cdot \frac{h_1}{h} \quad (2.11)$$

Trebuie precizat faptul că în urma proceselor de îndoire tabla ajunge la o formă circulară și tensiuni reziduale  $\sigma_y^{rez}$  devin tensiuni reziduale circumferențiale  $\sigma_\theta^{rez}$ .

### 2.3. TENSIUNI REZIDUALE DIN CORPUL ȚEVII CU DEFORMAȚII INITIALE

Pasul următor îl reprezintă etapa în care semifabricatul în urma proceselor de îndoire, ajunge la o formă circulară și studiul continuă cu analiza tensiunilor și deformațiilor într-un înveliș cilindric (Fig. 2.5). Determinarea tensiunilor reziduale este influențată de deformațiile initiale ce au rămas în urma proceselor de deformare anterioare. Această deformație este considerată axială și constantă pe toată lungimea țevii. Lungimea țevii se consideră atât de mare încât condițiile la extermități nu influențează starea de tensiune în zona fibrei medii. În zona deformațiilor elastice există următoarele relații [9], [65]:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_\theta + \sigma_x)] + \varepsilon_{0z} \quad (2.12)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E} [\sigma_\theta - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] + \varepsilon_{0\theta} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \mu(\sigma_z + \sigma_x)] + \varepsilon_{0x} \quad (2.14)$$

unde  $\sigma_z$ ,  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_x$ , reprezintă tensiunile reziduale radiale, circumferențiale și axiale;

$\varepsilon_{0z}$ ,  $\varepsilon_{0\theta}$ ,  $\varepsilon_{0x}$  reprezintă deformațiile inițiale reziduale radiale, circumferențiale și axiale;

$\mu$  = reprezintă coeficientul lui Poisson.

Distribuția simetrică a deformațiilor inițiale duce la o distribuție simetrică și a tensiunilor reziduale în corpul țevii.

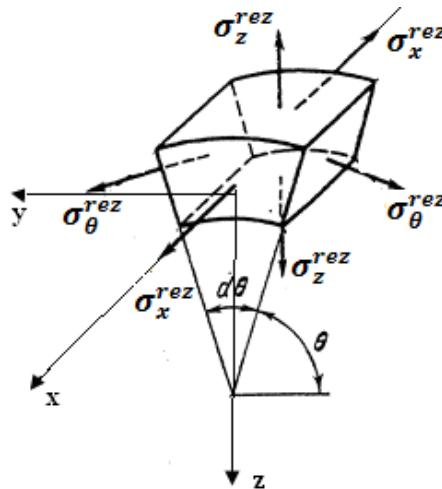
Dacă  $u(z)$  este deplasarea radială a punctului cilindrului, atunci :

$$\varepsilon_z(z) = \frac{du}{dz} \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{u}{z} \quad (2.16)$$

Având în vedere că mărimele  $\varepsilon_{0z}$ ,  $\varepsilon_{0\theta}$ , și  $\varepsilon_{0x}$  sunt constante pe toată lungimea țevii, presupunând că deformația axială este constantă în toate punctele țevii, atunci sunt satisfăcute toate ecuațiile teoriei elasticității:

$$\varepsilon_x(z) = e; \quad (2.17)$$



**Fig. 2.5** Distribuția tensiunilor reziduale într-un înveliș cilindric

Din ecuațiile deformațiilor (2.12) – (2.14) și a deplasărilor (2.15) - (2.17) se obțin ecuațiile tensiunilor reziduale [56], [65]:

$$\begin{aligned} \sigma_z^{rez} &= \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \frac{du}{dz} + \frac{u}{z} + e \right) + \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{du}{dz} - \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_{0z} - \\ &\quad - \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\varepsilon_{0\theta} + \varepsilon_{0x}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\sigma_\theta^{rez} = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \frac{du}{dz} + \frac{u}{z} + e \right) + \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{u}{z} \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_{0\theta} -$$

$$-\frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} (\varepsilon_{0z} + \varepsilon_{0x}) \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{rez} = & \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \left( \frac{du}{dz} + \frac{u}{z} + e \right) + \frac{E}{1+\mu} e - - \frac{(1-\mu)E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \varepsilon_{0x} - \\ & - \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Întroducând valorile  $\sigma_z$  și  $\sigma_\theta$  în ecuația de echilibru,

$$\frac{d(z\sigma_z)}{dz} - \sigma_\theta = 0 \quad (2.21)$$

se obține:

$$\frac{d^2u}{dz^2} + \frac{1}{z} \cdot \frac{du}{dz} - \frac{u}{z^2} = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1}{z} (\varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta}) + \frac{d}{dz} \left[ \varepsilon_{0z} + \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_{0\theta} + \varepsilon_{0x}) \right] \quad (2.22)$$

Integrând relația (2.22) pe intervalul  $r - z$  (unde  $r$  – raza interioară a țevii) obținem:

$$\frac{d}{dz} (zu) = \frac{1-2\mu}{1-\mu} z\varphi(z) + zf(z) + c_1 z \quad (2.23)$$

$$\varphi(z) = \int_r^z \frac{1}{z_1} (\varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta}) dz_1 \quad (2.24)$$

$$f(z) = \varepsilon_{0z} + \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_{0\theta} + \varepsilon_{0x}) \quad (2.25)$$

Integrând încă odată în aceleași limite ( $r - z$ ) obținem:

$$u = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1}{z} \int_r^z z_1 \varphi(z_1) dz_1 + \frac{1}{z} \int_r^z z_1 f(z_1) dz_1 + c_1 \frac{z}{2} + \frac{c_2}{z} \quad (2.26)$$

Unde  $c_1$  și  $c_2$  sunt constantele de integrare.

Din ecuația (2.26):

$$\frac{du}{dz} = \frac{1-2\mu}{1-\mu} \left[ \varphi(z) - \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 \varphi(z_1) dz_1 \right] + f(z) - \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 f(z_1) dz_1 + \frac{c_1}{2} - \frac{c_2}{z^2} \quad (2.27)$$

Întroducând expresiile  $u$  și  $\frac{du}{dz}$  în ecuațiile (2.18) – (2.20) obținem:

$$\sigma_z^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \varphi(z) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 \varphi(z_1) dz_1 - \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 f(z_1) dz_1 \right] + c_1 - \frac{1}{z^2} c_2 \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta}^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{\mu}{1-\mu} \varphi(z) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 \varphi(z_1) dz_1 - f(z) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 f(z_1) dz_1 + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta} \right] + c_1 + \frac{1}{z^2} c_2 \quad (2.29)\end{aligned}$$

$$\sigma_x^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{\mu}{1-\mu} \varphi(z) - f(z) + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x} \right] + 2\mu c_1 + Ee \quad (2.30)$$

Constantele de integrare  $c_1$  și  $c_2$  se determină din condiții limită:

$$\sigma_z(r) = 0; \quad \sigma_z(R) = 0,$$

Unde  $r$  și  $R$  reprezintă raza interioară și exterioară a țevii.

Introducând valoarea constantelor în ecuațiile (2.28) – (2.30) obținem:

$$\begin{aligned}\sigma_z^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) \left( F(R) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(R) - \varphi(R) \right) - F(z) - \right. \\ & \left. - \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(z) + \varphi(z) \right] \quad (2.31)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta}^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{z^2} \right) \left( F(R) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(R) - \varphi(R) \right) + F(z) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(z) + \right. \\ & \left. + \frac{\mu}{1-\mu} \varphi(z) - f(z) + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta} \right] \quad (2.32)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_x^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2\mu R^2}{R^2-r^2} \left( F(R) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(R) - \varphi(R) \right) - f(z) + \right. \\ & \left. + \frac{\mu}{1-\mu} \varphi(z) - f(z) + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x} + Ee \right] \quad (2.33)\end{aligned}$$

unde

$$F(z) = \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 f(z_1) dz_1 \quad (2.34)$$

$$K(z) = \frac{1}{z^2} \int_r^z z_1 \varphi(z_1) dz_1 \quad (2.35)$$

Constanta  $e$  se determină din condiția:

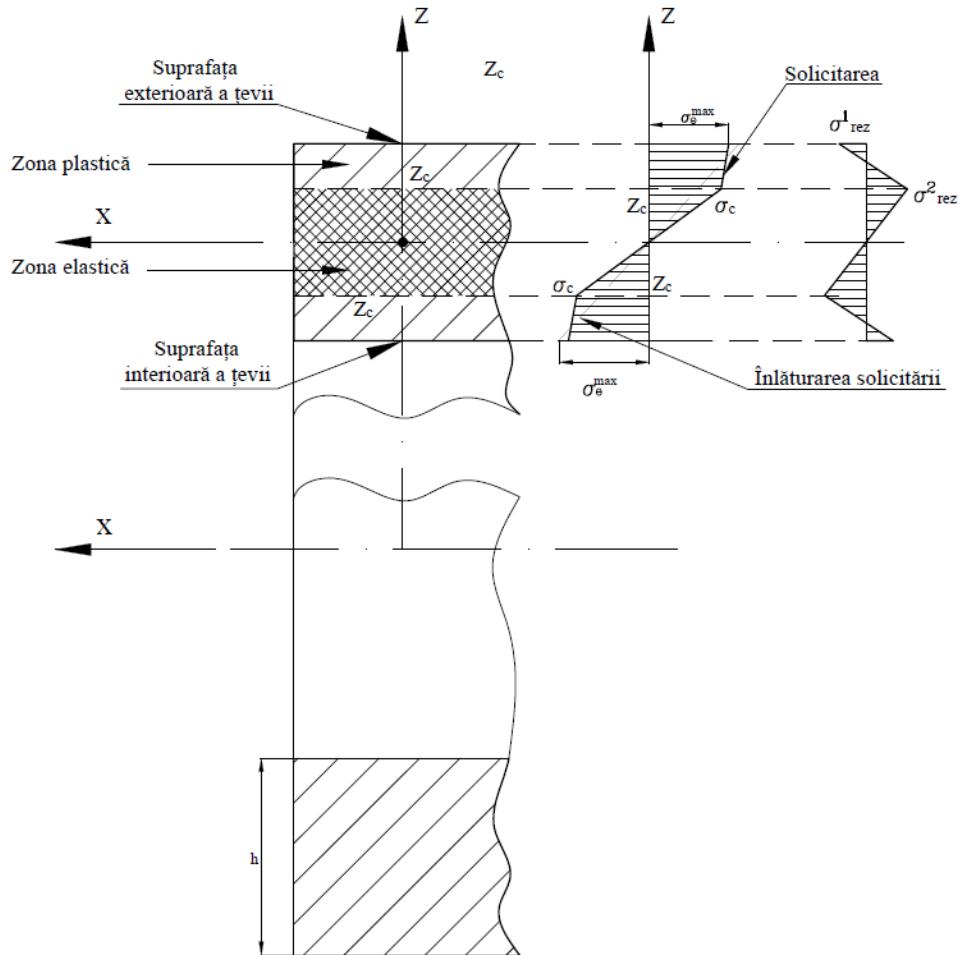
$$2\pi \int_r^R \sigma_z r_1 dr_1 = 0 \quad (2.36)$$

Introducând în ecuația (2.33) valoarea constantei  $e$ , obținem:

$$\sigma_x^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2R^2}{R^2-r^2} \left( F(R) - \frac{\mu}{1-\mu} K(R) \right) - \frac{2}{R^2-r^2} \int_r^R z (\varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x}) dz - f(z) + \right.$$

$$+ \frac{\mu}{1-\mu} \varphi(z) + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x} \Big] \quad (2.37)$$

Relațiile (2.31), (2.32) și (2.37) exprimă tensiunile reziduale din corpul țevii cu o anumită valoare a deformațiilor initiale. Epurele tensiunilor reziduale sunt prezentate în figura 2.6 [59].



**Fig. 2.6** Tensiuni reziduale în corpul țevii cu o anumită valoare a deformațiilor initiale

Pentru deformația reziduală izotropă, având în vedere condițiile:

$$f(z) = \frac{1+\mu}{1-\mu} \varepsilon_0;$$

$$\varphi(z) = 0,$$

Se obține:

$$\sigma_z^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) F(R) - F(z) \right] \quad (2.38)$$

$$\sigma_\theta^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{z^2} \right) F(R) + F(z) - f(z) \right] \quad (2.39)$$

$$\sigma_x^{rez} = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2R^2}{R^2 - r^2} F(R) - f(z) \right] \quad (2.40)$$

Pe raza exterioară a țevii ( $z = R$ )

$$\sigma_z = 0;$$

$$\sigma_\theta(R) = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2R^2}{R^2 - r^2} F(R) - f(R) \right] \quad (2.41)$$

Pe raza interioară ( $z = r$ )

$$\sigma_z = 0;$$

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_x(r) = \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2R^2}{R^2 - r^2} F(R) - f(r) \right] \quad (2.42)$$

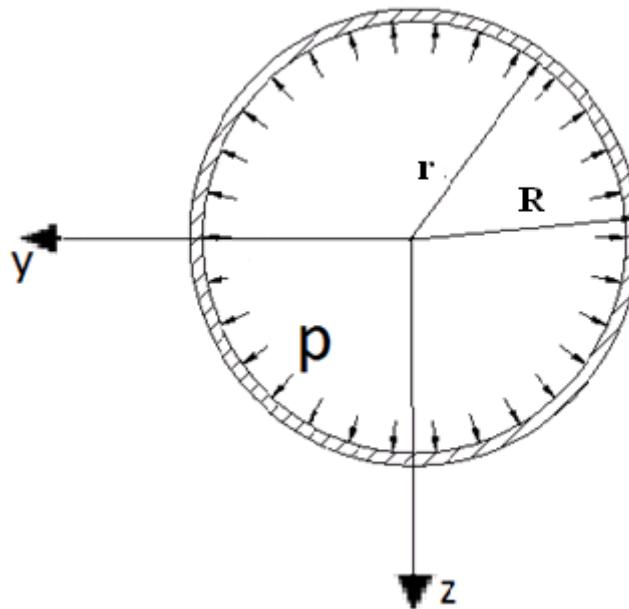
## 2.4 TENSIUNI REZIDUALE DUPĂ OPERAȚIUNEA DE EXPANDARE

După sudare țeava ajunge la operațiune de expandare. Conform standardelor API (American Petroleum Institute) diametrul țevii se expandează cu 0,3% – 1,5% [75]. Ca rezultat, se obține o țeavă calibrată după diametru.

Se consideră o țeavă supusă unei presiuni “ $p$ ” (Fig. 2.7) în urma căreia apare o deformare plastică. Deformațiile inițiale sunt:

$$\varepsilon_{0z} = -\varepsilon_0; \quad \varepsilon_{0\theta} = \varepsilon_{0x} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \quad (2.43)$$

unde  $\varepsilon_0$  - valoarea absolută a deformării reziduale;



**Fig. 2.7** Pereții țevii acționate radial de o presiune interioară

Se presupune că deformația inițială plastică se realizează fără modificare de volum ( $\mu = \frac{1}{2}$ ). Se consideră că deformația inițială, care este constantă ca mărime, se regăsește în spațiul inelar  $r \leq z \leq R$ .

Din formulele (2.24) și (2.26) obținem [9]:

$$\varphi(z) = \begin{cases} 0 & z < r \\ -\frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{z}{r} & r \leq z \leq R; \end{cases} \quad (2.44)$$

$$f(z) = \begin{cases} 0 & z < r \\ -\frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_0 & r \leq z \leq R; \end{cases} \quad (2.45)$$

În concordanță cu egalitățile (2.34) și (2.35) obținem:

$$F(z) = \begin{cases} 0 & z < r \\ -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) & r \leq z \leq R; \end{cases} \quad (2.46)$$

$$K(z) = \begin{cases} 0 & z < r \\ -\frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{z}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2z^2} \right) & r \leq z \leq R; \end{cases} \quad (2.47)$$

Cu ajutorul expresiilor (2.31), (2.32) și (2.37) obținem:

$$\begin{aligned} \sigma_z^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) \left( F(R) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(R) - \varphi(R) \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} - \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{z}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2z^2} \right) - \frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{z}{r} \right] \end{aligned} \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{z^2} \right) \left( F(R) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} K(R) - \varphi(R) \right) - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) - \right. \\ & \left. - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{z}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2z^2} \right) - \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{2} - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_0 + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta} \right] \end{aligned} \quad (2.49)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left[ \frac{2R^2}{R^2-r^2} \left( F(R) - \frac{\mu}{1-\mu} K(R) \right) - \frac{2}{R^2-r^2} \int_r^R z (\varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x}) dz - \right. \\ & \left. - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_0 + \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{3\varepsilon_0}{2} + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x} \right] \end{aligned} \quad (2.50)$$

Valoarea funcției  $F(z)$  pentru raza exterioară  $R$  va fi:

$$F(R) = -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (2.51)$$

La fel este valabil și pentru funcțiile  $K(R), \varphi(R)$ :

$$K(R) = \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{R}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2R^2} \right) \quad (2.52)$$

$$\varphi(R) = -\frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{R}{r} \quad (2.53)$$

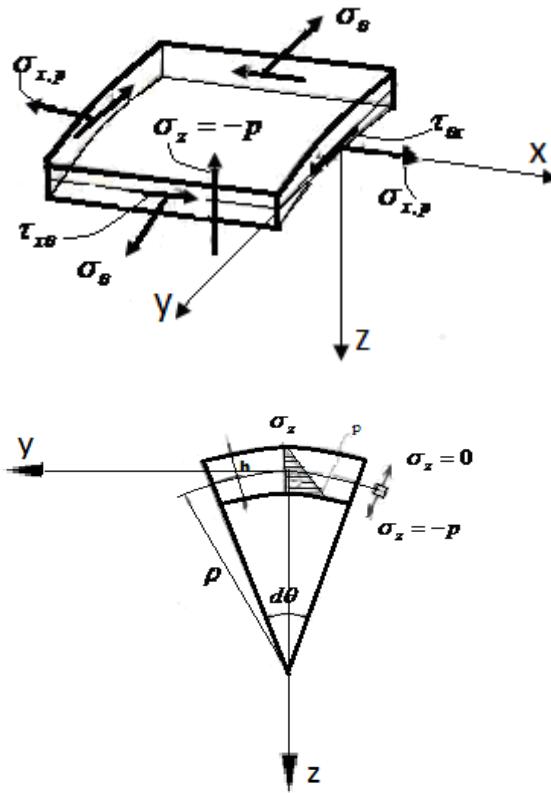
Valorile acestor funcții se introduc în relațiile (2.48) - (2.50):

$$\begin{aligned} \sigma_z^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) \left[ -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{R}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2R^2} \right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{R}{r} \right] \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} - \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{z}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2z^2} \right) - \frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{z}{r} \right\} \end{aligned} \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{R^2}{R^2-r^2} \left( 1 + \frac{r^2}{z^2} \right) \left[ -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{R}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2R^2} \right) - \frac{3\varepsilon_0}{2} \ln \frac{R}{r} \right] - \right. \\ & \left. - \left[ \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{z^2} \right) - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{z}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2z^2} \right) - \frac{\mu}{1-\mu} \cdot \frac{3\varepsilon_0}{2} - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_0 + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0\theta} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.55)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x^{rez} = & \frac{E}{1+\mu} \left\{ \frac{2R^2}{R^2-r^2} \left[ -\frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} \varepsilon_0 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) - \frac{\mu}{1-\mu} \frac{3\varepsilon_0}{4} \left( \ln \frac{R}{r} - \frac{1}{2} + \frac{r^2}{2R^2} \right) \right] - \right. \\ & \left. - \frac{2}{R^2-r^2} \int_r^R z (\varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x}) dz - \frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_0 + \frac{\mu}{1-\mu} - \frac{3\varepsilon_0}{2} + \varepsilon_{0z} - \varepsilon_{0x} \right\} \end{aligned} \quad (2.56)$$

Valorile rezultate (2.53), (2.54) și (2.55) reprezintă relațiile analitice ale tensiunilor reziduale, ce rămân după operațiunea de expandare.



**Fig. 2.8** Distribuția tensiunilor pe parcursul expandării

## 2.5 CALCULUL ANALITIC AL TENSIUNILOR CIRCUMFERENȚIALE MAXIME CE APAR PE PARCURSUL OPERAȚIUNII DE EXPANDARE

Operațiunea de expandare reprezintă etapa în care se produc deformații plastice foarte mari și din cauza aceasta etapa respectivă necesită o atenție mare. Vom calcula analitic tensiunile circumferențiale ce apar pe parcursul expandării. Pentru a avea o imagine a evoluției tensiunilor, acestea se determină pentru un singur diametru dar cu grosimi variabile. Rezultatele obținute ne indică limitele în care se regăsesc tensiunile reziduale.

Teava destinată expandării are un diametru DN=400 și diametrul exterior este 406,4 mm. Presupunem că:

- $B$  este lățimea tablei;
- $\rho_1 = B/2\pi$  (raza fibrei medii înaintea expandării),
- $\rho_2$  = raza maximă interioară pe parcursul expandării;
- $\rho_3$  = raza exterioară necesară după expandare;
- $D_1 = 2\rho_1 + h$  (diametrul țevii înaintea expandării).

Deformațiile plastice ale țevii pe parcursul expandării vor apărea atunci când este valabilă următoarea expresie [58]:

$$2 \left( 1 + \frac{\sigma_r - \sigma_c}{E} \right) \rho_1 > \rho_2 + \sqrt{\rho_2^2 + 2\rho_1 h} > 2 \left( 1 + \frac{\sigma_c}{E} \right) \rho_1 \quad (2.57)$$

În această situație  $\rho_2$  devine:

$$\rho_2 = \left( \frac{\frac{\rho_3 + \sqrt{\rho_3^2 - 2\rho_1 h}}{2\mu_2\rho_1} - 1}{\left( 1 - \frac{E_t}{E} \right) + \frac{\sigma_c}{E} + 1} \right) \rho_1 - \frac{h}{2 \left( \left( \frac{\rho_3 + \sqrt{\rho_3^2 - 2\rho_1 h}}{2\mu_2\rho_1} - 1 \right) / \frac{\sigma_c}{E} + 1 \right)} \quad (2.58)$$

unde

$\mu_2 = 1$ , coeficientul ce caracterizează viteza de deformare a oțelului pe parcursul operațiunii de expandare;

$\rho_1$  = raza fibrei medii înaintea expandării, [mm];

$\rho_2$  = raza maximă interioară pe parcursul expandării, [mm];

$\rho_3$  = raza exterioară necesară după expandare, [mm];

$h$  = grosimea tablei, [mm];

$\sigma_c$  = limita de curgere, [MPa];

$E$  = modulul de elasticitate, [MPa];

$E_t$  = modulul de ecruisare, [MPa];

Tensiunile circumferențiale pe suprafața fibrei medii numai din procesul de expandare sunt egale cu:

$$\sigma_{\theta}^{max} = \sigma_c + E_{ecr} \left( \frac{\rho_2 + \sqrt{\rho_2^2 + 2\rho_1 h} - 2\rho_1}{2\rho_1} - \frac{\sigma_c}{E} \right) > 0 \quad (2.59)$$

În continuare în tabelul 2.1, sunt centralizate rezultatele calculelor analitice pentru o țeavă DN 400 executată din oțel L415 MB (API 5L Grade X60) cu limita de curgere  $\sigma_c = 478$  MPa și tensiunea la rupere  $\sigma_r = 597$  MPa.

**Tab. 2.1 Rezultate obținute în urma calculelor analitice**

$h$ ,[mm]	7,9	10	12
$\rho_2$ ,[mm]	195,97	193,87	191,87
D,[mm]	406	406	406
$\sigma_{\theta}^{max}$ , [MPa]	537,08	531,53	515,26

Din calculele efectuate se observă că tensiunile circumferențiale depășesc limita de curgere  $\sigma_c$  și valoarea lor scade proporțional cu mărirea grosimii peretelui.

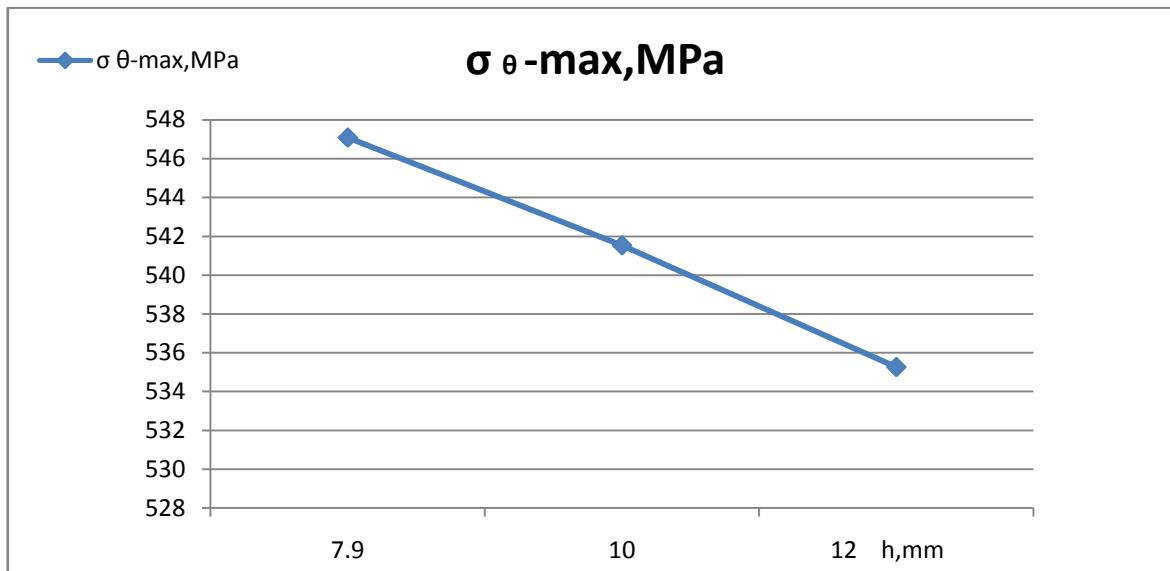
## 2.6 CONCLUZII

În acest capitol s-a realizat un studiu analitic al tensiunilor reziduale ce rămân în tablă și apoi în corpul țevii după principalele etape tehnologice. Scopul și aportul propriu a constat în corelarea celor două modele fizice – placa dreptunghiulară și învelișul cilindric subțire. Studiul propriu-zis s-a bazat pe cercetările efectuate de către mari savanți în domeniul - Heinrich Hencky și Robert Hooke.

Începînd cu modelul fizic – placa dreptunghiulară, deformațiile se produc pe direcția axei  $y$ . Ca urmare a deformațiilor plastice ramân tensiunile reziduale  $\sigma_y^{rez}$ . Trebuie subliniat faptul că acele tensiuni  $\sigma_y^{rez}$  din placă pe parcursul procesului tehnologic devin tensiuni

circumferențiale  $\sigma_{\theta}^{rez}$  din corpul țevii. O atenție mărită necesită ultima etapă tehnologică, cea de expandare, atunci când se produc deformații plastice pe direcția circumferențială. Ca urmare acele tensiuni reziduale  $\sigma_{\theta}^{rez}$  sunt cele mai mari.

În urma calculelor analitice efectuate s-a întocmit un grafic prezentat în figura 2.9, și s-au constatat că cu cât crește grosimea tablei cu atât scade valoarea tensiunilor circumferențiale, dar aici există un risc: în urma calculelor analitice efectuate s-au obținut valorile destul de mari a tensiunilor circumferențiale  $\sigma_{\theta}^{max}$ . De aici rezultă că tensiunile însumate circumferențiale rezultate în urma procesului de fabricație și a solicitărilor ciclice, ce vor apărea în urma exploatarii țevii pot conduce la valori ce pot depăși rezistența la rupere  $\sigma_r$ .



**Fig. 2.9** Curba caracteristică  $h - \sigma_{\theta}^{max}$

Se mai poate adăuga că, creșterea grosimii pentru același diametru duce la scăderea tensiunilor circumferențiale, ceea ce duce la apropierea de limita de curgere  $\sigma_c$ . Ca urmare, nu se produc deformații plastice mari, ceea ce duce la creșterea ovalității  $\Delta_0$ .

În final concluzionăm că limitele în care se efectuează expandarea influențează caracteristicile mecanice ale țevii. Din cauza aceasta este important să se găsească valori optime ale expandării, pentru a găsi un echilibru între precizia geometrică și tensiunile reziduale.

## CAPITOLUL 3.

# STUDIUL NUMERIC AL TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN CORPUL UNEI ȚEVI SUDATE LONGITUDINAL

### 3.1 GENERALITĂȚI

Metoda elementelor finite (MEF) a fost utilizată la începutul anilor 50 pentru prima dată în practica inginerescă. Inițial metoda s-a dezvoltat pe două direcții independente: inginerescă și matematică.

Pentru dezvoltarea metodei elementelor finite, un rol deosebit l-au avut principiile mecanicii variaționale și metodele matematice bazate pe aceste principii. Discretizarea probemei pe baza metodei variaționale Ritz, pentru prima dată a fost aplicată de către matematicianul german Richard Courant.

Perioada ultimelor decenii este caracterizată prin dezvoltarea și aplicarea MEF în numeroase domenii, cum ar fi: mecanica mediilor continue, proiectare, dinamica construcțiilor și altele.

Metoda elementelor finite, ca și alte metode numerice, este bazată pe prezentarea construcției continue reale prin modelul discretizat și schimbarea ecuațiilor diferențiale ce descriu starea de tensiune și deformație a corpurilor solide cu sistemul de ecuații algebrice. În același timp, MEF permite o clară interpretare geometrică, constructivă și fizică [31].

### 3.2 PROGRAMUL DE ANALIZĂ CU ELEMENTE FINITE ANSYS R16.2

În prezent, pentru efectuarea unui studiu numeric, sunt folosite diverse programe de analiză cu elemente finite, ce permit obținerea soluțiilor pentru o gamă largă de probleme ingineresti, ce include [6], [31]:

- analiza stării de tensiune;
- transferul de căldură;
- electromagnetismul;
- dinamica fluidelor.

În prezentă lucrare, efectuarea studiului numeric al tensiunilor reziduale se va realiza cu ajutorul programului de analiză cu elemente finite ANSYS R16.2 [73].

ANSYS R16.2 este un program de analiză cu element finit utilizat pe scară largă în industrie și cercetare, cu scopul de a simula răspunsul unui sistem fizic solicitat mecanic, termic sau electromagnetic, dar și de a analiza starea de tensiune a elementului studiat. Deasemenea, programul permite rezolvarea cazurilor generale ale problemelor de contact pentru supafețe, prezența deformațiilor și a unghiurilor mari de rotire [38].

Programul ANSYS pentru rezolvarea problemelor neliniare folosește metoda Newton – Raphson sau metoda tangentelor. Creșterea încărcării se efectuează prin încărcarea treptată. Înaintea emiterii soluției, metoda Newton – Raphson analizează vectorul solicitărilor, ce apare ca diferență între solicitările reconstituite și cele induse[46].

Dacă toată energia ce a fost transmisă sistemului de către solicitările exterioare se conservă, sistemul se consideră conservator, dar în momentul în care solicitarea a fost înlăturată și energia se disipează (de exemplu deformația plastică sau frecare prin alunecare) atunci sistemul este neconservator. Calculul unui sistem conservator nu depinde de istoricul solicitărilor: de obicei solicitările pot fi induse în orice ordine, în același timp, fără să

influențeze rezultatele obținute. În cazul sistemului neconservator este invers, iar răspunsul sistemului trebuie să reflecte clar și exact ordinea solicitărilor.

Programul utilizat poate să modeleze solicitările atașate sistemului, ce își păstrează direcția constantă independent de deplasarea construcției, cât și solicitările, ce își schimbă direcția în funcție de deplasarea elementelor, ce sunt supuse modificărilor mari [63].

Calculul privind deformațiile mari are în vedere și modificarea rigidității, ce apare datorită schimbării formei și orientării elementului. Este de menționat că metodologia de determinare a deformațiilor prevede studiul acestora pe etapele procesului tehnologic [54].

În realitate, procesul de fabricație unei țevi sudate longitudinal JUOE este reprezentat de 20 de etape, dar cele în care se produc deformații plastice la rece sunt doar 4 [77]. Datorită faptului că scopul tezei este studiul tensiunilor reziduale, modelarea numerică se va realiza pentru acele etape ce prezintă deformații plastice la rece.

Modelarea numerică a procesului de fabricație a țevii sudate longitudinal se va efectua în următoare ordine [16]:

1. îndoirea marginilor;
2. relaxarea materialului după încetarea solicitării;
3. obținerea formei "U";
4. relaxarea materialului după încetarea solicitării;
5. obținerea formei "O";
6. relaxarea materialului după încetarea solicitării;
7. expandare;
8. relaxarea materialului după încetarea solicitării.

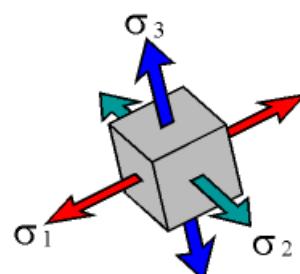
Având în vedere simetria și geometria țevii, modelarea procesului de fabricație și studiul stării de tensiune și de deformație, se va face pe o jumătate.

La finalul fiecărei etape tehnologice, se vor prezenta următoarele tensiuni și deformații:

- tensiunile normale; sunt acele tensiuni ce acționează pe direcția normalei la secțiune.
- tensiunile tangențiale; sunt acele tensiuni ce acționează în planul secțiunii.
- tensiunile echivalente von Misses; tensiunile echivalente von Misses sunt acele eforturi unitare echivalente, ce caracterizează o anumită stare de solicitare pe mai multe direcții. Tensiunile echivalente sau tensiunile von Misses, se vor calcula după formula de mai jos și se vor determina cu ajutorul teoriei de rezistență a energiei specifice de deformație modificatoare de formă [67]:

$$\sigma_{ech} = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2]} \quad (3.1)$$

- tensiunile principale maxime; tensiunile normale ce lucrează pe planurile principale se numesc tensiuni principale (Fig. 3.1);



**Fig. 3.1** Tensiunile principale  $\sigma$

- deformațiile echivalente; sunt acele deformațiilor echivalente, sunt acele deformații ce exprimă valoarea deformației permanente a corpului solicitat. Deformațiile echivalente sunt exprimate cu ajutorul expresiei de mai jos[35], [69] :

$$\varepsilon_{ech} = \frac{1}{1+v} \sqrt{\frac{1}{2}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]} \quad (3.2)$$

Rezultatele obținute prin studiul numeric trebuie validate printr-un studiu experimental. Majoritatea programelor de analiză cu elemente finite folosesc criteriul von Mises pentru determinarea punctului de curgere al materialului [35]. Prin programul ANSYS R 16.2 nu se pot determina deformațiile plastice maxime. Acestea se obțin conform criteriului Tresca-Guest [28]. Diferența dintre cele două criterii este următoare:

$$\varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_{von\ Mises} \quad (3.3)$$

unde,

$\varepsilon_{T-G}$  = deformații plastice după criteriul Tresca-Guest, [%];

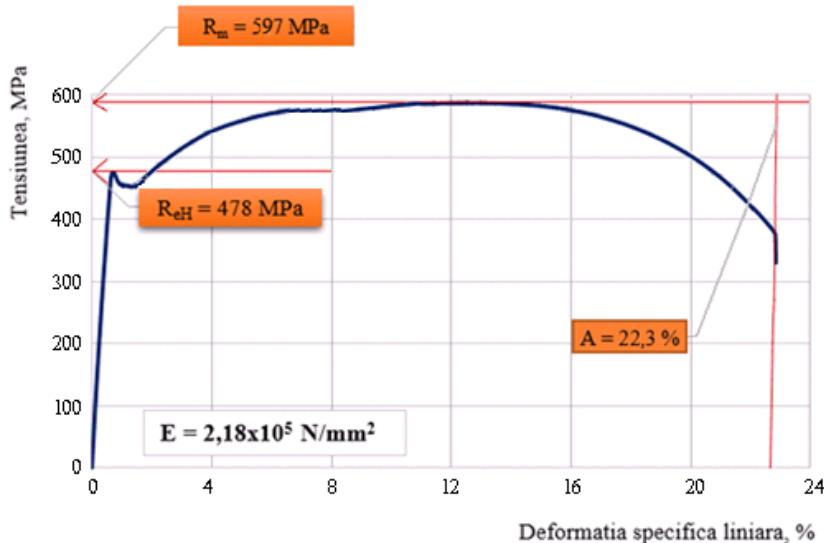
$\varepsilon_{von\ Mises}$  = deformații plastice echivalente după criteriul von Mises, [%].

Ambele criterii se folosesc pentru determinarea începutului curgerii plastice în metale, dar criteriul Tresca-Guest oferă rezultate mai precise. În continuare deformațiile echivalente plastice obținute prin programul ANSYS R 16.2 se vor înmulți cu  $\frac{\sqrt{3}}{2}$  pentru a obține deformațiile plastice principale necesare validării modelului numeric.

Studiul numeric din acest capitol are ca scop nu numai identificarea și determinarea tensiunilor reziduale dar și simularea etapelor din procesul de fabricație și obținerea rezultatelor cât mai apropiate de realitate. Din cauza aceasta, tipul de material folosit în modelare are aceleași caracteristici cu tabla folosită la fabricarea ţevii, și anume L415MB (SR EN ISO 3183:2013) [11], iar dimensiunile tablei supuse modelării sunt:

- Lățimea tablei - 1250 mm;
- Grosimea tablei – 7.9 mm;

Caracteristicile mecanice și elastice s-au stabilit prin încercarea de întindere cu ajutorul mașinii de încercat A016 [39]. În urma încercării, limita de curgere obținută este de  $\sigma_c = 478\ MPa$ , iar rezistența la rupere este în valoare de  $\sigma_r = 597\ MPa$ . Curba caracteristică obținută este prezentată în figura 3.1.



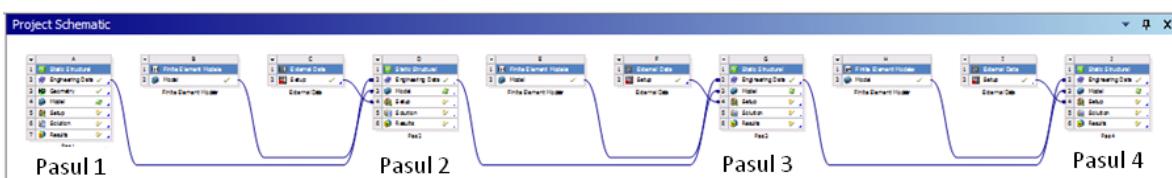
**Fig. 3.2** Curba caracteristică otel L415 MB

În continuare, tensiunile rezultate în urma încercării la tracțiune sunt introduse în categoria proprietăților materialului din programul ANSYS R16.2 după cum se vede în figura 3.3[73].

Properties of Outline Row 4: Teava				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Density	7850	kg m^-3	
3	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
6	Isotropic Elasticity			
12	Multilinear Isotropic Hardening	Tabular		
15	Alternating Stress Mean Stress	Tabular		
19	Strain-Life Parameters			
27	Tensile Yield Strength	478	MPa	
28	Compressive Yield Strength	490	MPa	
29	Tensile Ultimate Strength	597	MPa	
30	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

**Fig. 3.3** Proprietătile otelului tevii

În figura 3.4, se prezintă fluxul modelării procesului de fabricație al unei țevi sudate longitudinale. Important este faptul că toate aceste etape sunt interconectate și anume, starea de tensiune și de deformare din prima etapa se transferă în etapa următoare ca stare reziduală.



**Fig. 3.4** Fluxul procesului de fabricatie al unei țevi sudate longitudinal

Din figura prezentată mai sus, pasului „1” îi corespunde operațiunea privind îndoirea marginilor, pasul „2” reprezintă etapa prin care se obține forma ”U”, pasului „3” îi corespunde etapa privind obținerea formei ”O”, iar pasului „4” îi revine operațiunii privind expandarea mecanică.

Rezultatele modelării procesului de fabricație sunt prezentate în continuare iar la finalul modelării se obține o țeavă sudată longitudinal cu DN 400.

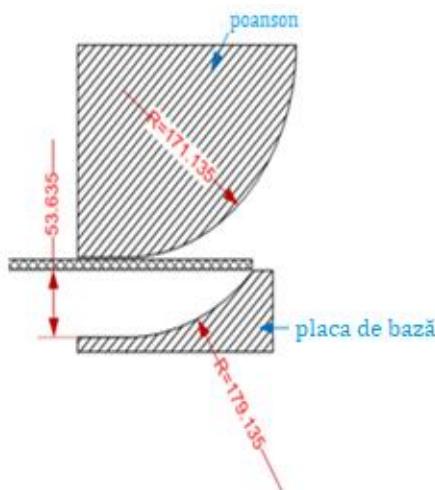
### 3.3 MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE ÎNDOIRE A MARGINILOR

Procesul de fabricație al unei țevi sudate longitudinal începe cu testarea calitativă a tablei cu ultrasunete, iar prima etapa ce presupune deformare plastică la rece este cea de îndoire al marginilor "J". Operațiunea respectivă este esențială pentru viitorul cordon de sudură. Pentru a avea un rezultat corespunzător standardelor în vigoare, în procesul de sudură, marginile tablei trebuie să fie îndoite în aşa fel încât să nu fie nici-o abatere de la paralelism [77], [79].

În realitate, procesul îndoirii marginilor se realizează cu ajutorul unei prese hidraulice. Elementul principal îl reprezintă cuplu poanson – placă de bază. Pentru obținerea unei raze de îndoire ce corespunde cu raza țevii finale, raza poansonului se calculează în funcție de calitățile materialului îndoit și revenirea elastică. Raza poansonului pentru DN 400 este de 171,13 mm. Raza matriței este calculată și în funcție de grosimea materialului și este egală cu 179,13 mm [17], [43].

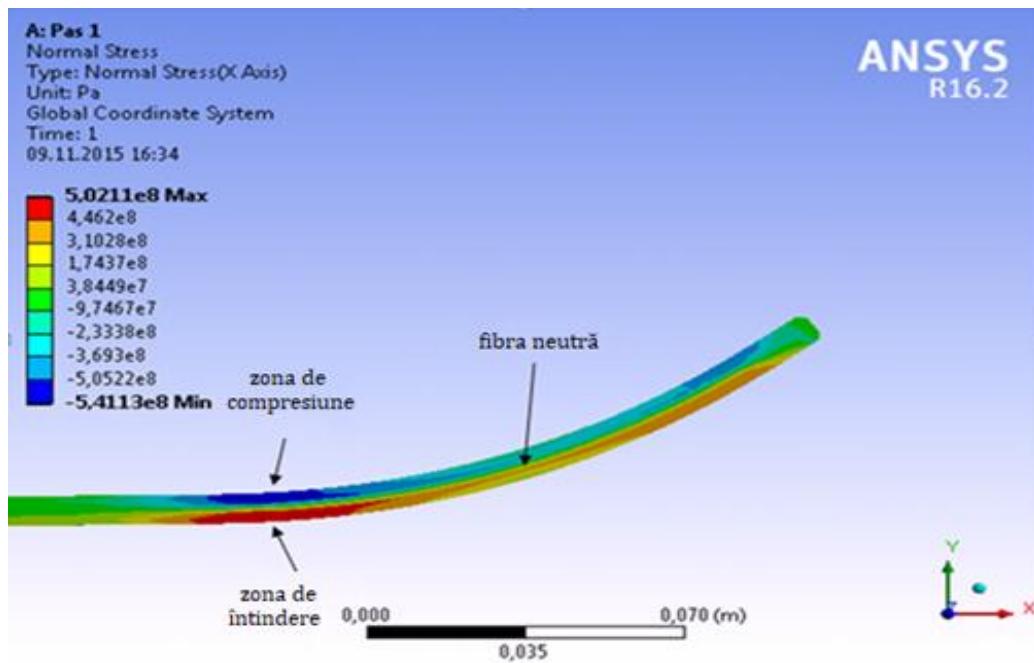
În continuare pentru modelarea numerică a operațiunii de îndoire, în figura 3.5 este reprezentată geometria cuplului poanson – placă de bază. În timpul modelării, poansonul are o deplasare verticală până la momentul în care tabla atinge forma plăcii de bază.

Piesa 1 reprezintă poansonul, care este acționat de către presa hidraulică. Piesa 2 reprezintă placă de bază. Piesa 1 are o deplasare verticală și ca rezultat se obține tabla cu marginile îndoite.



**Fig.3.5** Reprezentarea geometrică a cuplului poanson – placă de bază

În continuare, în figura 3.6 sunt exprimate tensiunile normale  $\sigma_j^x$  pe direcția axei x, rezultate în urma îndoirii marginilor. Trebuie menționat că toate aceste valori reprezintă momentul în care poansonul solicită tabla și nu se produce relaxarea.

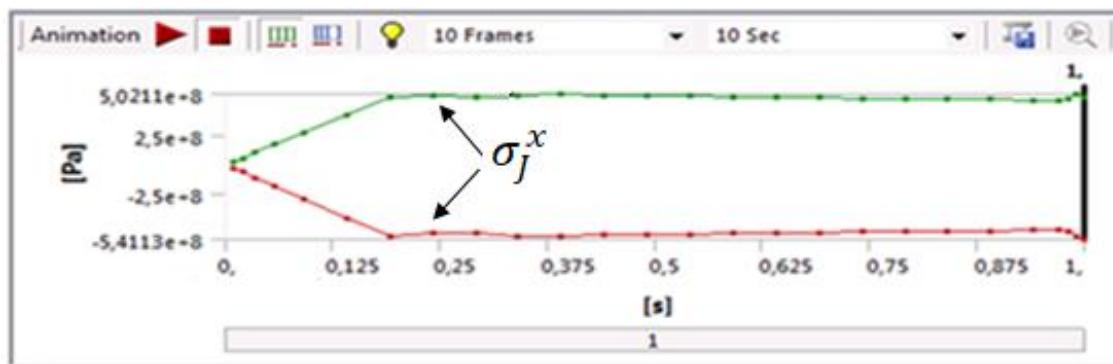


**Fig.3.6** Distribuția tensiunilor normale  $\sigma_x^x$

Urmărind rezultatele obținute din figura 3.6, pentru etapa respectivă și pentru etapele viitoare se deosebesc 3 zone, ce exprimă starea de tensiune a marginilor îndoite: zona de compresiune a fibrei materialului, zonă de întindere și zona în care fibrele în urma încovoierii nu-și modifică lungimea, aceasta din urmă poartă numele de fibra neutră [66].

După cum se vede, tensiunea normală  $\sigma_x$  din zona de întindere are valoare maximă de 5,0211e8 Pa, iar tensiunea  $\sigma_x^x$  din zona de compresiune are o valoare ceva mai mare de -5,4113 e8 Pa. Acele zone cu valori maxime ale tensiunii sunt concentratori de tensiune, dar valoarea medie a tensiunilor în zona îndoită se situează între 3,1028 e8 Pa și -2,3338 e8 Pa. Zona fibrei neutre se situează cu valoarea în jur de 1,7437 e8 Pa. În același timp, se observă că, zonele cele mai solicitate sunt cele de trecere din formă plană spre cea curbă.

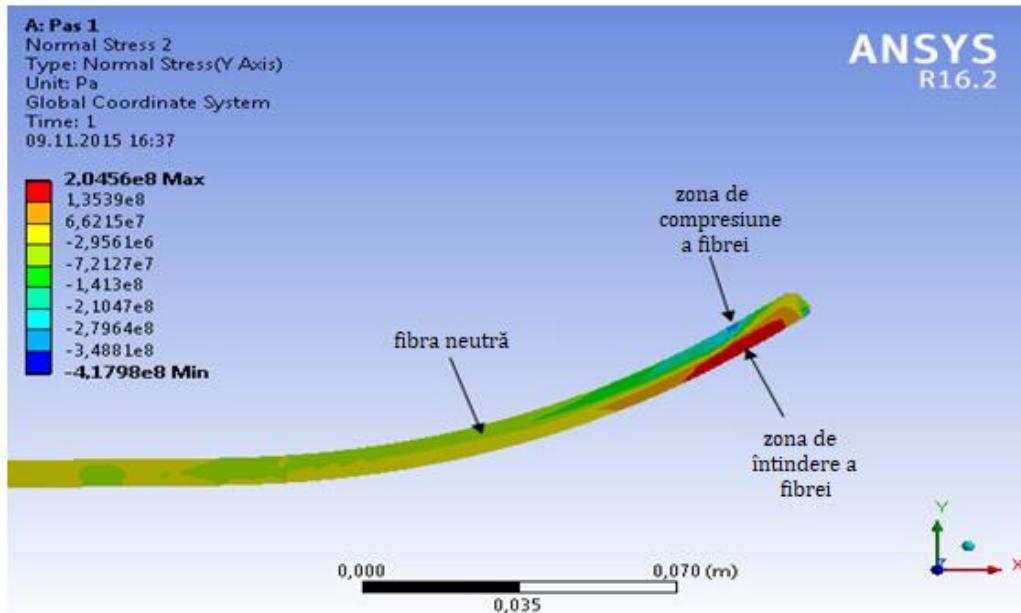
În figura 3.7 se poate vedea reprezentarea grafică a evoluției tensiunii  $\sigma_x^x$  pe parcursul operațiunii de îndoire a marginilor.



**Fig 3.7** Evoluția tensiunilor normale  $\sigma_x^x$  în zonele de compresiune și de întindere

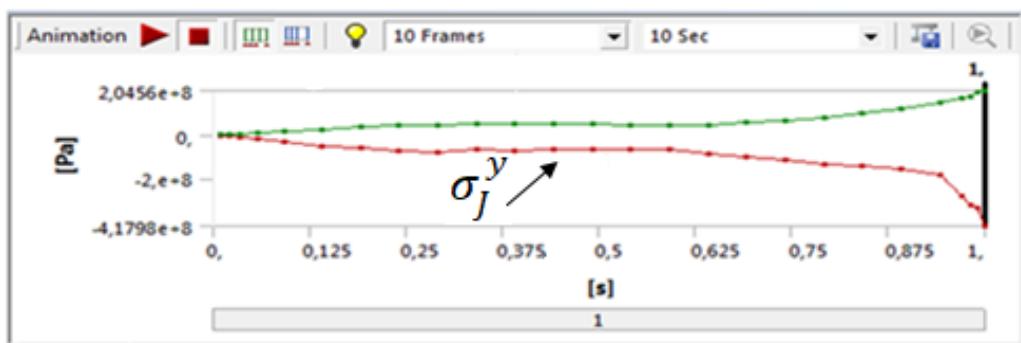
Modelarea continuă prin reprezentarea valorilor tensiunilor normale  $\sigma_y^y$  pe direcția axei y (figura 3.8). Se observă faptul că, valorile tensiunilor  $\sigma_y^y$  sunt mai mici decât cele  $\sigma_x^x$ , și anume: tensiunile maxime din zona de întindere au o valoare de 2,0456 e8 Pa și sunt cu 63%

mai mici decât tensiunile normale  $\sigma_j^x$  din aceeași zonă, iar tensiunile  $\sigma_j^y$  din zona de compresiune au o valoare de  $-4,1798 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și sunt cu 17% mai mici decât tensiunile  $\sigma_j^x$ .



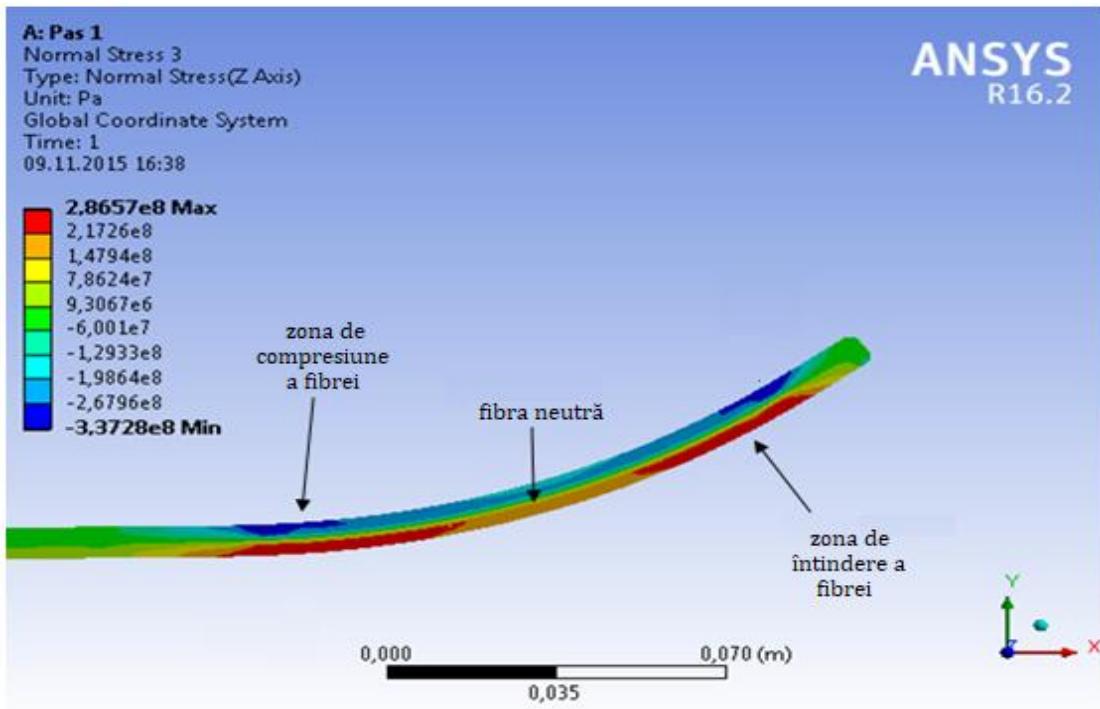
**Fig.3.8** Distribuția tensiunilor normale  $\sigma_j^y$

Tensiunile din zona fibrei neutre, au valorile cuprinse între valori  $-7,2217 \text{ e}7 \text{ Pa}$  și  $-2,9561 \text{ e}6 \text{ Pa}$ . Evoluția tensiunilor normale  $\sigma_j^y$  pe parcursul acționării poansonului este prezentată în figura 3.9.



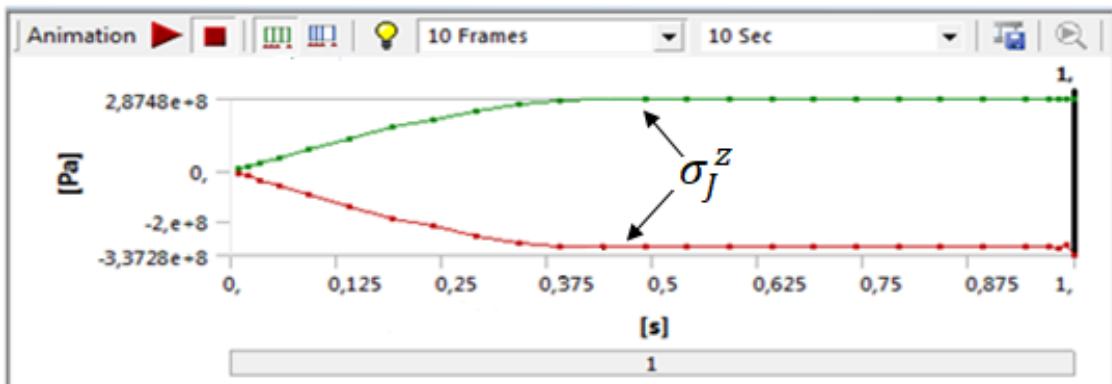
**Fig 3.9** Evoluția tensiunilor normale  $\sigma_j^y$  în zonele de compresiune și de întindere

Tensiunile normale  $\sigma_j^z$  prezentate în figura 3.10, au valorile apropiate tensiunilor  $\sigma_j^y$ , și anume: tensiunile din zone de întindere au o valoare maximă de  $2,8657 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și sunt de 28% mai mari decât tensiunile  $\sigma_j^y$ . Tensiunile din zona de compresiune au o valoare maximă de  $-3,3728 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și sunt cu 20% mai mici decât tensiunile  $\sigma_j^y$ .



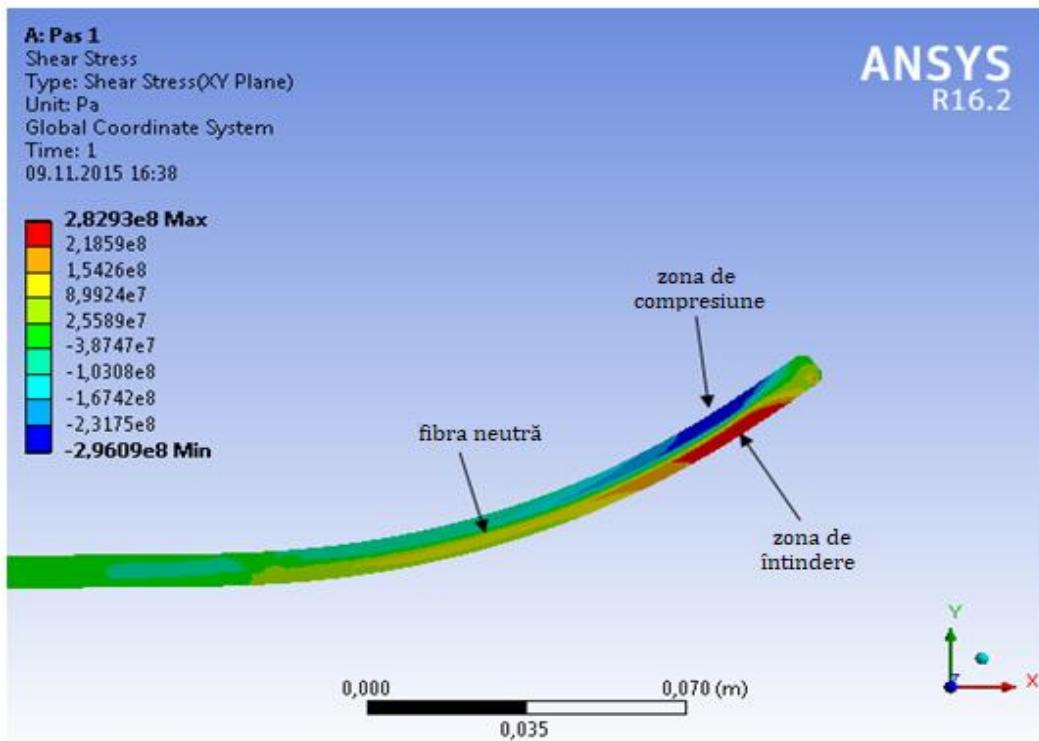
**Fig. 3.10** Distribuția tensiunilor normale  $\sigma_j^z$

În continuare, în figura 3.11 se prezintă evoluția tensiunilor normale  $\sigma_j^z$  pe parcursul solicitării semifabricatului cu poansonul.



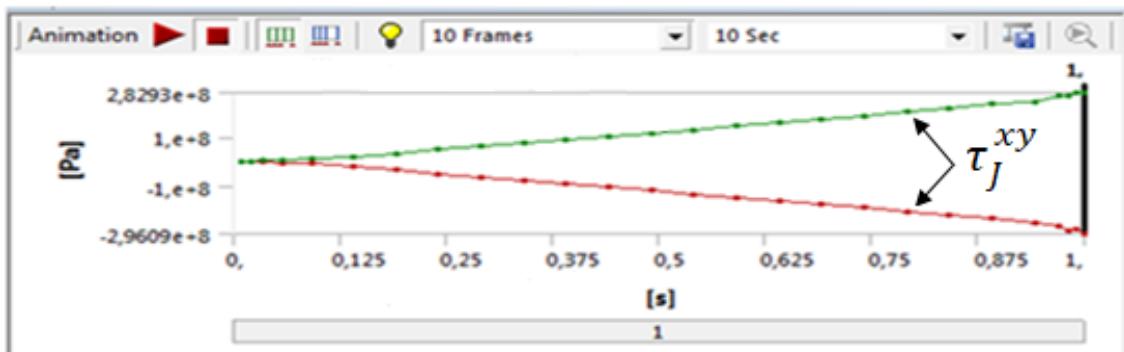
**Fig 3.11** Evoluția tensiunilor normale  $\sigma_j^z$  în zonele de compresiune și de întindere

Modelarea îndoierii marginilor continuă cu tensiunile tangențiale  $\tau_j^{xy}$  (figura 3.12). Pozițiile valorilor maxime se situează în zona de capăt a marginii tablei.



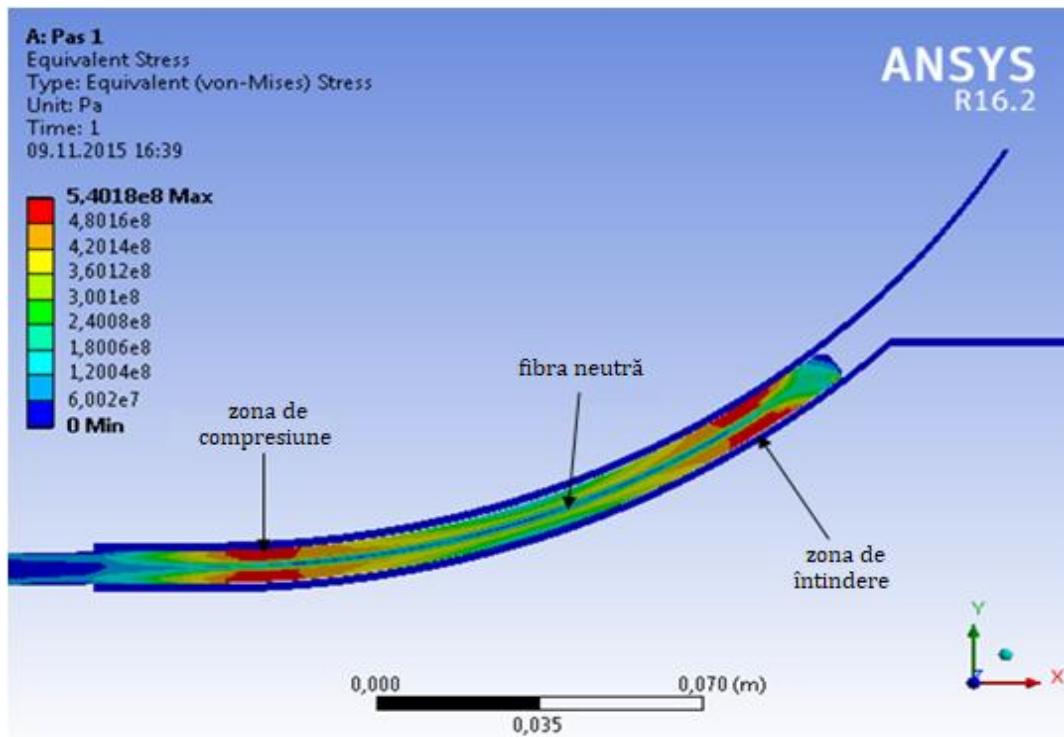
**Fig. 3.12** Distribuția tensiunilor tangențiale  $\tau_J^{xy}$

Tensiunile din zona de compresiune au o valoare maximă de  $-2,9609 \text{ e}8$  Pa și aceasta este cu 45,2% mai mică decât valoarea maximă tensiunilor normale  $\sigma_J^x$ , iar cele din zona de întindere au valoare maximă de  $2,8293 \text{ e}8$  Pa și sunt cu 43% mai mici decât valoarea tensiunilor normale  $\sigma_J^x$ . Valorile tensiunilor din zona fibrei neutre se situează în intervalul cuprins între  $8,9924 \text{ e}7$  Pa și  $-3,8747 \text{ e}7$  Pa. Valoarea și superioritatea tensiunilor normale  $\sigma_J^x$  față de celelalte tensiuni, demonstrează faptul că solicitarea maximă s-a produs pe direcția axei x.



**Fig 3.13** Distribuția tensiunilor tangențiale  $\tau_J^{xy}$  în zonele de compresiune și de întindere

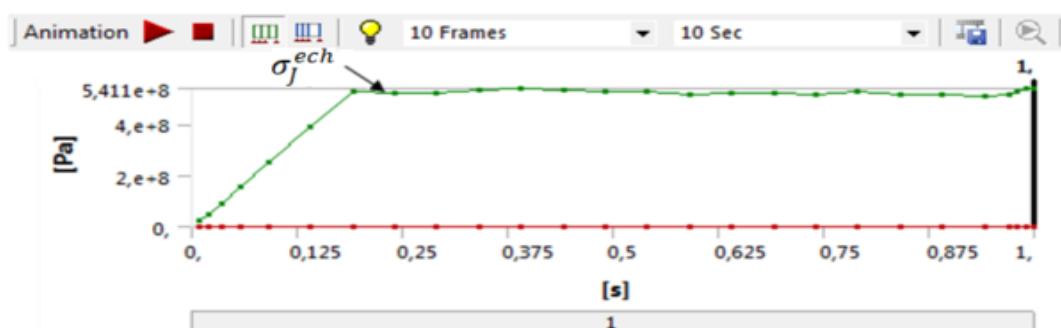
După cum s-a menționat la începutul capitolului respectiv, în figura 3.14 este prezentată distribuția tensiunilor echivalente von Mises  $\sigma_J^{\text{ech}}$ . Valoarea maximă a tensiunilor este de  $5,4018 \text{ e}8$  Pa. Conform curbei caracteristice pentru oțelul L415MB (SR EN ISO 3183:2013), valoarea maximă de  $5,4018 \text{ e}8$  Pa, demonstrează că semifabricatul a fost solicitat în domeniul plastic, nedepășind limita de rupere de  $5,9784 \text{ e}8$  Pa.



**Fig. 3.14** Distribuția tensiunilor  $\sigma_j^{ech}$  în zona deformată

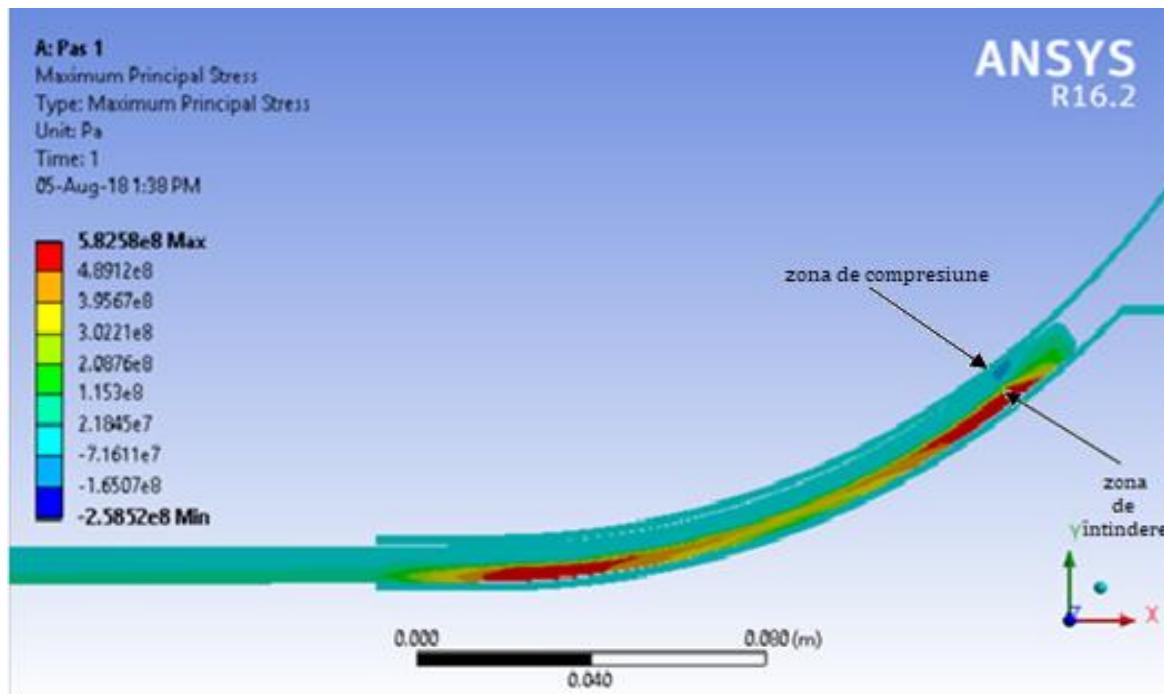
Trebuie adăugat faptul că, zonele în care se regăsesc tensiunile maxime este cea de trecere din forma plană în forma curbă și la capătul marginii.

În figura 3.15 se poate vedea evoluția tensiunilor echivalente pe parcursul acțiunării poansonului. După cum se vede, procesul de îndoire începe cu valori nule ale tensiunii echivalente  $\sigma_j^{ech}$  și treptat valorile urcă până ajung la valori maxime.



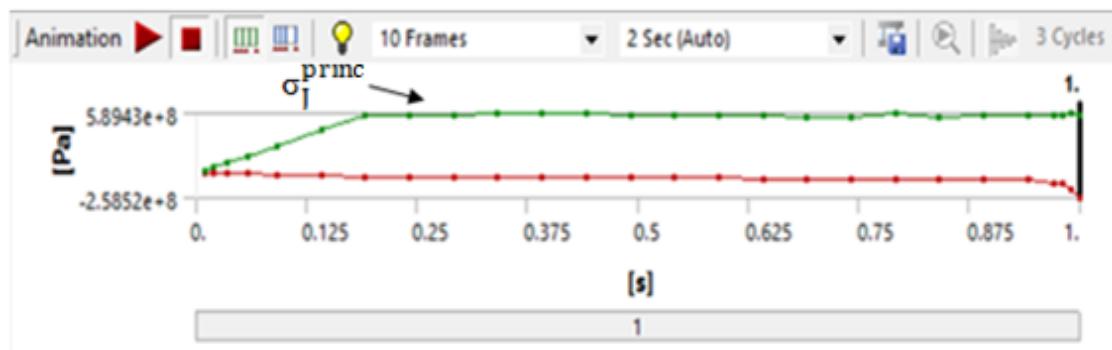
**Fig 3.15** Evoluția tensiunilor echivalente  $\sigma_j^{ech}$  la acțiunea poansonului

În continuare, în figura 3.16, sunt prezentate tensiunile principale  $\sigma_j^{princ}$  ce apar în momentul în care poansonul acționează asupra tablei. La fel ca și în cazul tensiunilor von Mises, valorile cele mai mari ale tensiunilor principale  $\sigma_j^{princ}$  se situează în zone de trecere din forma plană în cea curbă. Diferența majoră o reprezintă faptul că valorile maxime sunt în zona de întindere. Valoarea maximă a tensiunii principale este de  $\sigma_j^{princ} = 5,8258 \text{ e8 Pa}$ , iar pentru zona de compresiune este de  $\sigma_j^{princ} = -2,5852 \text{ e8 Pa}$ .



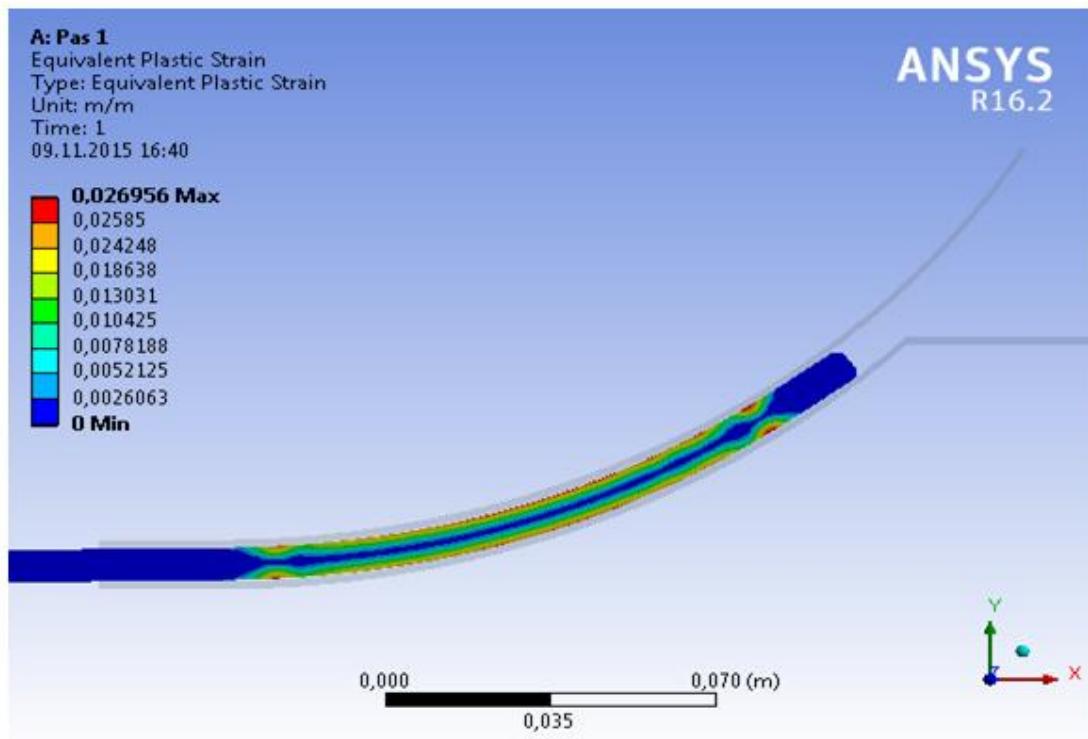
**Fig. 3.16** Distribuția tensiunilor principale  $\sigma_j^{\text{princ}}$  în zona deformată

În figura 3.17, este prezentată evoluția tensiunilor maxime principale la solicitarea de încovoiere a tablei.



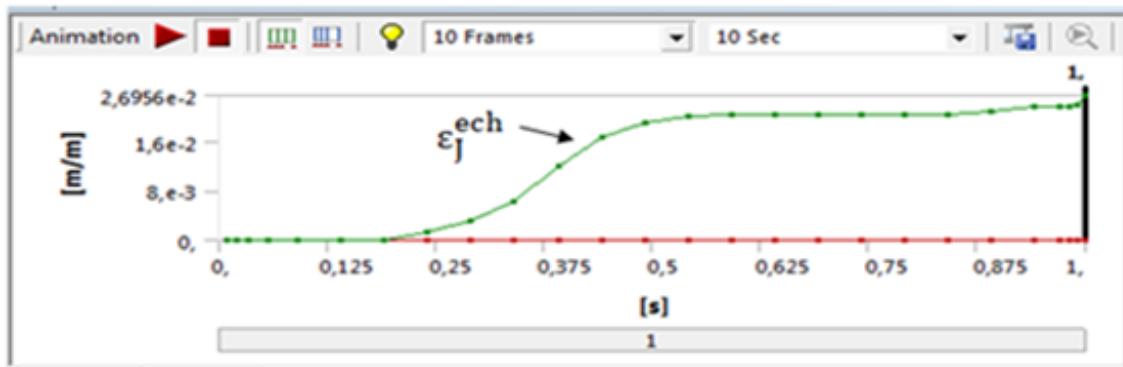
**Fig. 3.17** Evoluția tensiunilor principale  $\sigma_j^{\text{princ}}$

Studiul continuă cu prezentarea deformațiilor plastice echivalente  $\varepsilon_j^{\text{ech}}$  (Fig. 3.18).



**Fig. 3.18** Distribuția deformațiilor plastice  $\varepsilon_j^{ech}$  la acțiunea poansonului

Valoarea maximă  $2,69 \text{ e-}2$ , ce apare în figura 3.18 și în 3.19, reprezintă momentul în care tabla este acționată de către poanson. Deci valoarea deformației  $\varepsilon_j^{ech} = 2,69 \text{ e-}2$ , reprezintă valoare maximă a tablei solicitate, nerelaxate.



**Fig 3.19** Evoluția deformațiilor plastice  $\varepsilon_j^{ech}$  la acțiunea poansonului

După determinarea deformațiilor echivalente plastice  $\varepsilon_j^{ech}$  se vor determina deformațiile plastice principale  $\varepsilon_j^{princ}$ , și anume  $\varepsilon_j^{princ} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_j^{ech} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,026956 = 0,0233$ . Această valoare reprezintă deformațiile plastice principale maxime ce apar la finalul cursei poansonului.

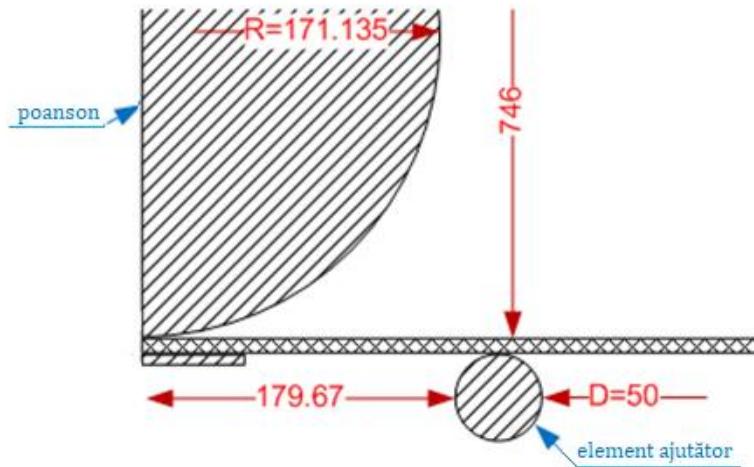
### 3.4 MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE OBȚINERE A FORMEI “U”

Modelarea continuă cu obținerea formei “U”, care este cea de a doua etapă ce presupune deformație plastică la rece. Prințipiu este asemănător cu cel al îndoierii marginii, și anume poansonul este acționat de presă hidraulică și ca rezultat se produce o deplasare pe

direcție verticală. În comparație cu etapa anterioară, în cazul de față se produc deformații pe o lungime și o suprafață mai mare.

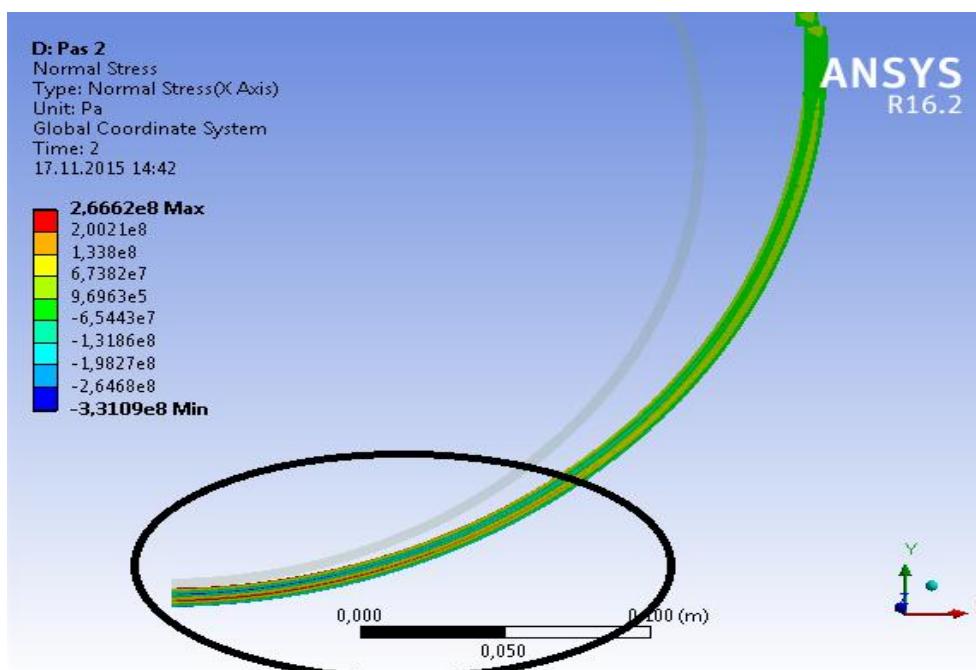
Geometria echipamentului de îndoire este prezentată în figura 3.20. Cuplul de îndoire este compus din poanson, având o rază  $R = 171,135$  mm și un element ajutător, ce îndeplinește rolul placii de bază [16].

Modelarea numerică a acestei etape începe cu starea de tensiune și deformație reziduală a semifabricatului după îndoirea marginilor. Modelarea etapei privind obținerea formei "U", începe de la valorile tensiunilor reziduale rămase după îndoirea marginilor.

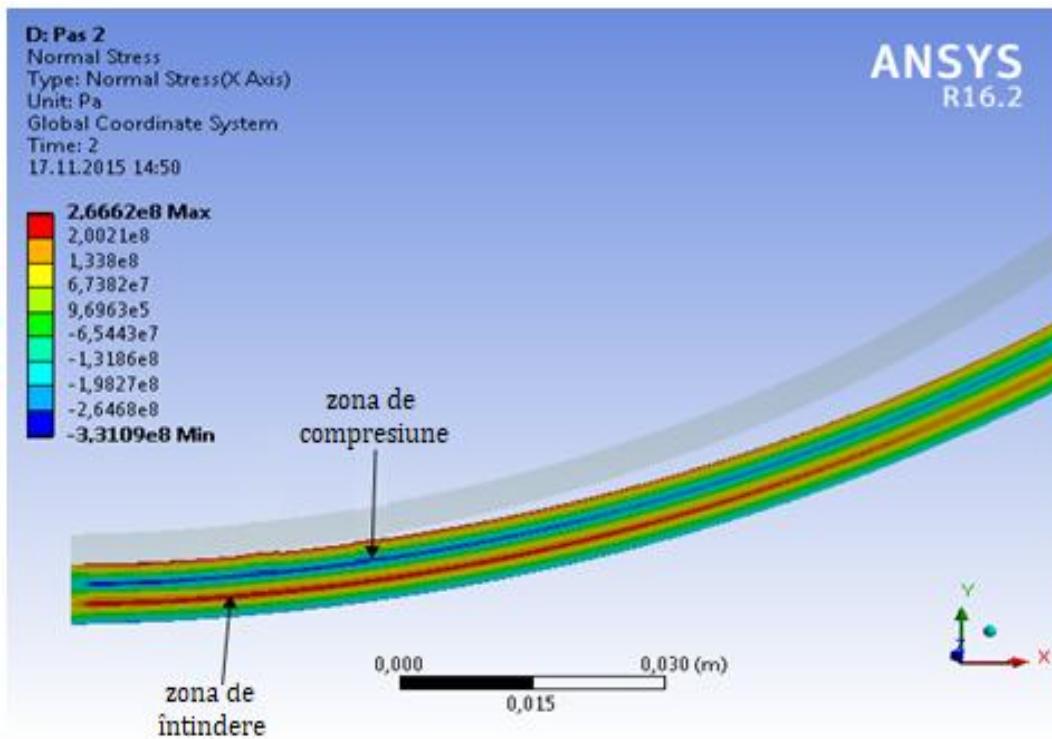


**Fig. 3.20** Reprezentare geometrică a echipamentului de îndoire pentru obținerea formei "U"

În momentul în care table este deformată în forma "U", se observă în figura 3.21 că suprafața deformată este destul de mare. În figura 3.22 este reprezentată zona cea mai solicitată la o scară mai mare. După cum se observă, tensiunile normale  $\sigma_x$  au valori mai mici în comparație cu tensiunile rezultate după îndoirea marginilor, deoarece treptat tensiunile își schimbă orientarea către axa y și solicitarea se produce pe o suprafață mai mare.



**Fig.3.21** Tensiunile normale  $\sigma_x^y$



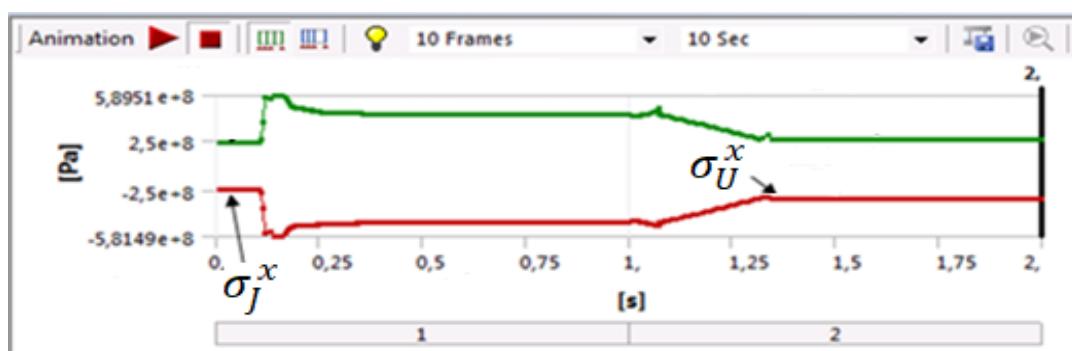
**Fig.3.22** Zona cea mai solicitată în care tensiunile normale  $\sigma_U^x$  ating valorile cele mai mari

În figura 3.23 sunt prezentate atât tensiunile reziduale rămase după îndoirea marginilor cât și cele rămase după obținerea formei "U".

Valoarea tensiunilor reziduale rămase după îndoirea marginii din zona de întindere este de  $\sigma_j^x = 2,3012 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar din zona de compresiune  $\sigma_j^x = -2,4852 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .

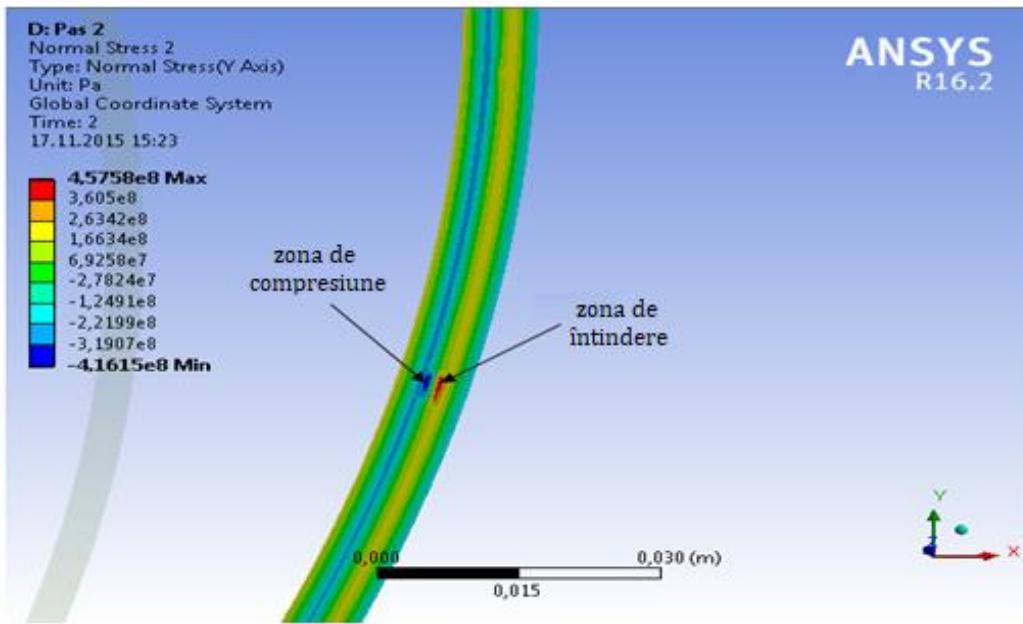
Valoarea tensiunilor reziduale rămase după obținerea formei "U" din zona de întindere este de  $\sigma_U^x = 2,6662 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar din zona de compresiune  $\sigma_U^x = -3,3109 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , dar este un fapt vizibil, care arată că zonele cele mai solicitate se găsesc nu la extremități, ci la o apropiere de fibra medie.

În urma acestei etape tensiunile maxime au avut valori cuprinse între  $5,8951 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și  $-5,8149 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .



**Fig 3.23** Valoarea tensiunilor normale  $\sigma^x$

Valori ceva mai mici sunt pentru  $\sigma_U^y$ . Distribuția acestor tensiuni este mai uniformă cu excepția celor doi concentratori de tensiune în care se găsesc valorile maxime pentru  $\sigma_U^y$



**Fig. 3.24** Tensiunile normale  $\sigma_U^y$

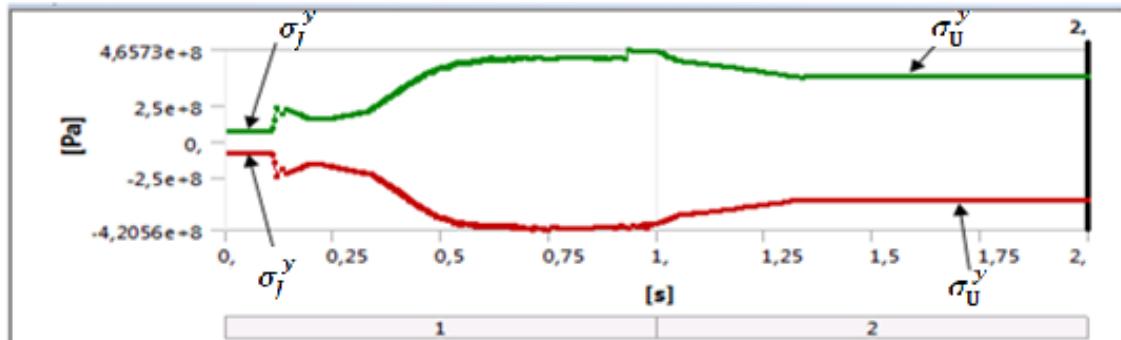
În figura 3.25 sunt prezentate valorile tensiunilor reziduale cât și cele maxime ale tensiunii normale  $\sigma_U^y$ . Valorile tensiunilor reziduale sunt următoarele:

Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei "U" din zona de întindere este  $\sigma_U^y = 0,7458 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei "U" din zona de compresiune este  $\sigma_U^y = -0,7943 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală după obținerea formei "U" din zona de întindere este  $\sigma_U^y = 3,6053 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală după obținerea formei "U" din zona de compresiune este  $\sigma_U^y = -3,1907 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;



**Fig 3.25** Valoarea tensiunilor normale  $\sigma_U^y$

Evoluția tensiunilor normale  $\sigma_U^z$  pe direcția axei z, sunt prezentate în figura 3.26. Ele prezintă o distribuție uniformă. Valorile maxime ale tensiunii  $\sigma_U^z$  sunt cuprinse între valorile 3,8862 e8 Pa și – 3,8724 e8 Pa.

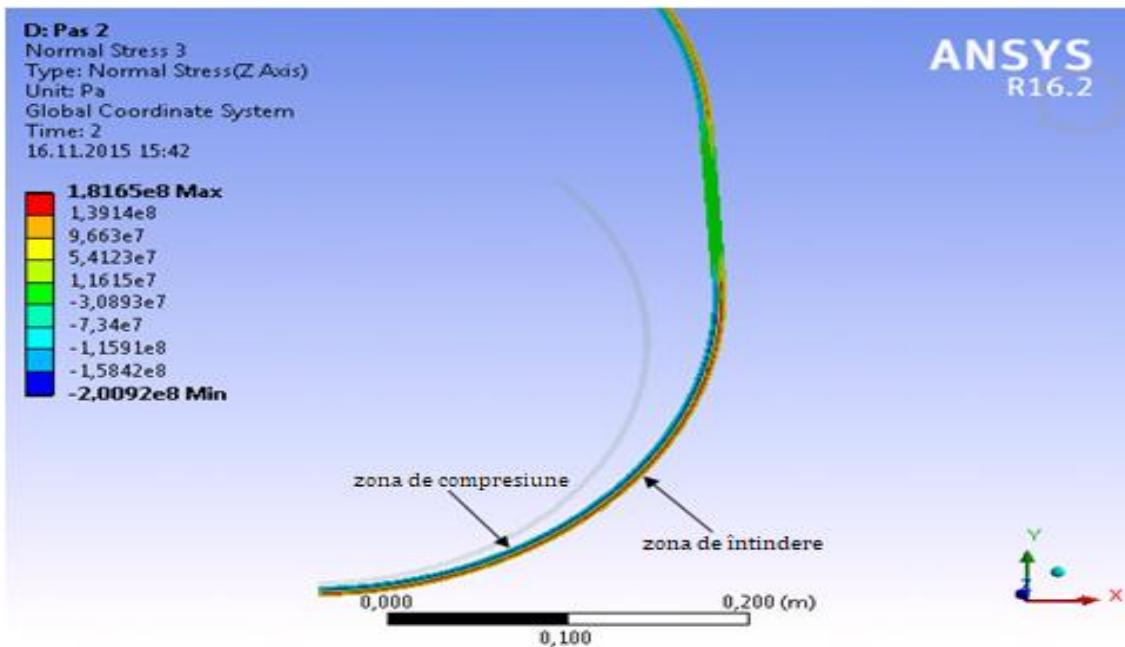


Fig.3.26 Tensiunile normale  $\sigma_U^z$

Trebuie precizat faptul că după obținerea formei „U” tensiunile normale  $\sigma_U^z$  ce au valori maxime sunt prezente prin doi concentratori de tensiune și acestea au valori maxime, în restul materialului valorile tensiunilor normale sunt cuprinse între 9,663 e7 Pa și -1,1591 e7 Pa.

În figura 3.27 este prezentată evoluția tensiunilor normale  $\sigma_U^z$  începând cu etapa îndoirii marginilor până la obținerea formei “U”.

Valorile tensiunilor reziduale sunt următoarele:

Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei „U” din zona de întindere este  $\sigma_U^z = 1,4854 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei „U” din zona de compresiune este  $\sigma_U^z = -1,5842 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală după obținerea formei „U” din zona de întindere este  $\sigma_U^z = 1,8165 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Tensiunea reziduală după obținerea formei „U” din zona de compresiune este  $\sigma_U^z = -1,3914 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .

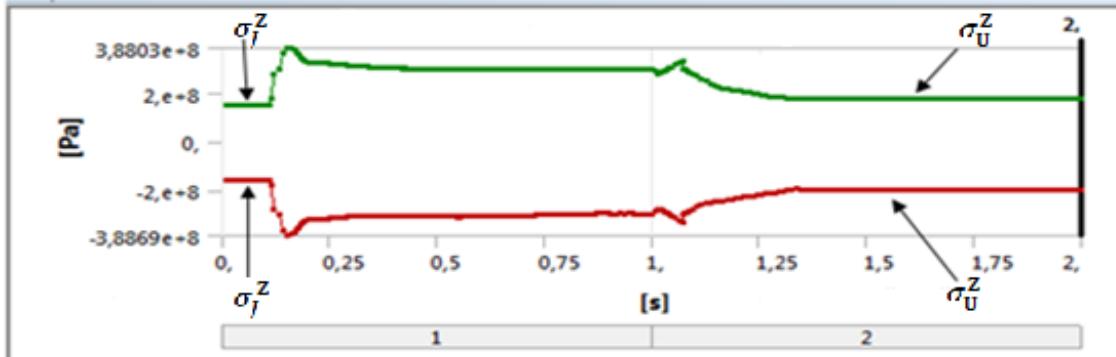
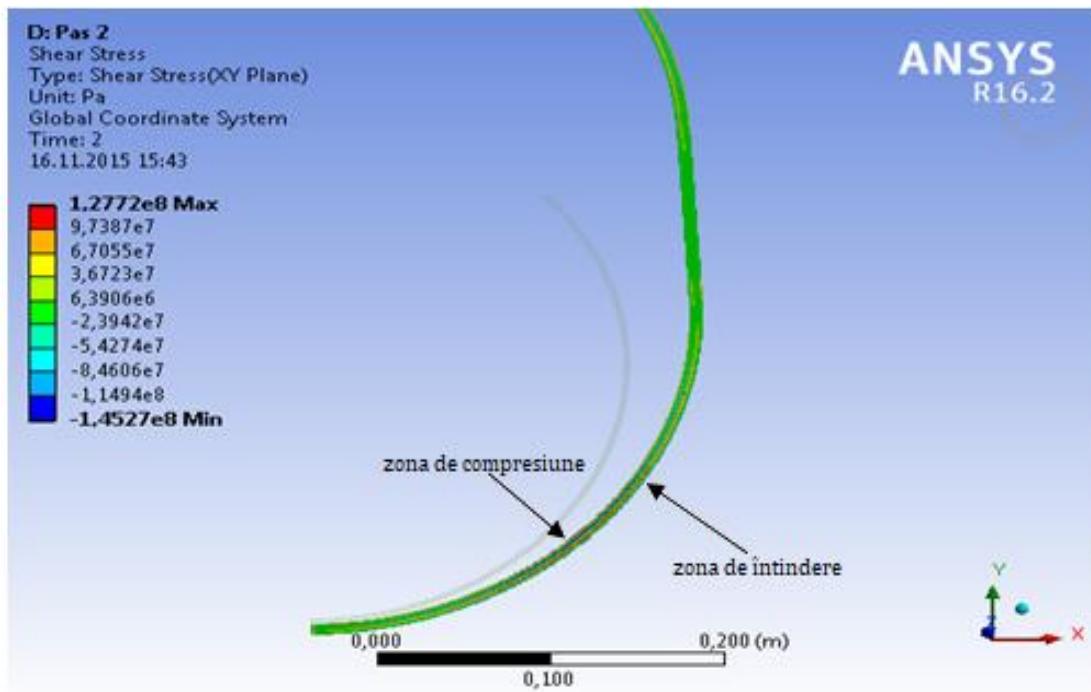


Fig 3.27 Valoarea tensiunilor normale  $\sigma_U^z$

În figura 3.28 este prezentată evoluția tensiunilor tangențiale  $\tau_U^{xy}$  în urma obținerii formei “U”.



**Fig. 3.28** Tensiunile tangențiale  $\tau_U^{xy}$

În figura 3.29 este prezentată evoluția tensiunii  $\tau_U^{xy}$  începând cu etapa îndoierii marginii până la obținerea formei "U".

Valorile tensiunilor tangențiale sunt următoarele:

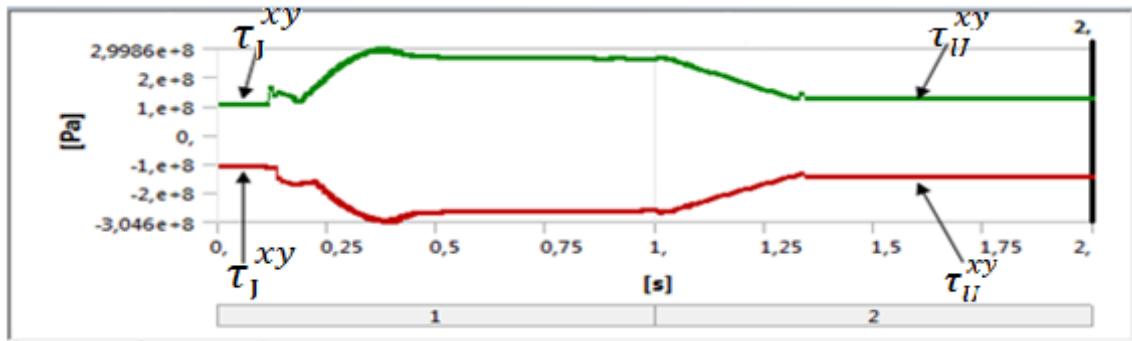
Tensiunea reziduală înaintea deformării din zona de întindere este  $\tau_J^{xy} = 1,0354 \text{ e8 Pa}$ ;

Tensiunea reziduală înaintea deformării din zona de compresiune este  $\tau_J^{xy} = -1,1013 \text{ e8 Pa}$ ;

Tensiunea reziduală după deformare din zona de întindere este  $\tau_U^{xy} = 1,2272 \text{ e8 Pa}$ ;

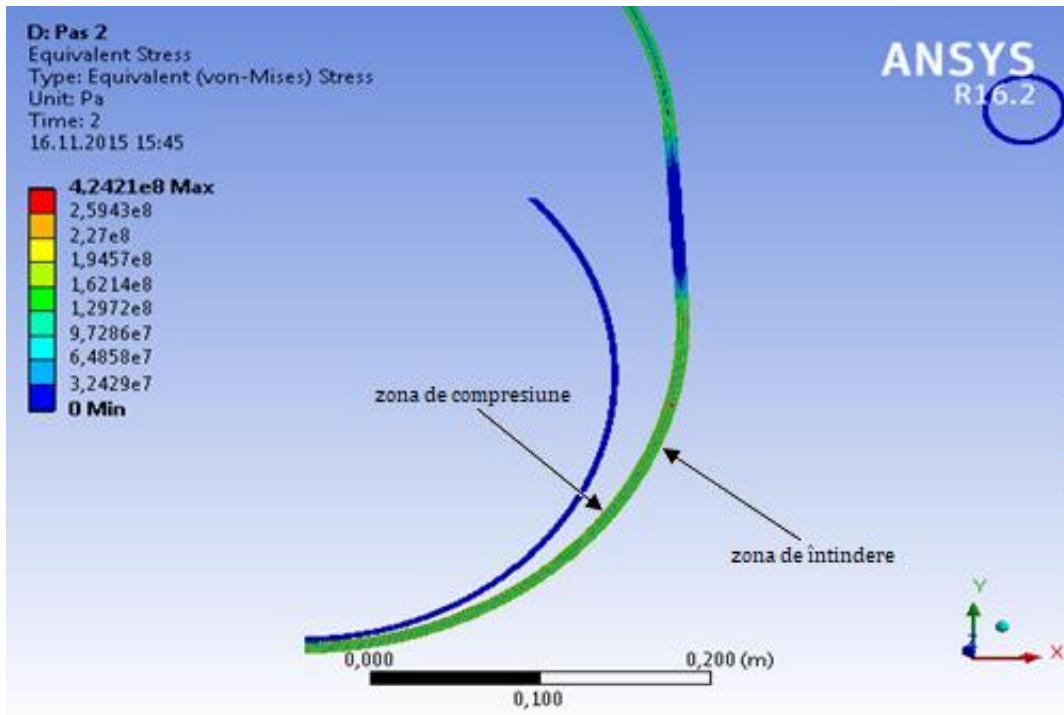
Tensiunea reziduală după deformare din zona de compresiune este  $\tau_U^{xy} = -1,4527 \text{ e8 Pa}$ ;

Evoluția tensiunilor tangențiale  $\tau^{xy}$  este prezentată în figura de mai jos.



**Fig 3.29** Valorile tensiunilor tangențiale  $\tau^{xy}$

Tensiunile echivalente reziduale după obținerea formei „U” sunt prezentate în figura 3.30. De fapt aceste tensiuni arată starea de tensiune a piesei înainte obținerii formei „U” și după.



**Fig. 3.30** Tensiunile echivalente  $\sigma_U^{ech}$

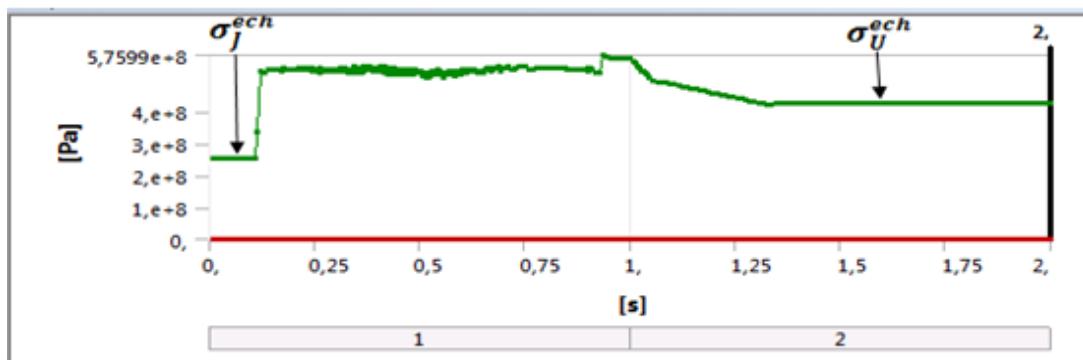
În figura 3.31 se pot vedea clar tensiunile reziduale echivalente înaintea obținerii formei „U” și după.

Valorile tensiunilor sunt următoarele:

Tensiunile reziduale echivalente înaintea obținerii formei “U”  $\sigma_J^{ech} = 2,5854 e8 Pa$ ;

Tensiunile reziduale echivalente după obținerea formei „U” (piesa relaxată)  $\sigma_U^{ech} = 4,2421 e8 Pa$ . Valoarea tensiunilor echivalente  $\sigma_U^{ech} = 4,2421 e8$ , este prezentă în anumite puncte, ce reprezintă erori de discretizare. Valoarea reală a tensiunilor reziduale  $\sigma_J^{ech}$  se situează în intervalul  $2,5943 e8 Pa$  și  $1,6214 e8 Pa$ .

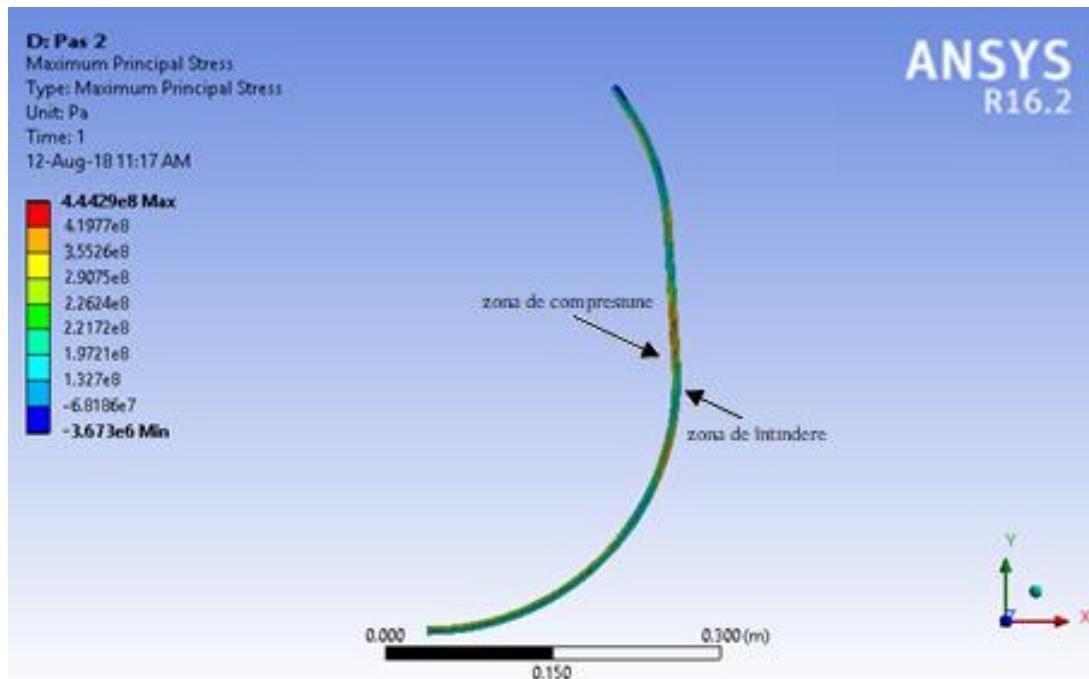
Se observă faptul că piesa după această etapă este destul de tensionată, având în vedere diferența mare între tensiunile reziduale echivalente.



**Fig 3.31** Valoarea tensiunilor echivalente  $\sigma^{ech}$

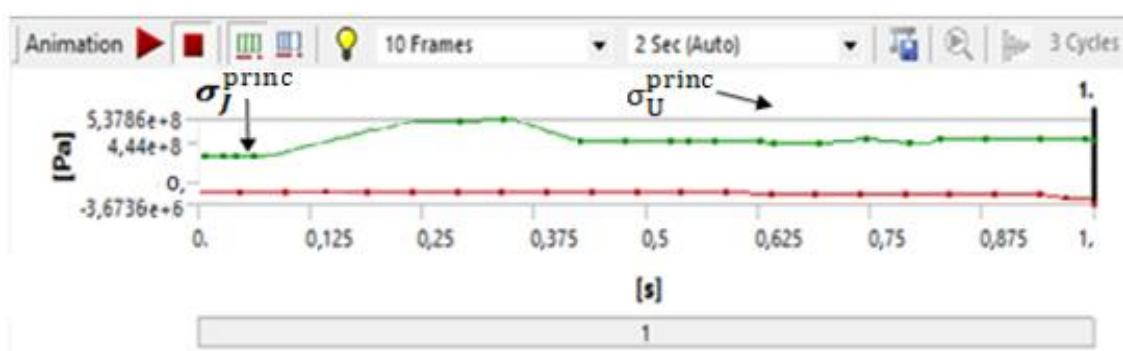
În continuare, în figura 3.32 sunt prezentate tensiunile principale maxime. Se observă faptul că zonele cele mai tensionate sunt acele de trecere din zona curbă în cea plană. Valoarea maximă la care a fost solicitată tabla este de  $5,3786 e8 Pa$ . Valoarea tensiunilor principale reziduale după îndoirea marginilor  $\sigma_J^{princ} = 3,1026 e8 Pa$ , iar valoarea tensiunilor

reziduale după obținerea formei „U” este de  $\sigma_U^{\text{princ}} = 4,4429 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . De fapt această valoare de  $\sigma_U^{\text{princ}} = 4,4429 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , reprezintă acele erori de discretizare. Distribuția valorilor tensiunilor principale se situează în intervalul  $2,9075 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și  $1,9721 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .



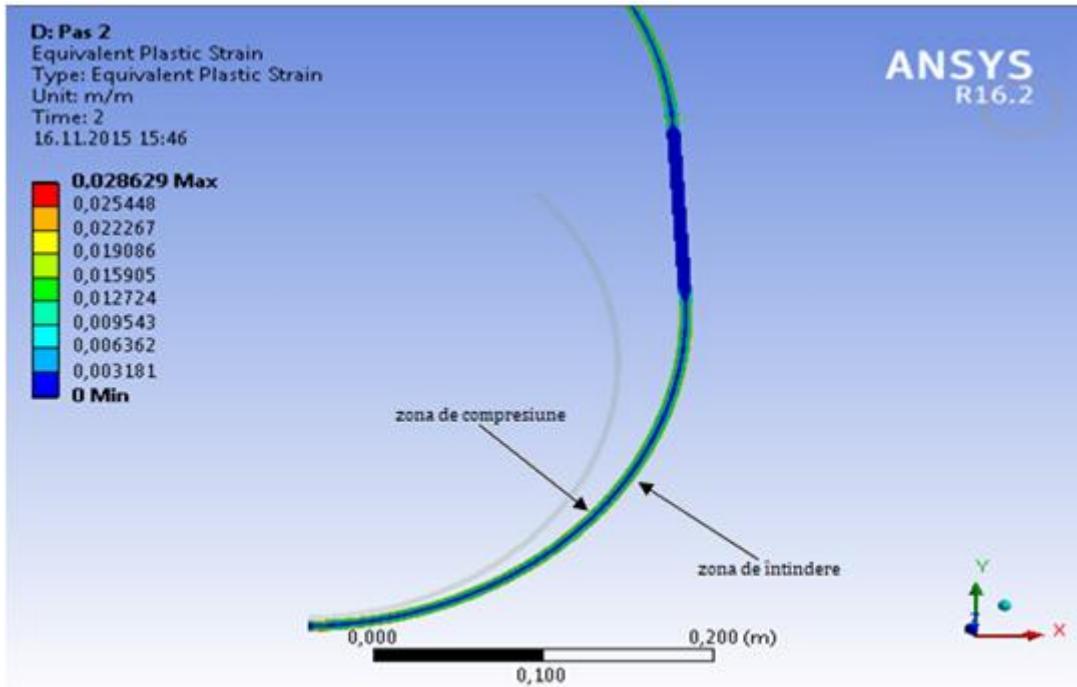
**Fig. 3.32** Distribuția tensiunilor principale  $\sigma_U^{\text{princ}}$  în zona deformată

În figura 3.33 este prezentată evoluția tensiunilor principale în etapa obținerii formei “U”.



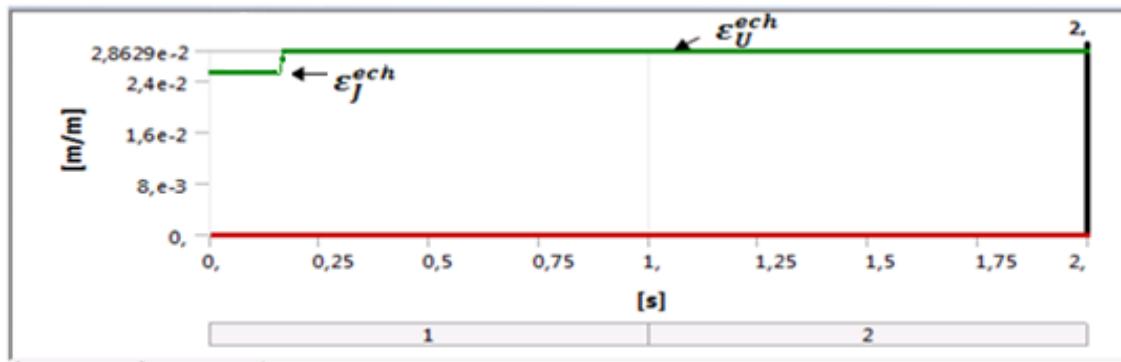
**Fig. 3.33** Evoluția tensiunilor principale  $\sigma_U^{\text{princ}}$  la obținerea formei “U”

Simularea continuă cu prezentarea deformațiilor plastice echivalente  $\varepsilon_U^{\text{ech}}$ .



**Fig. 3.32** Deformațiile plastice  $\varepsilon_U^{ech}$  la acțiunea poansonului

În urma obținerii formei "U", deformațiile echivalente plastice reziduale rămase în urma îndoierii marginilor au o valoare de  $\varepsilon_J^{ech} = 0,025431$  (Fig. 3.32) iar cele rămase în urma obținerii formei "U", au o valoare de  $\varepsilon_U^{ech} = 0,028629$  (Fig. 3.33).



**Fig 3.33** Valoarea deformațiilor plastice  $\varepsilon_{ech}$  la acțiunea poansonului

La final, pe baza deformațiilor echivalente plastice se vor determina deformațiile principale  $\varepsilon_J^{princ}$  și  $\varepsilon_U^{princ}$ . Deformațiile principale  $\varepsilon_J^{princ} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_J^{ech} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,025431 = 0,022$ . Deformațiile principale  $\varepsilon_U^{princ} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_U^{ech} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,028629 = 0,024793$ . Această valoare reprezintă deformațiile plastice principale ce rămân în urma obținerii formei "U".

### 3.5 MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE OBȚINERE A FORMEI "O"

Operațiunea următoare reprezintă momentul în care tabla trece într-o formă circulară cu un grad de ovalitate  $\Delta_0$  destul de ridicat. În realitate echipamentul utilizat este o presă

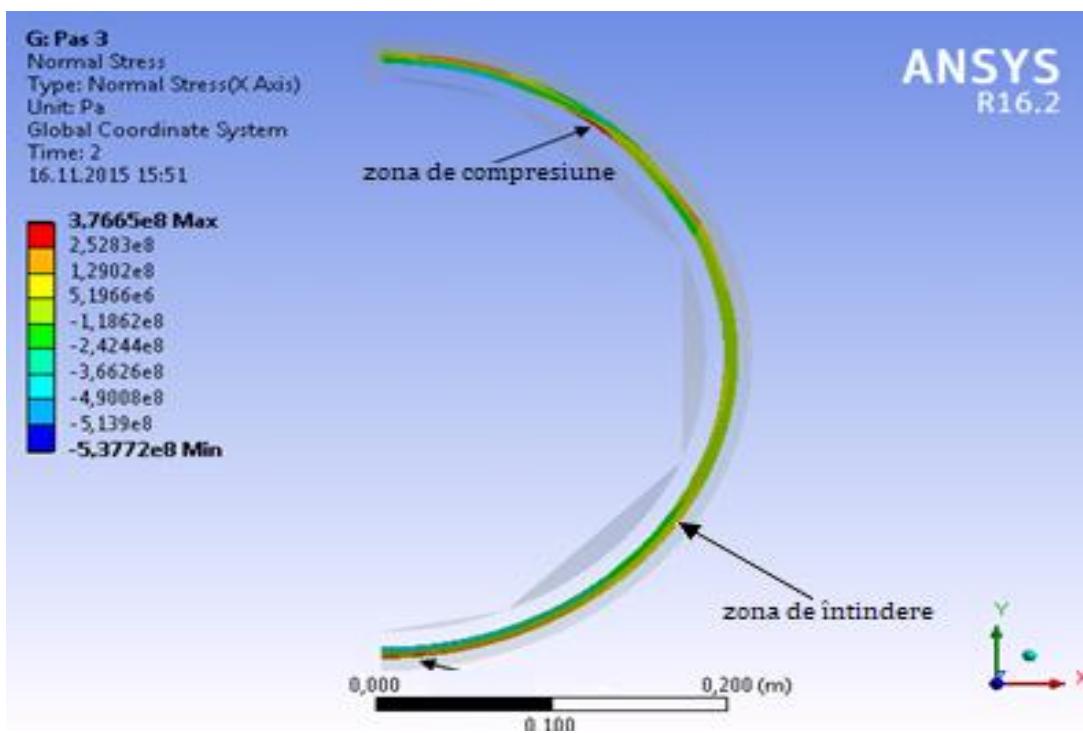
hidraulică, dar pentru modelarea numerică matrița este reprezentată de poanson și de placa de bază (Fig.3.35). Placa de bază este fixă, dar poansonul este un element mobil, ce are o deplasare verticală. Deplasare verticală se efectuează până la momentul în care semifabricatul îndoitează formă circulară.

Se va modela numeric etapa obținerii formei „O” și în același timp în figurile de mai jos se vor prezenta tensiunile și deformațiile reziduale ce au rămas după obținerea formei “U”.



**Fig. 3.35** Reprezentare schematică a matriței “O”

În figura 3.36 este prezentată distribuția și valoarile tensiunilor normale  $\sigma_x$  în momentul acționării presei hidraulice. După cum se observă zonele cele mai tensionate sunt cele ce au fost deformate în etapele anterioare.



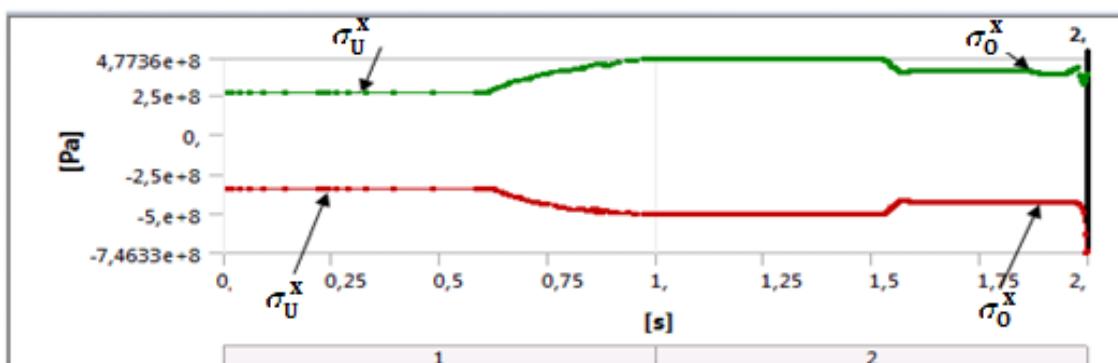
**Fig. 3.36** Distribuția tensiunilor normale  $\sigma_0^x$

Înaintea începerii etapei de obținere formei “O” în figura 3.37 sunt indicate valorile tensiunilor reziduale ale semifabricatului după obținerea formei “U” cu piesa relaxată. În

același timp în figura respectivă sunt indicate și valorile maxime ale tensiunilor din timpul acționării presei. Mai jos sunt prezentate valorile tensiunilor reziduale și ale celor maxime: Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei „O” din zona de întindere este  $\sigma_U^x = 2,6674 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

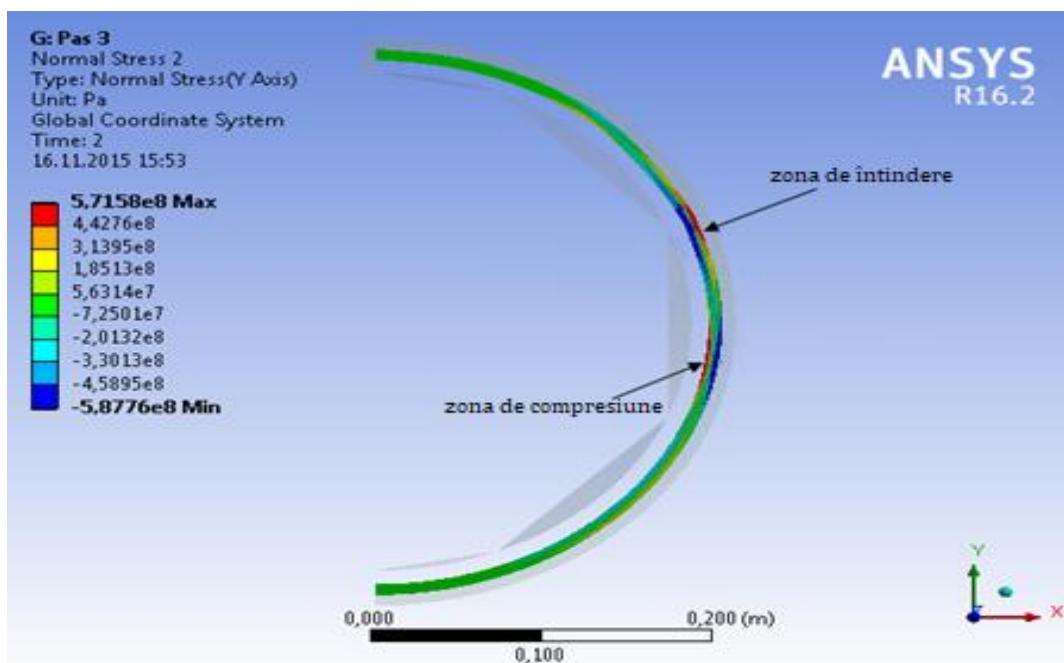
Tensiunea reziduală înaintea obținerii formei „O” din zona de compresiune este  $\sigma_0^x = -3,3152 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;

Valoarea maximă a tensiunii din zona de întindere ce apare pe parcursul procesului de îndoire este  $\sigma_0^x = 3,7632 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar tensiunea maximă din zona de compresiune este  $\sigma_0^x = -5,3742 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;



**Fig 3.37** Valoarea tensiunilor normale  $\sigma^x$

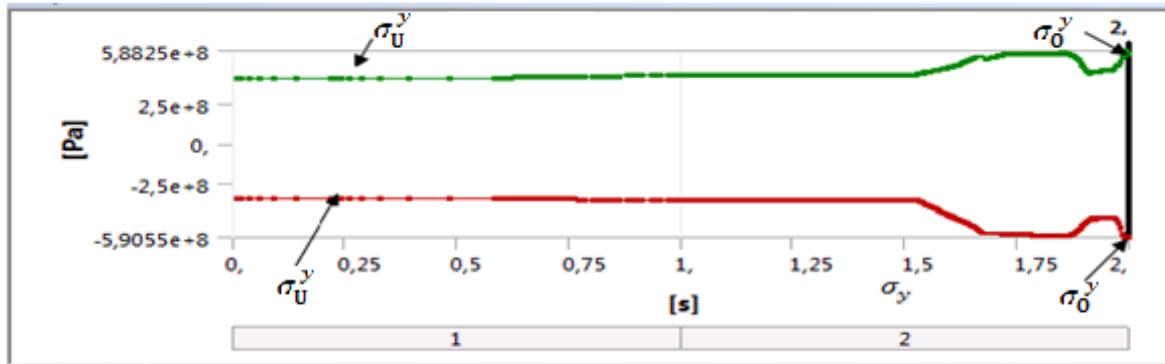
Cum s-a menționat în paragraful precedent, după etapa de îndoire a marginilor, deformațiile principale și-au schimbat orientarea și au început să se producă pe direcția axei y. După cum se observă în figura 3.36, tensiunile normale  $\sigma_y$  ajung la valori mai mari decât tensiunile  $\sigma_x$ , și în același timp au o distribuție neuniformă și chiar prezintă concentrații de tensiuni accentuate.



**Fig. 3.36** Tensiunea normală  $\sigma^y$

La fel cum a fost prezentat mai sus pentru tensiunea normală  $\sigma_x$  în figura 3.37 sunt prezentate valorile tensiunilor reziduale și a celor maxime, și anume:

- tensiunea reziduală înaintea obținerii formei “O” din zona de întindere este  $\sigma_U^y = 3,8052 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea reziduală înaintea obținerii formei “O” din zona de compresiune este  $\sigma_U^y = -3,3564 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea maximă din zona de întindere este  $\sigma_0^y = 5,7158 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea maximă din zona de compresiune este  $\sigma_0^y = -5,8776 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .

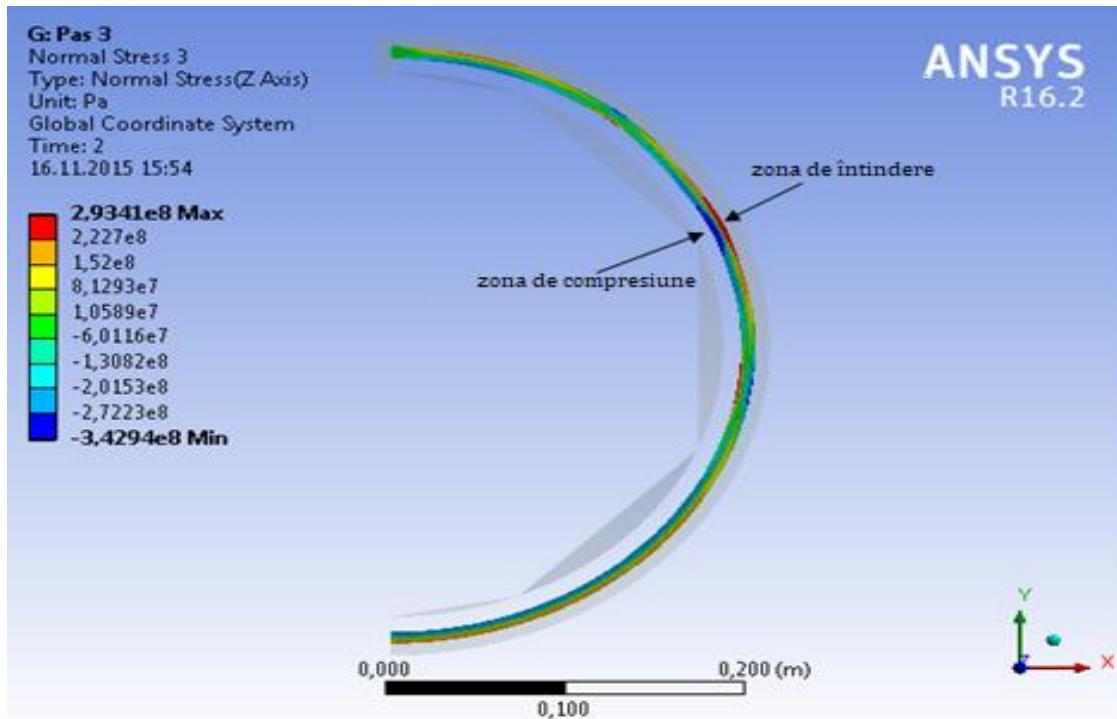


**Fig 3.37** Valoarea tensiunilor normale  $\sigma^U$

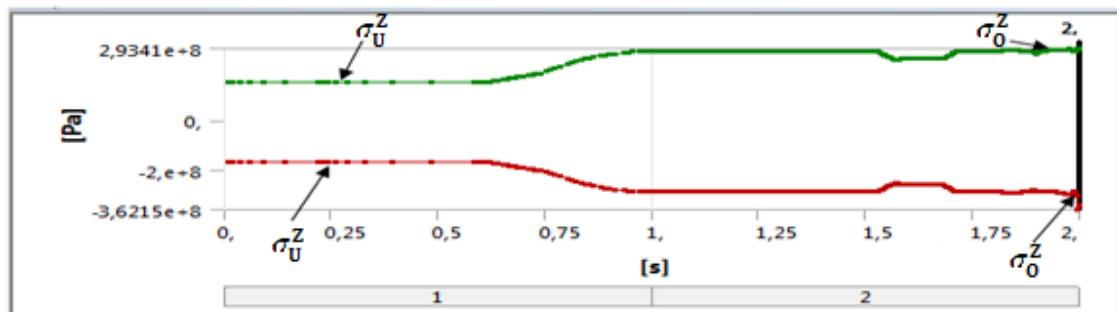
În comparație cu tensiunile normale  $\sigma_0^x$  și  $\sigma_0^y$ , tensiunea normală  $\sigma_0^z$  prezintă valori cele mai mici și acestea sunt cuprinse în intervalul  $1,5005 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și  $-2,0147\text{e}8 \text{ Pa}$ , ceea ce reprezintă valori medii. La fel ca și pentru  $\sigma_0^y$  evoluția tensiunii  $\sigma_0^z$  este prezentată în figura 3.39. Zonele cele mai afectate sunt acele zona în care s-au produs deformații mari din etapele anterioare.

În figura 3.38 sunt trecute valorile tensiunii normale  $\sigma_z$  înaintea deformării și din timpul procesului:

- tensiunea reziduală înaintea obținerii formei “O” din zona de întindere este  $\sigma_U^z = 1,5568 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea reziduală înaintea obținerii formei “O” din zona de compresiune este  $\sigma_U^z = -1,6782 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea maximă din zona de întindere este  $\sigma_0^z = 2,9341 \text{ e}8 \text{ Pa}$ ;
- tensiunea maximă din zona de compresiune este  $\sigma_0^z = -3,4294 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .

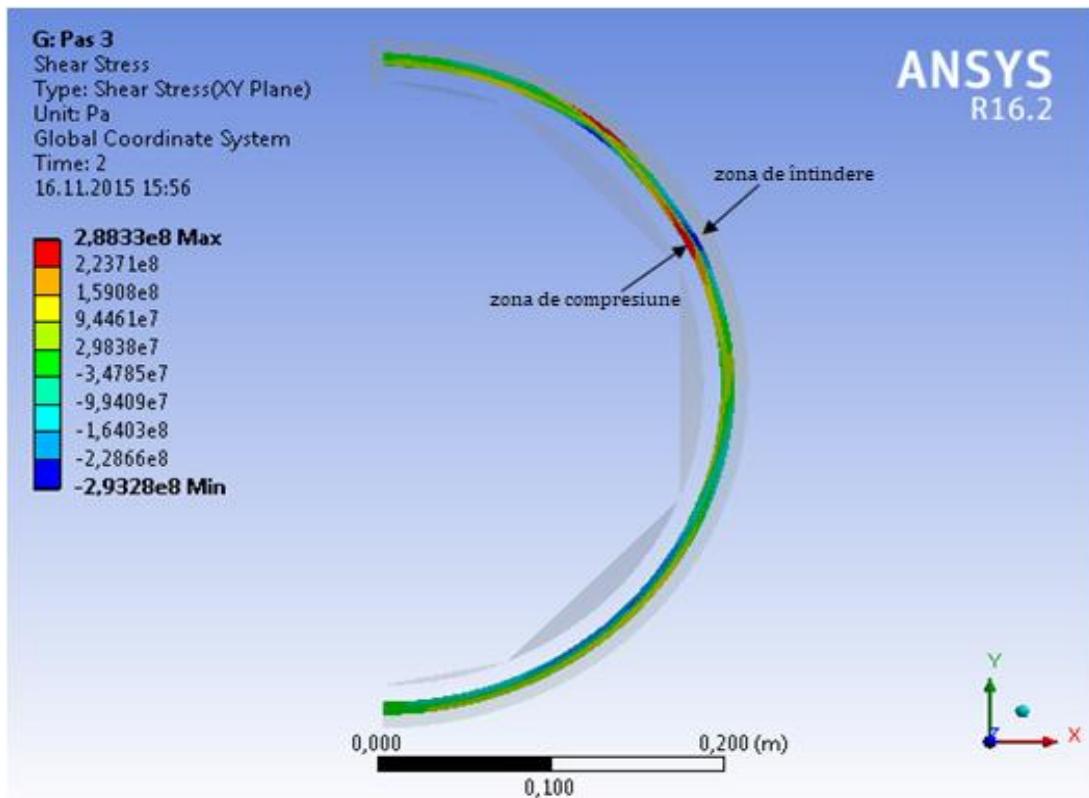


**Fig. 3.38** Tensiunea normală  $\sigma_0^z$



**Fig. 3.39** Valoarea tensiunilor normale  $\sigma_z$

În figura 3.40 este prezentată distribuția tensiunilor tangențiale  $\tau_0^{xy}$ . Distribuția acestor tensiuni prezintă o neuniformitate. Efectuând comparația cu operațiunile anterioare se observă că în urma obținerii formei "O" au apărut zone noi de deformații. În comparație cu tensiunile normale, cele tangențiale au valorile cele mai mici și sunt cuprinse între  $\tau_0^{xy} = 2,8833 \text{ e}8 \text{ Pa}$  pentru zona de întindere și  $-2,9328 \text{ e}8 \text{ Pa}$  pentru zona de compresiune.



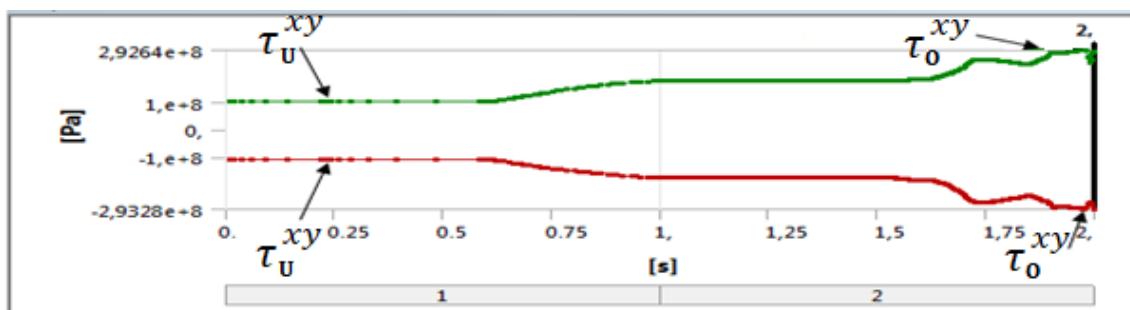
**Fig. 3.40** Tensiunile tangențiale  $\tau_{xy}$

În figura 3.41 sunt prezentate valorile tensiunilor tangențiale  $\tau^{xy}$ . Evoluția tensiunilor  $\tau_{xy}$  începe cu valorile reziduale după ce s-a obținut forma "U", iar apoi sunt prezentate valorile maxime ce apar pe parcursul operațiunii de obținere formei "O". Trebuie menționat că etapa de obținerea formei "O" este ultima etapă în care se produce solicitarea de încovoiere.

Valorile tensiunilor tangențiale sunt următoarele:

- tensiunile reziduale înaintea obținerii formei "O" din zona de întindere este  $\tau_U^{xy} = 1,0852 \text{ e8 Pa}$ ;
- tensiunile reziduale înaintea obținerii formei din zona "O" din zona de compresiune este  $\tau_U^{xy} = -1,1062 \text{ e8 Pa}$ ;
- tensiunile maxime din zona de întindere este  $\tau_O^{xy} = 2,8841 \text{ e8 Pa}$ ;
- tensiunile maxime din zona de compresiune  $\tau_O^{xy} = -2,9382 \text{ e8 Pa}$ .

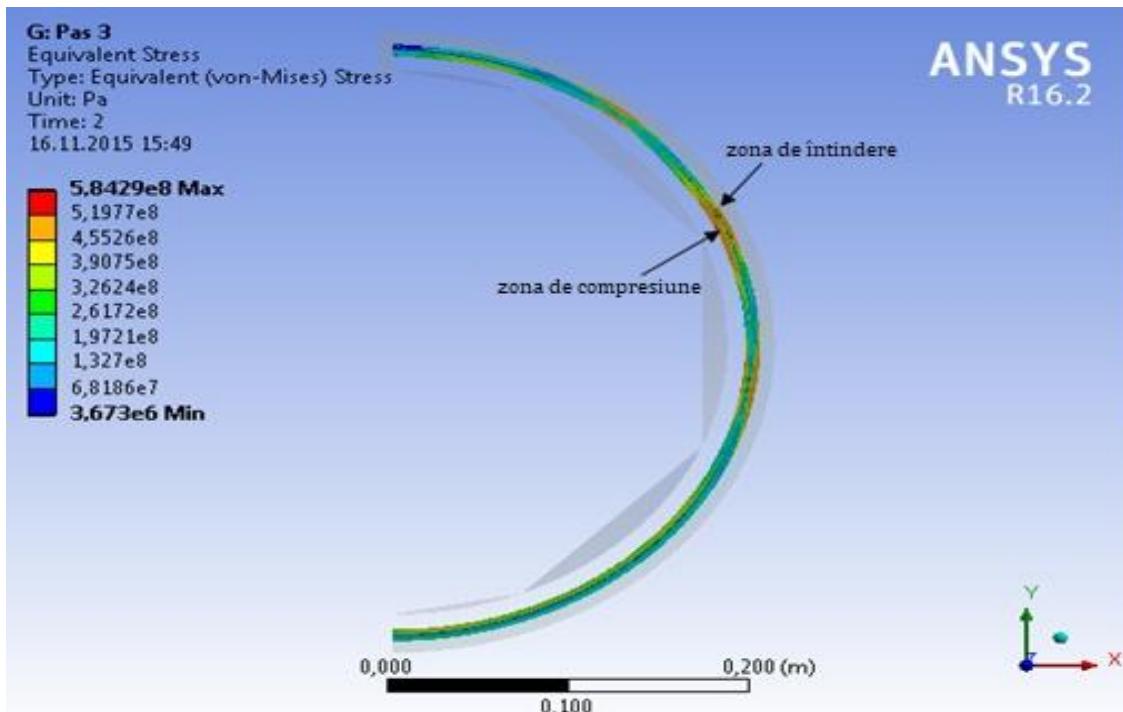
Acstea valori se pot vedea în figura de mai jos.



**Fig. 3.41** Valoarea tensiunilor tangențiale  $\tau^{xy}$

După [4] tensiunea echivalentă exprimă starea de tensiune a semifabricatului și indică cu cât aceasta se apropie de valori admisibile. Tensiunile echivalente prezintă o importanță majoră în studiul tensiunilor reziduale.

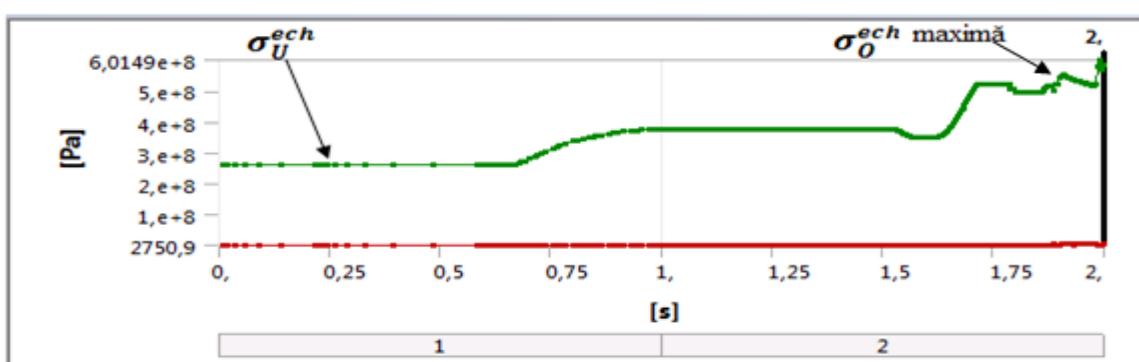
În ultima etapa de îndoire în care se obține forma „O”, semifabricatul apare cu multiple zone deformate. Valorile medii ale tensiunilor echivalente sunt cuprinse între  $\sigma_0^{ech} = 2,615 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și  $4,5572 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar valorile maxime ajung până la valori de  $\sigma_0^{ech} = 5,8441 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . Zonele cu concentrații de tensiune majore sunt acele în care au existat deformații din zonele anterioare.



**Fig. 3.42** Tensiunile normale echivalente  $\sigma_0^{ech}$

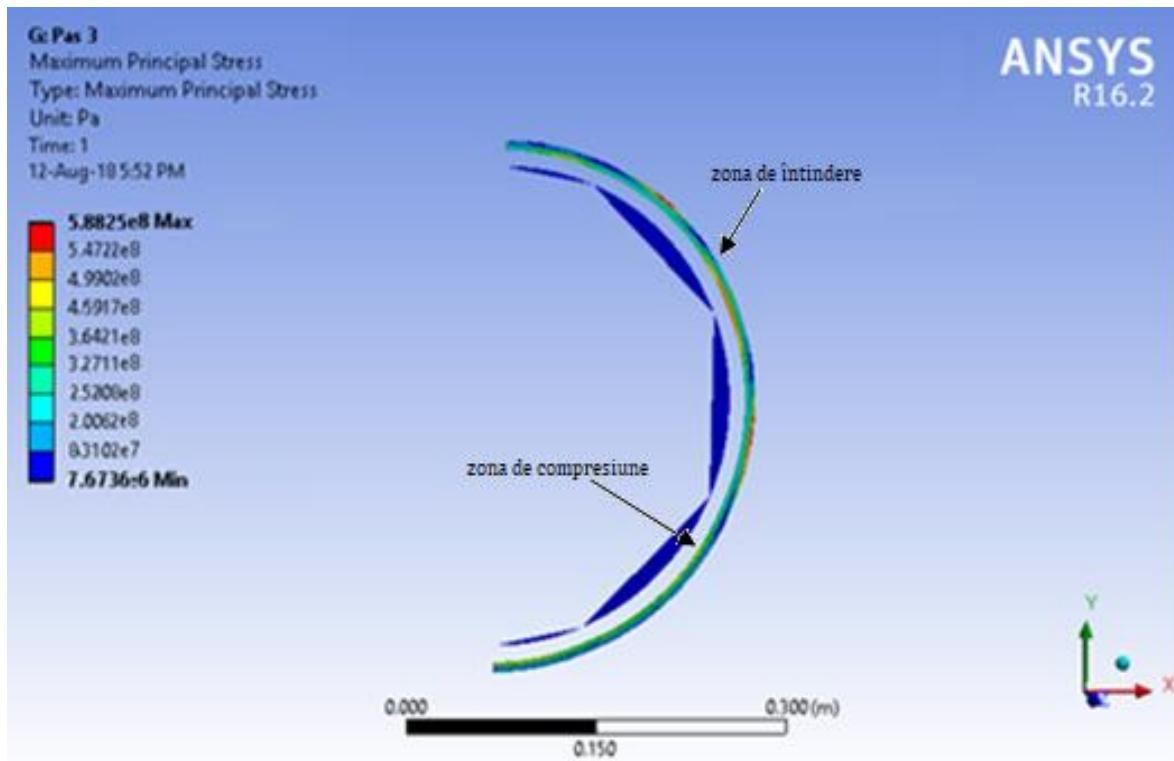
În figura 3.43 sunt prezentate tensiunile reziduale după obținerea formei „U” și valorile maxime a tensiunilor echivalente ce se obțin în urma obținerii formei „O”.

Tensiunile reziduale echivalente ce rămân în urma obținerii formei „U” sunt egale cu  $\sigma_U^{ech} = 2,5964 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . Tensiunile maxime ce apar în momentul în care se obține forma „O” sunt egale cu  $\sigma_0^{ech} = 5,8429 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .



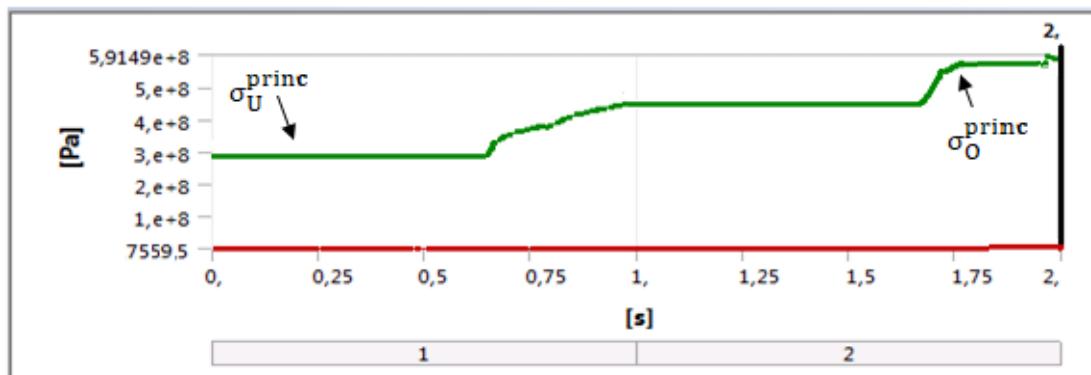
**Fig 3.43** Valorile tensiunilor echivalente  $\sigma_0^{ech}$

În continuare sunt prezentate tensiunile principale maxime.



**Fig. 3.44** Tensiunile principale maxime  $\sigma_0^{\text{princ}}$

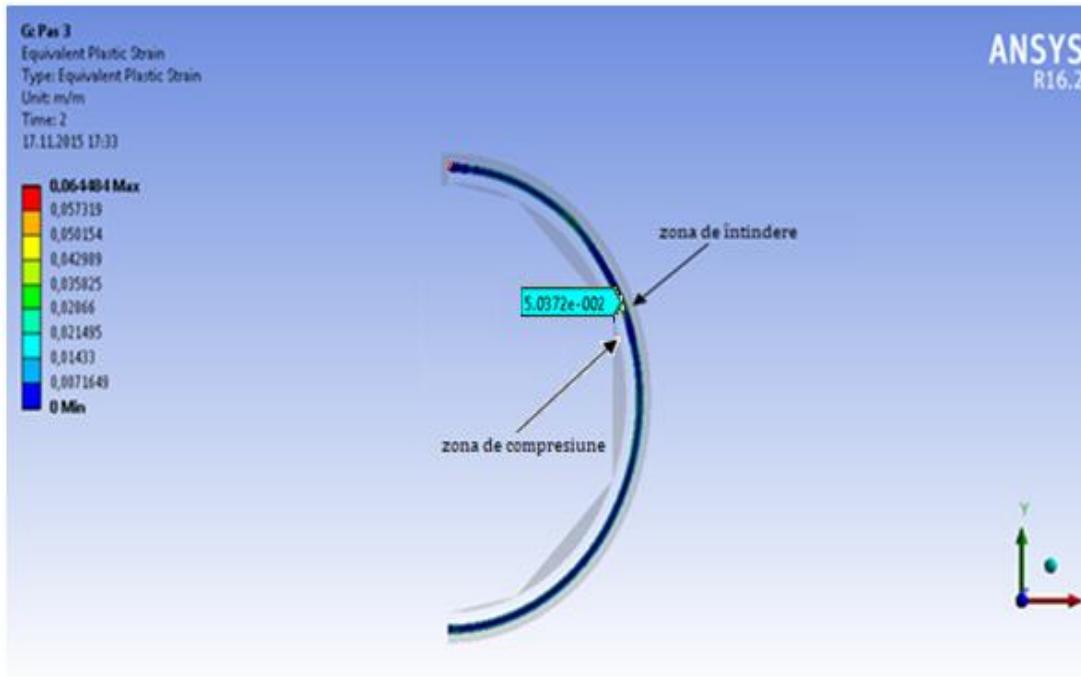
Valoarea tensiunilor principale reziduale obținute în urma obținerii formei "U" au o valoare de  $\sigma_U^{\text{princ}} = 2,9075 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar cele maxime obținute cu mărița închisă au o valoare de  $\sigma_0^{\text{princ}} = 5,8825 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . În continuare, în figura 3.45 este prezentată evoluția tensiunilor principale.



**Fig 3.45** Valorile tensiunilor principale  $\sigma_0^{\text{princ}}$

În figura 3.46 sunt prezentate deformațiile ce au apărut în urma obținerii formei "O".

După cum se vede în figura 3.47 valorile maxime ale deformațiilor plastice echivalente ajung la valori de  $\epsilon_0^{\text{ech}} = 0,039137$ , iar valoarile medii se situează în intervalul 0,01433 și 0,02866.



**Fig. 3.46** Deformațiile plastice echivalente  $\varepsilon_0^{ech}$

Trebuie menționat faptul că, în figura 3.47 sunt prezentate deformațiile reziduale ce au rămas în urma etapei de obținere a formei "U" și cele maxime pe parcursul obținerii formei „O”.

Deformațiile reziduale ce rămân în urma obținerii formei "U" sunt egale cu  $\varepsilon_U^{ech} = 0,028629$ . Deformațiile maxime ce apar în momentul în care se obține forma "O" sunt egale cu  $\varepsilon_0^{ech} = 0,050372$  ( $5,0372 \text{ e-002}$ ).



**Fig 3.47** Valorile deformațiilor plastice echivalente  $\varepsilon_0^{ech}$

Deformațiile principale se vor calcula pe baza celor echivalente după cum urmează: deformațiile principale  $\varepsilon_U^{prin} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_U^{ech} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,028629 = 0,024793$ . Această valoare reprezintă deformațiile plastice principale reziduale ce rămân în urma obținerii formei "U".

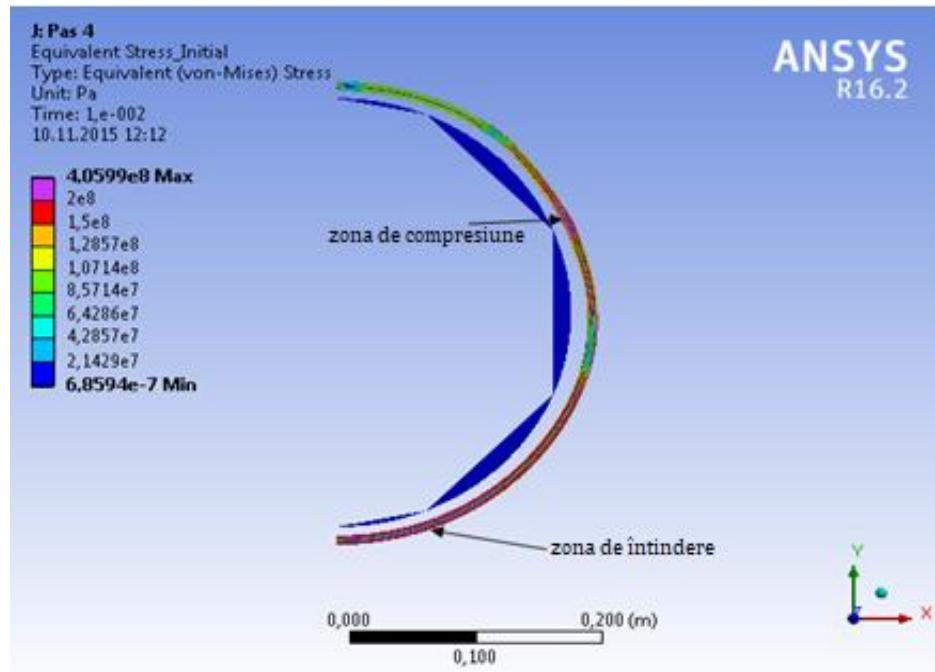
### 3.6 MODELAREA NUMERICĂ A OPERAȚIUNII DE EXPANDARE

Operațiunea de expandare reprezintă o etapă finală, ce are ca scop uniformizarea tensiunilor și calibrarea geometrică a corpului țevii.

În realitate, semifabricatul este acționat de către un expandor hidraulic, ce produce o presiune interioară orientată radial către corpul țevii în aşa fel încât se produce deformația

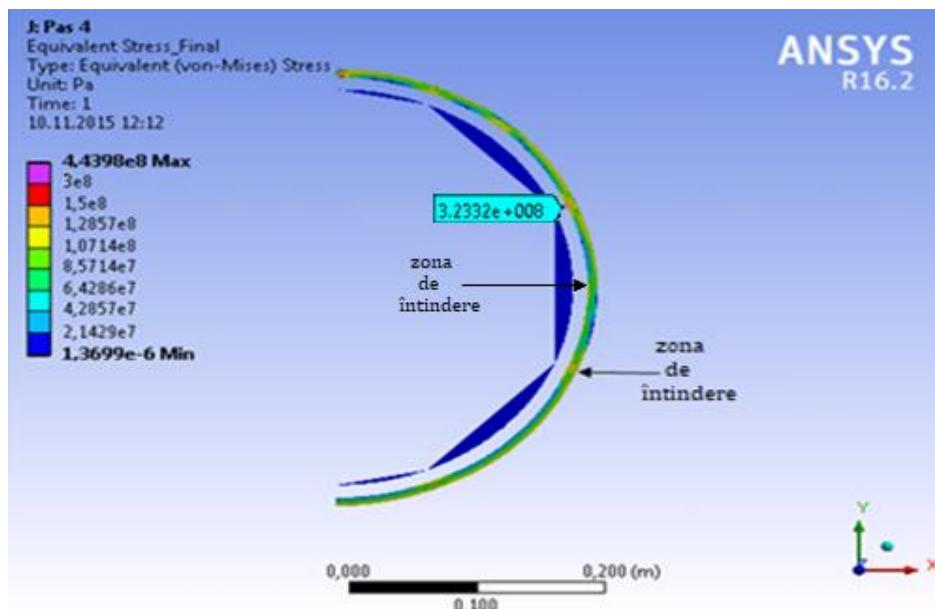
plastică [4]. În ceea ce privește modelarea numerică în corpul țevii se va acționa cu o presiune interioară ce va avea rolul unui expandor mecanic. Având la bază standardele API 5L corpul țevii se va expanda cu 0.8 % (fiind valoarea necesară obținerii dimensiunilor date de producător) [75].

În figura 3.48 este prezentat semifabricatul cu starea de tensiune inițială, adică după etapa obținerii formei „O”, zonele cele mai afectate fiind cele în care s-au produs deformații cele mai mari din etapele anterioare.



**Fig. 3.48** Tensiunile echivalente reziduale  $\sigma_0^{ech}$  după etapa ”O”

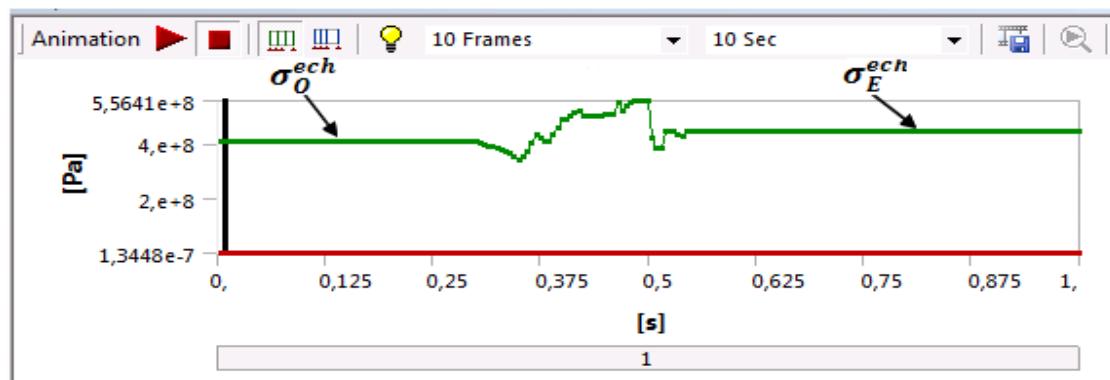
Valorile tensiunii echivalente reziduale după obținerea formei „O” sunt cuprinse între  $\sigma_0^{ech} = 4,0599 \text{ e}8 \text{ Pa}$  pentru zona de întindere și  $\sigma_0^{ech} = -6,8594 \text{ e}7 \text{ Pa}$  pentru zona de compresiune. Aceste valori reprezintă starea de tensiune a semifabricatului înaintea expandării.



**Fig. 3.49** Tensiunile echivalente  $\sigma_E^{ech}$  după operațiune de expandare

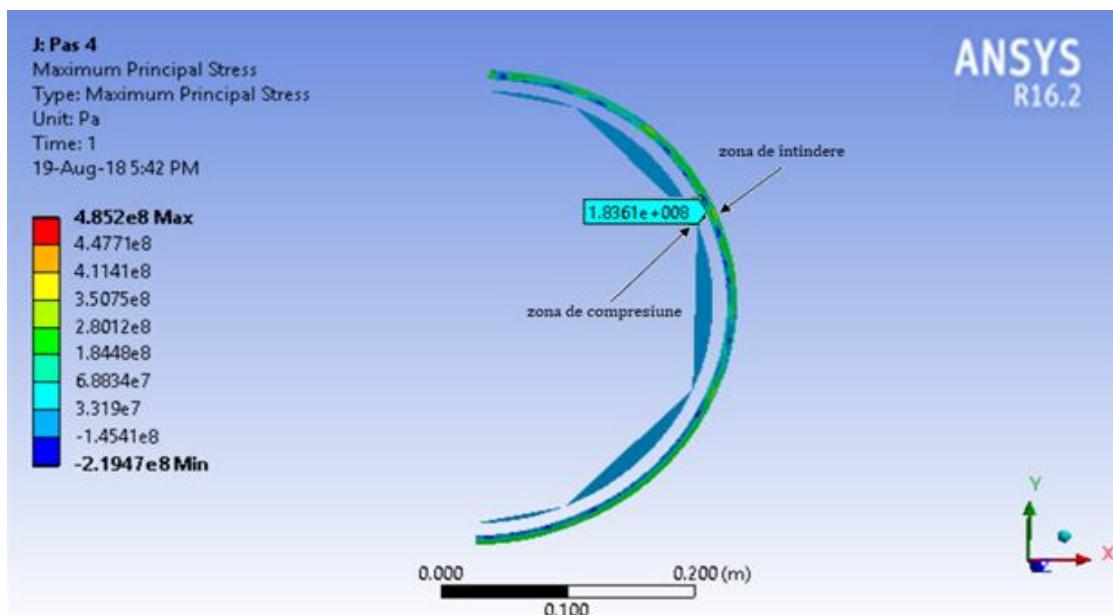
Efectuând operațiunea de expandare, nivelul tensiunilor din corpul țevii scade, aşa cum se observă în figura 3.49. Valorile medii ale tensiunilor reziduale sunt cuprinse între  $\sigma_E^{ech} = 6,4286 \text{ e}7 \text{ Pa}$  și  $1,2857 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .

În figura 3.50 este prezentată evoluția tensiunilor echivalente înaintea expandării și după, chiar dacă valorile sunt puțin mai mari totuși distribuția tensiunilor prezintă o uniformitate. Valorile maxime ale tensiunii echivalente sunt  $\sigma_E^{ech} = 5,5641 \text{ e}8 \text{ Pa}$ , iar valorile tensiunilor înaintea expandării sunt egale cu  $\sigma_0^{ech} = 4,0599 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . După operațiune de expandare în zona cea mai deformată, valoarea tensiunilor reziduale echivalente este  $\sigma_E^{ech} = 3,2332 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .



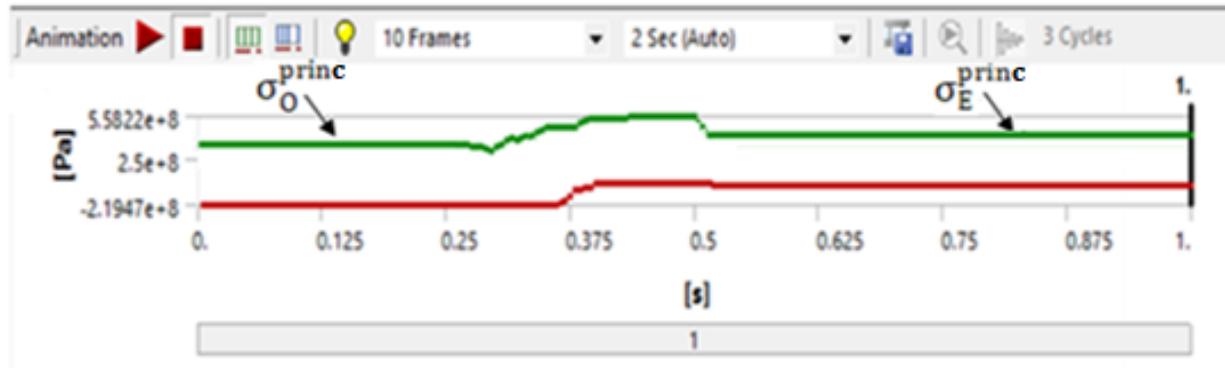
**Fig 3.50** Valorile tensiunilor echivalente reziduală

Studiul continuă cu prezentarea tensiunilor principale  $\sigma_E^{princ}$ . După cum se vede în figura 3.51, distribuția tensiunilor principale maxime prezintă o uniformitate. Valoarea maximă de  $\sigma_E^{princ} = 4,852 \text{ e}8 \text{ Pa}$  reprezintă o eroare de discretizare, iar valoarea tensiunilor reziduale în zona cea mai deformată este de  $\sigma_E^{princ} = 1,8361 \text{ e}8 \text{ Pa}$ . De asemenea conform figurii 3.52, valoarea tensiunilor normale rămase după obținerea formei "O" este de  $\sigma_0^{princ} = 3,8126 \text{ e}8 \text{ Pa}$ .



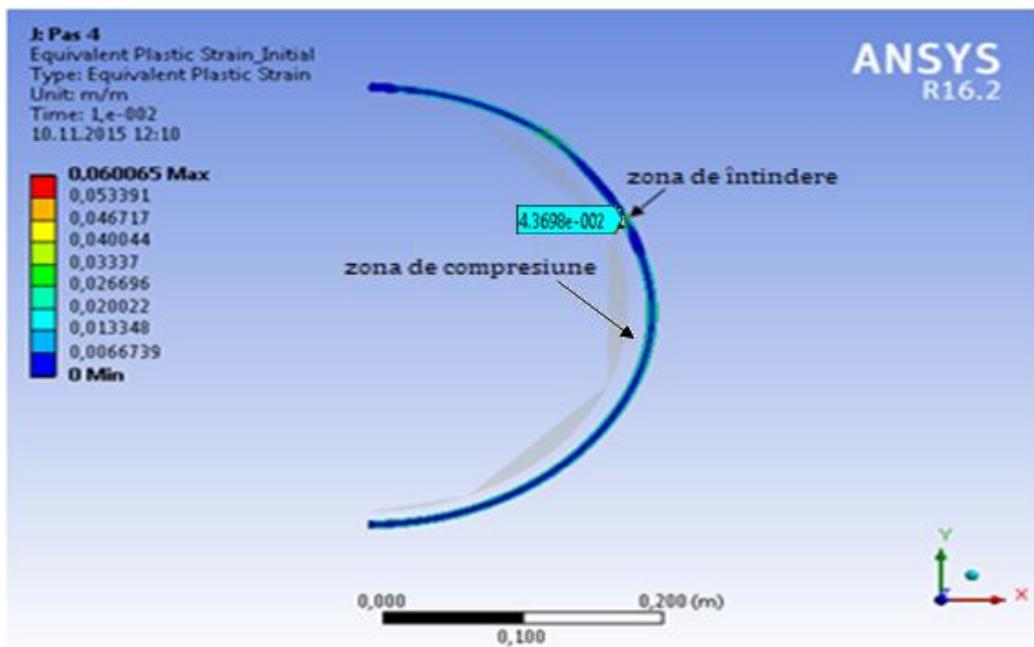
**Fig. 3.51** Tensiunile principale maxime  $\sigma_E^{princ}$

Evoluția tensiunilor principale  $\sigma^{\text{princ}}$  este prezentată mai jos.



**Fig. 3.52** Evoluția tensiunilor principale  $\sigma^{\text{princ}}$  înaintea și după operațiunea de expandare

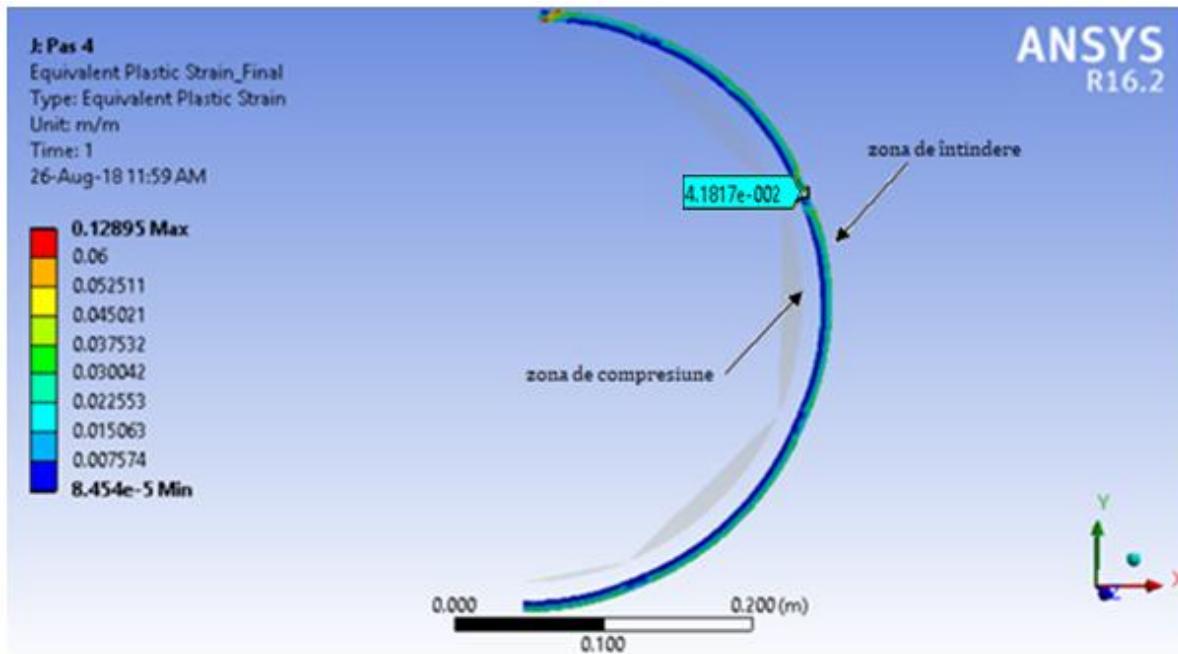
În figura 3.53 sunt prezentate deformațiile plastice dinaintea expandării. Tot aici se văd clar zonele cele mai deformate și afectate de operațiunile anterioare. Valorile medii se situează în intervalul  $\varepsilon_0^{\text{ech}} = 0,020022$  și  $0,026696$ , iar valoarea reziduală maximă a deformației atinge valoarea de  $\varepsilon_0^{\text{ech}} = 0,04369$ . Aceste valori reprezintă deformațiile plastice echivalente reziduale ce au rămas după obținerea formei "O".



**Fig.3.53** Deformațiile echivalente plastice  $\varepsilon_0^{\text{ech}}$  după etapa "O"

Deformațiile principale se vor calcula pe baza celor echivalente după cum urmează: deformațiile principale  $\varepsilon_0^{\text{princ}} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_0^{\text{ech}} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,04369 = 0,0378$ . Această valoare reprezintă deformația plastică principală reziduală ce rămâne în urma obținerii formei "O".

În figura 3.54 este prezentat semifabricatul după operațiunea de expandare. Secțiunea transversală a semifabricatului prezintă variații mici ale deformațiilor.



**Fig. 3.54** Deformațiile echivalente plastice  $\varepsilon_E^{ech}$  după operațiune de expandare

Valorile deformațiilor echivalente plastice sunt cuprinse între  $\varepsilon_E^{ech} = 0,007574$  și  $0,04502$ . Valoarea maximă este de  $\varepsilon_E^{ech} = 0,128925$ , prezentată în figura 3.54 și prezintă erori de discretizare ce nu au importanță în studiu de față. În zona cea mai deformată, deformațiile echivalente plastice au o valoare de  $\varepsilon_E^{ech} = 0,041817$  ( $4,1817 \text{ e-002}$ )

Deformațiile principale se vor calcula pe baza celor echivalente după cum urmează: deformațiile principale  $\varepsilon_E^{princ} = \varepsilon_{T-G} = \frac{\sqrt{3}}{2} \varepsilon_E^{ech} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 0,041817 = 0,0362$ . Această valoare reprezintă deformația plastică principală reziduală ce rămâne în urma operațiunii de expandare.

### 3.7 CONCLUZIILE MODELĂRII NUMERICE

În capitolul 3 ne-am propus să analizăm numeric modelul teoretic studiat în capitolul precedent. Cu ajutorul metodei elementelor finite, folosind programul specializat Ansys R 16.2 am efectuat o modelare numerică a procesului de fabricație a țevilor sudate longitudinal executate din oțel L415 MB.

Modelarea numerică cu ajutorul programul specializat Ansys R 16.2 a scos în evidență următoarele aspecte legate de fiecare etapă în parte:

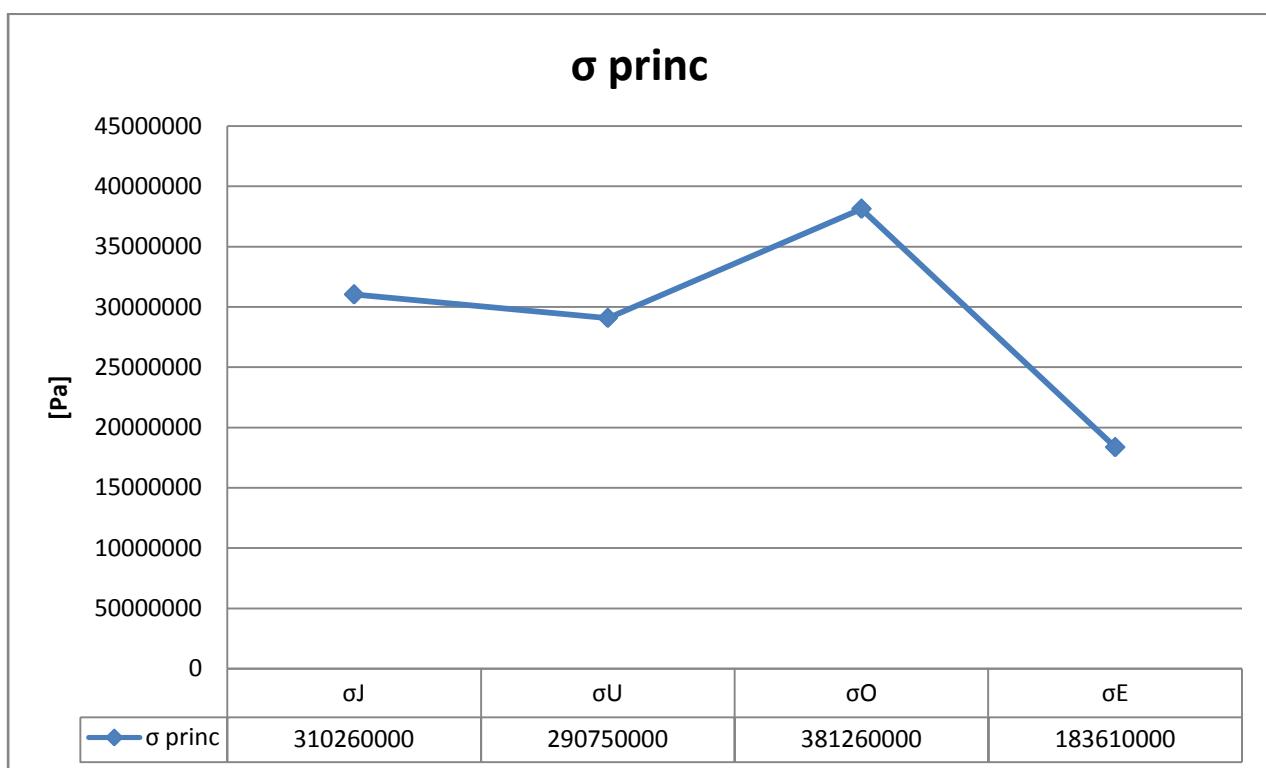
1. Operațiunea de îndoirea al marginilor "J" are un rol esențial pentru cordonul de sudură. Raza la care este îndoită marginea este mai mică față de razele interioare și exterioare ale țevii finale ceea ce, duce la o creștere a stării de tensiune. În urma îndoierii marginilor, deformațiile principale reziduale au avut o valoare de  $\varepsilon_J^{princ} = 0,022$ , iar tensiunile principale reziduale  $\sigma_J^{princ} = 3,1026 \text{ e8Pa}$ ;

2. În etapa de obținerea a formei "U" zonele cele mai solicitate și deformate sunt cele de trecere din forma plană în cea curbă, numai că zonă deformată are o răspândire mai mare. În urma acestei etape deformațiile principale reziduale au avut o valoare de  $\varepsilon_U^{princ} = 0,024793$ , iar tensiunile principale reziduale  $\sigma_U^{princ} = 2,9075 \text{ e8Pa}$ ;

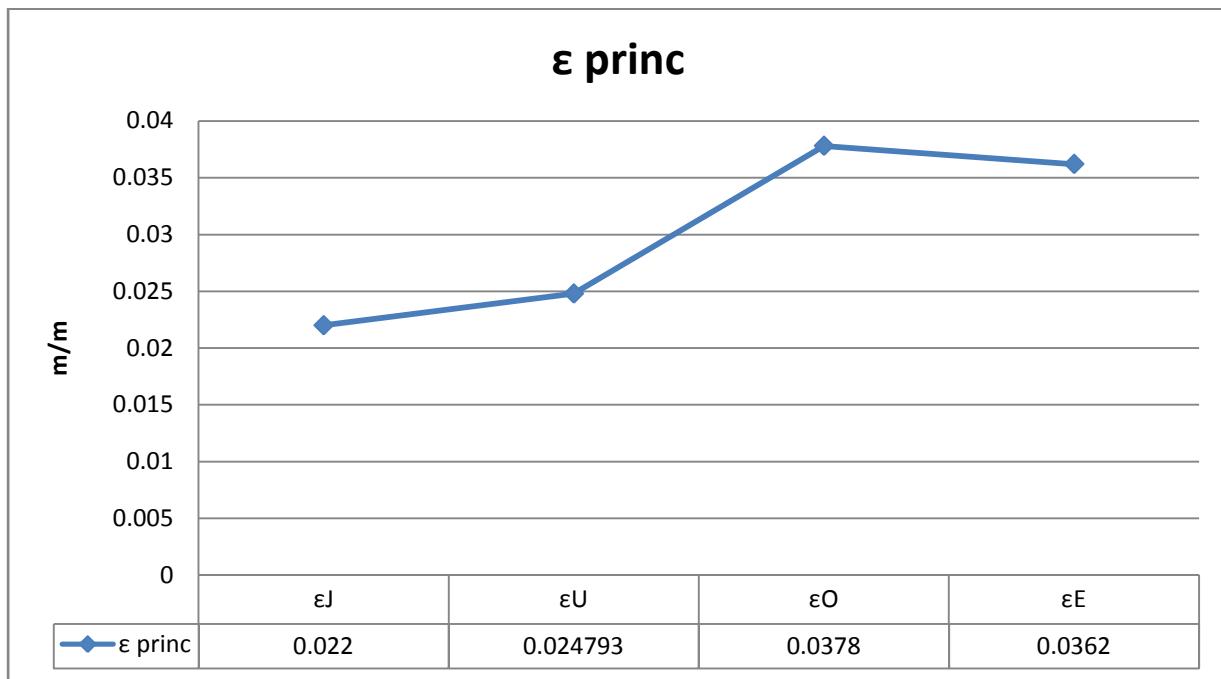
3. În etapa în care semifabricatul ajunge la o formă circulară este cea de obținere formei "O". Pe parcursul etapei de obținere formei "O", semifabricatul prezintă zone cu diferite valori ale deformațiilor dar zona cu valorile ridicate ale deformațiilor a ieșit în evidență. Deformațiile principale reziduale în acestă zonă puternic deformată sunt  $\varepsilon_0^{prin} = 0,0378$ , iar tensiunile principale reziduale au o valoare de  $\sigma_0^{princ} = 3,8126 \text{ e8 Pa}$ ;

4.Ultima etapă, cea de expanadare, este momentul în care piesa în întregime este solicitată în domeniul plastic, dar în același timp se observă o uniformizare al tensiunilor și deformațiilor. Valoarea deformațiilor principale reziduale este  $\varepsilon_E^{princ} = 0,0362$  și tensiunile principale reziduale au o valoare de  $\sigma_E^{princ} = 1,8361 \text{ e8 Pa}$

În continuare în figurele 3.55 și 3.56 sunt prezentate evoluțiile tensiunilor principale reziduale  $\sigma^{princ}$  și deformațiilor principale reziduale  $\varepsilon^{princ}$ .



**Fig 3.55** Evoluția tensiunii principale  $\sigma^{princ}$  pe parcursul modelării numerice



**Fig 3.56** Evoluția deformației principale  $\epsilon^{princ}$  pe parcursul modelării numerice

În urma modelării numerice a procesului de fabricație a țevii sudate longitudinal s-a obținut valoarea tensiunilor reziduale principale  $\sigma_E^{princ} = 1,8361 \text{ e}8 \text{ Pa}$  și valoarea deformațiilor principale de  $\epsilon_E^{princ} = 0,0362$ .

## CAPITOLUL 4

### **STUDIUL EXPERIMENTAL AL TENSIUNILOR REZIDUALE CE APAR ÎN URMA PROCESULUI DE FABRICАȚIE A ȚEVILOR SUDATE LONGITUDINAL**

#### **4.1 CONSIDERAȚII GENERALE**

Etapa ce validează studiile teoretice prezentate în capitolele anterioare este cea experimentală. Studiul experimental este utilizat pentru obținerea unor date precise privind starea de tensiune și deformație din corpul țevii. Evaluarea reală a tensiunilor reziduale necesită o analiză completă a întregului proces tehnologic de fabricație a țevilor sudate longitudinal. În prezent există mai multe metode de determinare a deformațiilor [7], dar pentru efectuarea studiului experimental a fost aleasă metoda optică Corelarea Digitală a Imaginii (CDI). Această metodă oferă o posibilitate de a monitoriza în timp real evoluția procesului de deformație a semifabricatului supus deformării plastice [42].

În acest capitol se va prezenta simularea procesului de fabricație a țevilor sudate longitudinal, dar și etapele proiectării și executării echipamentelor necesare efectuării studiului experimental. Cercetările experimentale se vor efectua pe un inel cu DN 400, grosimea peretelui de 7,8 mm și lungimea de 30 mm din L 415 MB (SR EN ISO 3183:2013) [81].

#### **4.2 PROIECTAREA ECHIPAMENTULUI NECESAR STUDIULUI EXPERIMENTAL**

În vederea realizării studiului experimental vom confecționa o țeavă DN 400 cu grosimea peretelui de 7,8 mm și lungimea de 30 mm. Această țeavă va fi obținută prin metoda JUOE. Semifabricatul îl reprezintă o tablă cu grosimea de 7,8 mm și lățimea de 30 mm. Acest semifabricat va fi supus următoarelor operații de deformare plastică:

1. îndoirea marginilor;
2. obținerea formei „U”
3. obținerea formei „O”;
4. expandarea.

Pentru fiecare dintre aceste etape am proiectat și executat sculele necesare deformării plastice, care fac parte din categoria mătrițelor de îndoitor.

Aceste scule vor fi montate pe o presă hidraulică ZDM 100 [41].

##### **4.2.1 Proiectarea și executarea sculelor pentru îndoirea marginilor**

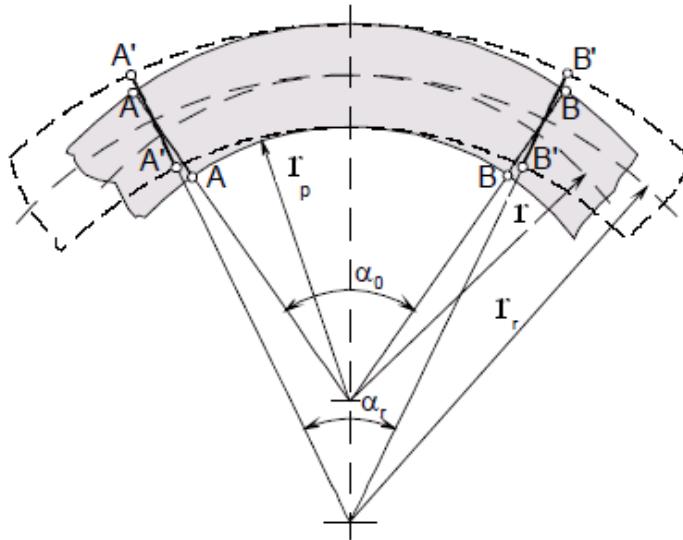
###### *4.2.1.1. Introducere*

Îndoirea marginii pentru fabricarea unei țevi sudate longitudinal reprezintă o etapă inițială. Prin acest pas se obține o formă curbă cu o rază egală cu raza țevii finale. Fără această etapă nu este posibilă executarea corectă a cordonului de sudură.

Proiectarea unui astfel de echipament necesită alegerea materialului dar și calculul razei de îndoire, ce are în vedere arcuirea materialului.

#### 4.2.1.2. Calculul razei de îndoire pentru poanson

De obicei, arcuirea elastică se exprimă în unități de măsurare unghiulară și constituie valoarea cu care trebuie micșorat unghiul de îndoire pentru a obține unghiul necesar la semifabricatul încovoiat [34].



**Fig.4.1** Reprezentarea fenomenului de arcuire

După cum este prezentat în figura 4.1, se consideră că asupra piesei îndoite se aplică un moment încovoietor fictiv, acționând în sens invers celui care a produs deformarea (care de fapt este chiar cel care este produs de tensiunile ce determină deformarea elastică), și care modifică raza de curbură a stratului neutru la valoarea  $r_f > r$ . La sfârșitul operației de îndoire, raza de curbură a stratului neutru este  $r$ . Din această suprapunere va rezulta o deformare reziduală corespunzătoare razei de curbură  $r_r > r$ . Aceleasi aspecte sunt valabile și pentru unghiul dintre două secțiuni plane, normale pe fibra medie ( $AA \rightarrow A'A'$ ,  $BB \rightarrow B'B'$ ), adică  $a_r > a_0$  [15].

Intre cele trei raze de curbură există relația:

$$\frac{1}{r_r} = \frac{1}{r} - \frac{1}{r_f} \quad (4.1)$$

Considerând că raza de curbură  $r$  este impusă de raza poansonului  $r_p$  deci:

$$r = r_p + \frac{s}{2} \quad (4.2)$$

raza de curbură fictivă  $r_f$  va fi determinată de momentul încovoietor fictiv care produce numai deformarea elastică, adică:

$$\frac{1}{r_f} = \frac{M_{xf}}{EI_y} \quad (4.3)$$

unde  $M_{xf}$  este momentul încovoietor fictiv, considerat egal cu momentul forțelor de deformare ( $M_{xf} = M$ ), și  $I_y$  - momentul de inerție al secțiunii semifabricatului, în cazul de față  $I_y = \frac{bh^3}{12}$ .

Inlocuind (4.3) în (4.1) se obține:

$$\frac{1}{r_r} = \frac{1}{r} - \frac{M_x}{EI_y} \quad (4.4)$$

Din care rezultă:

$$r_r = \frac{r}{1 - \frac{M_x r}{EI_y}} \quad (4.5)$$

Condiția ca stratul neutru să aibă aceeași lungime înainte și după îndoire poate fi exprimată în forma:

$$r\alpha_0 = r_r\alpha_r \quad (4.6)$$

iar unghiul de revenire (arcuire) elastică este:

$$\Delta\alpha = \alpha_0 - \alpha_r \quad (4.7)$$

Coroborând relațiile (4.5) și (4.7), acest unghi de revenire devine:

$$\Delta\alpha = \alpha_0 \left(1 - \frac{r}{r_r}\right) = \alpha_0 \frac{M_x r}{EI_y} \quad (4.8)$$

Tinând seama de expresia momentului încovoiector care realizează deformarea plastică la îndoire, relația (4.8) capătă forma:

$$\Delta\alpha = 3\alpha_0 \frac{r}{h} * \frac{\sigma_c}{E} \quad (4.9)$$

Pe de altă parte, relația (4.5) poate fi scrisă și sub forma:

$$r_r = \frac{r}{1 - 3\frac{r}{h} * \frac{\sigma_c}{E}} \quad (4.10)$$

din care se poate determina raza poansonului  $r_p = r$  pentru care să se obțină la piesa îndoită, după arcuire, o anumită rază  $r$  dată:

$$r_p = \frac{r}{1 - 3\frac{r}{h} * \frac{\sigma_c}{E}} \quad (4.11)$$

unde:

$r_p$  = raza poansonului, [mm];

$h$  = grosimea tablei, [mm];

$r$  = raza dorită, [mm];

$\sigma_c$  = limita de curgere, [MPa];

$E$  = modulul de elasticitate longitudinal, [MPa].

Întroducând relațiile în (4.11) obținem:

$$r_p = \frac{199}{1 - 3\frac{199}{7,8} * \frac{478}{2,18 * 10^5}} = 170,4 \text{ mm} \quad (4.12)$$

Determinarea razei poansonului este importantă pe parcursul întregului proces de fabricație a țevilor pentru construcția conductelor magistrale. Pentru a avea certitudinea corectitudinii calculelor razei poansonului, s-a mai efectuat un calcul analitic cu ajutorul formulei deduse de către Rudman L., cercetător în domeniul proiectării utilajelor de ștanțare [57].

Înainte de toate se calculează coeficientul -  $K_p$  ce caracterizează materialul și este determinat experimental [57]:

$$K_p = 0,375 \cdot \frac{\sigma_c}{E} \cdot 10^4 = 8,22 \quad (4.13)$$

Calculul razei poansonului se efectuează după următoare formulă:

$$r_p = \frac{h}{\frac{h}{r} + 8K_p * 10^{-4}} = 171 \text{ mm} \quad (4.14)$$

unde:

$r_p$  = raza poansonului, [mm];

$h$  = grosimea tablei, [mm];

$r$  = raza dorită, [mm];

$K_p$  = coeficientul, ce caracterizează proprietățile materialului ștanțat.

Diferența valorilor obținute prin cele două metode este 0,35%. Având în vedere această diferență atât de mică, în ceea ce urmează voi folosi raza poansonului calculată după Rudman L.

#### 4.2.1.3 Confecționarea matriței pentru îndoirea marginii

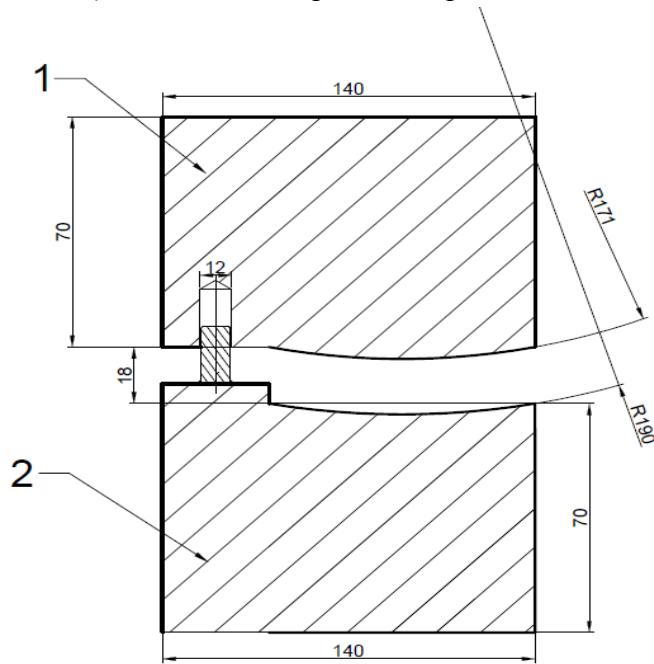
Este de menționat faptul că toate echipamentele ce participă în procesul de fabricație a țevilor sudate longitudinal, au la bază echipamentele reale. Pentru proiectarea mașinii de îndoire a marginii, s-a ales o presă hidraulică pentru îndoierea marginii aparținând companiei Siempelkamp (Figura 4.2) [85].



**Fig. 4.2** Presa pentru îndoirea marginii Siempelkamp

*Elaborarea desenului tehnic.* Executarea desenului este efectuată cu programul specializat AutoCAD 2013 versiunea student [71], [74]. În continuare, având la baza raza de

îndoiere calculată și dimensiunile tablei ce va fi spusă la îndoire, în figura 4.3 este prezentat desenul tehnic mașinii cu acționare mecanică, proiectate pentru îndoirea marginii.

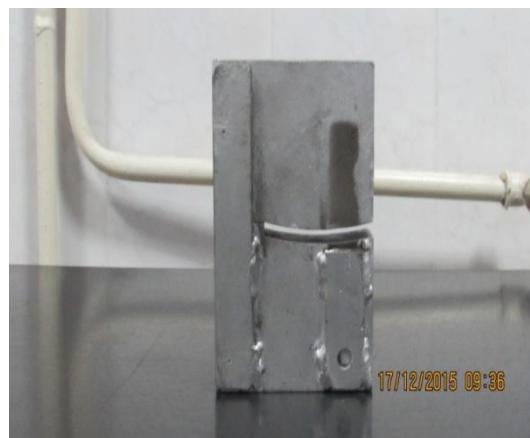


**Fig.4.3** Matriță pentru îndoirea marginilor  
1-poansonul; 2- placă de bază

*Alegerea materialului.* Materialul necesar executării poansonului și matriței este prelevat dintr-o tablă de oțel naval de rezistență mărită de marcă A36 (STAS 8324-86) [53]. Matrița și poansonul se confectionează din materiale cu duritate mai mare decât a semifabricatului ce urmează a fi prelucrat și în mod obligatoriu se tratează termic și se prelucrează. Prin tratamentul termic, crește duritatea și rezistența la uzură a poansonului și a matriței cu grosimea  $h = 30$ .

*Realizarea matriței.* Un element important îl reprezintă executarea exactă a razei poansonului și a plăcii de bază. Pentru această s-a ales procedeul de tăiere cu jet de apă, care oferă precizie, calitate. Tăierea este executată cu mașina de debitat cu jet de apă MAXIEM 1530 WATERJET [83].

În final s-a obținut matrița de îndoire a marginilor prezentată în figura 4.4 .



**Fig.4.4** Matriță pentru îndoirea marginilor realizată fizic în vederea studiului experimental

#### **4.2.2 Proiectarea și executarea sculelor pentru obținerea formei „U”**

După îndoirea marginilor, urmează etapa în care se obține forma „U”. La fel ca și la matrița de îndoire a marginilor, pentru obținerea formei „U” se utilizează o matriță de îndoit cu care se va echipa o presă hidraulică. În figura 4.5 este prezentată presa pentru îndoirea tablei în forma „U” de la uzina „EuroPipe”, Mülheim an der Ruhr, Germania [77].



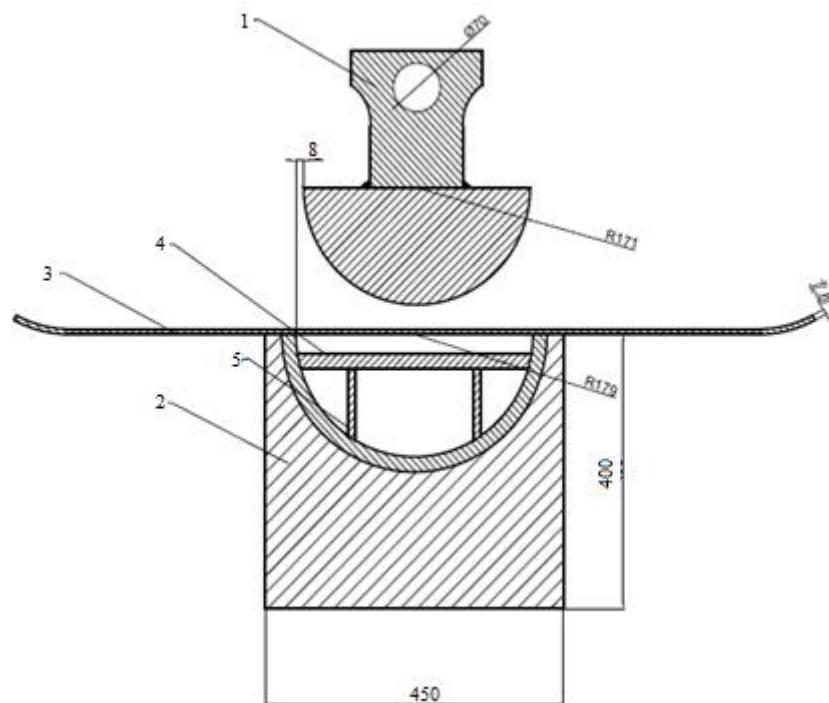
**Fig. 4.5** Presa pentru îndoirea tablei în forma „U”

*Proiectarea matriței de îndoire în forma „U”.* Executarea desenului este efectuată cu programul specializat AutoCAD 2013, versiunea student [74]. Pe parcursul proiectării acestui dispozitiv au apărut unele dificultăți privind funcționalitatea acestuia, cum ar fi riscul alunecării tablei de pe dispozitivul în momentul îndoierii. Pentru aceasta a fost necesară adăugarea ghidajului 4 (Fig. 4.6).

*Alegerea materialului.* La fel ca în etapa precedentă, materialul necesar executării poansonului și placii de bază este prelevat dintr-o tablă de oțel naval de rezistență mare de marcă A36 (STAS 8324-86) cu grosimea  $t = 20$  [53].

*Realizarea elementelor componente ale matriței.* Tăierea elementelor componente a fost executată cu mașina de debitat cu jet de apă MAXIEM 1530 WATERJET [83].

Matrița de îndoire în forma „U” este prezentată în figura 4.6



**Fig.4.6** Matriță de îndoire în forma „U”

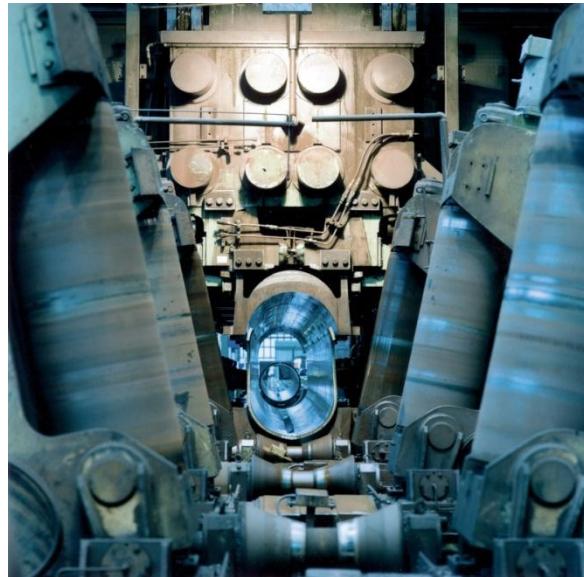
1- Poanson; 2 – Placa de bază; 3- Semifabricatul destinat îndoirii; 4 – Ghidajul; 5 – Insertia cu raza de 179 mm;



**Fig. 4.7** Matriță de îndoire în forma „U” realizată fizic în vederea studiului experimental

#### 4.2.3 Proiectarea și executarea sculelor pentru obținerea formei „O”

Matrița pentru obținerea formei „O” echipăză o presă închisă de la uzina „EuroPipe”, Mülheim an der Ruhr, Germania [77].

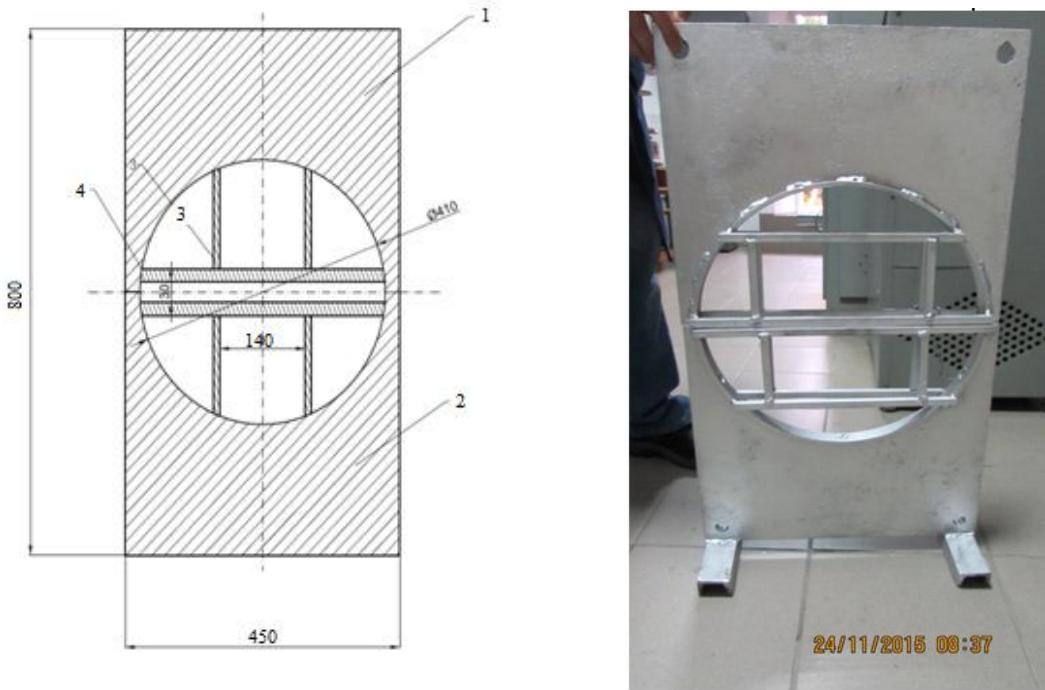


**Fig. 4.8** Presa și matrița pentru îndoirea tablei în forma „O”

*Proiectarea matriței de îndoire în forma „O”.* Desenul poansonului și placii de bază este prezentat în figura 4.8, având în vedere schimbările majore ale formei tablei, pentru siguranță și stăpânirea procesului tehnologic, acele două componente sunt prevăzute cu ghidaje 3 și 4. Executarea desenului este efectuată cu programul specializat AutoCAD 2013 versiunea student [74]. În continuare în figura 4.8 este prezentat desenul poansonului proiectat pentru obținerea formei „O”.

*Alegerea materialului.* Având ca baza, desenul tehnic a punsonului s-a ajuns la concluzie că poansonul din etapa precedentă să fie utilizat pentru obținerea formei „O”, adică partea fixă a poansonului să fie utilizată ca partea fixă a presei închise, iar partea superioară să fie prelevată din altă tablă A36 de dimensiuni 450x400 cu grosimea  $t = 20$  [53].

*Realizarea elementelor componente ale matriței.* Tăierea este executată cu mașina de debitat cu jet de apă MAXIEM 1530 WATERJET [83], iar rezultatul obținut este prezentat în figura 4.9.



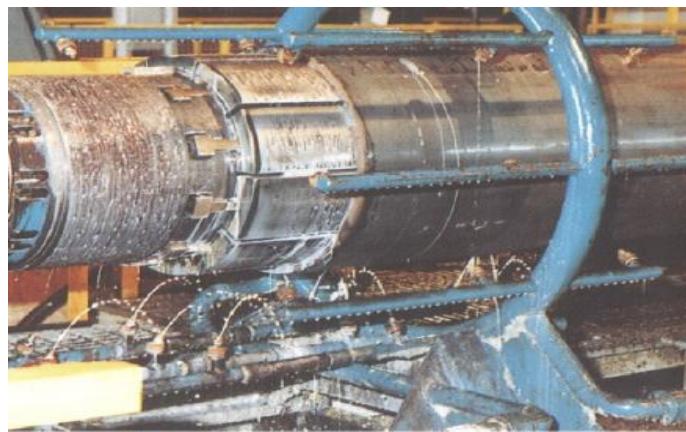
**Fig. 4.9** Mașina pentru obținerea formei „O”  
1-Poanson; 2- Placa de bază; 3,4 – Ghidaje;

#### 4.2.4 Proiectarea și executarea sculelor pentru expandare

##### 4.2.4.1 Introducere

Operațiunea de expandare este ultima etapă din lanțul tehnologic, din cauza aceasta echipamentul ce participă la etapa această, trebuie să îndeplinească toate condițiile pentru a obține precizia dimensională impusă.

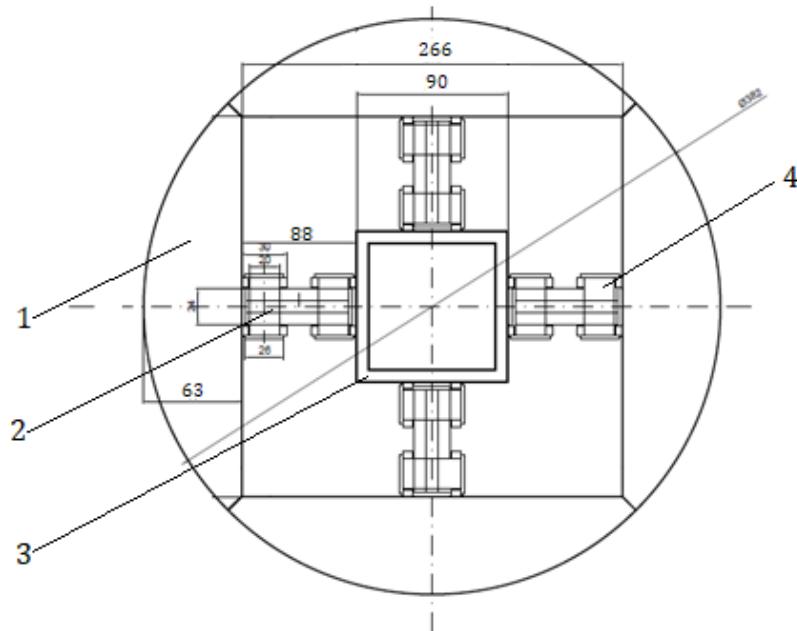
Proiectarea expandorului mecanic are la bază expandorul mecanic companiei Corus Tubes (Figura 4.9) dar având în vedere condițiile în care se va desfășura etapa, echipamentul de expandare mecanică este adaptat pentru presa hidraulică [86].



**Fig. 4.10** Expanderul hidraulic – Courtesy, Corus Tubes, UK

*Proiectarea dispozitivului de expandare.* Conform celor spuse de sus, desenul tehnic al expandorului mecanic are în vedere utilizarea acestuia cu presa hidraulică. Executarea

desenului este efectuată cu programul specializat AutoCAD 2013, versiunea student [74]. În continuare în figura 4.10 este prezentat expandorul mecanic destinat operațiunii de expandare. Un element important reprezintă alegerea dimensiunilor corecte al secțiunii transversale brațelor dar și al articulațiilor și apoi efectuarea calculului de verificare al acestora.



**Fig. 4.11** Expanderul mecanic

1-element de expandare; 2- brațul expandorului; 3-ghidaj; 4 – articulația brațului;

#### 4.2.4.2 Calculul de verificare a brațelor și a articulației expanderului

Aspectul cel mai important al acestui echipament este funcționalitatea și rigiditatea. Trebuie precizat că brațele cât și articulațiile sunt executate din același material ce a fost folosit pentru fabricarea țevii, și anume oțelul L 415 MB (STAS 8324-86).

Secțiunea transversală a brațelor are următoarele dimensiuni (Fig. 4.12):

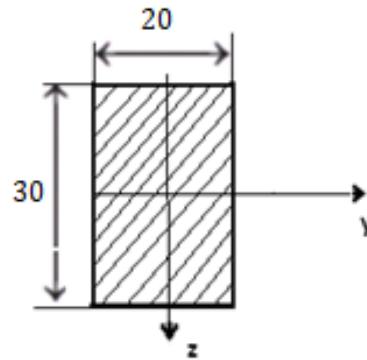
- $b = 20 \text{ mm}$
- $h = 30 \text{ mm}$

Conform figurii 4.11, elementele ce transmit solicitarea asupra țevii sunt următoarele:

- brațele expandorului – 4 bucăți;
- articulațiile brațului (câte 2 bucăți pentru fiecare braț)

Conform standardelor API (American Petroleum Institute), presiunea de expandare pentru DN 400 este de 14 MPa. Datorită acestei valori forța de compresiune ce va fi aplicată asupra expandorului mecanic va fi de 524 kN sau 131 kN pe fiecare braț [54], [82].

Datorită modului în care acționează expandorul mecanic, se consideră că brațul expandorului este supus la solicitare de compresiune (Fig. 4.13).



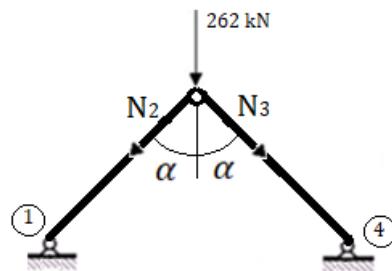
**Fig. 4.12** Secțiunea transversală al brațului

Brațul este considerat ca fiind o bară articulată la ambele capete, ce este acționată de o forță înclinată la un unghi oarecare  $\alpha$  (Fig. 4.14). Materialul din care este executat brațul este asemănător cu cel al țevii supuse la expandare.

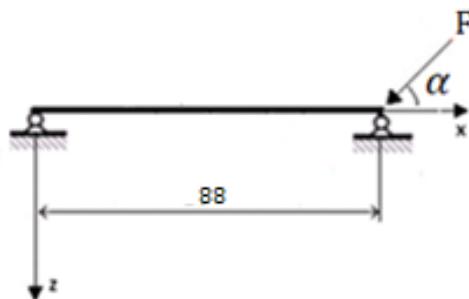
În continuare, utilizând metodologia de verificare, se vor calcula tensiunile ce apar în secțiune și acestea vor fi comparate cu tensiunea admisibilă [12].

- Se cunosc :

$$A_{sec} = 600 \text{ mm}^2; E = 2,18 \cdot 10^5; F = 131 \text{ kN}; \sigma_a = 382 \text{ MPa}; L_{bra} = 88 \text{ mm};$$

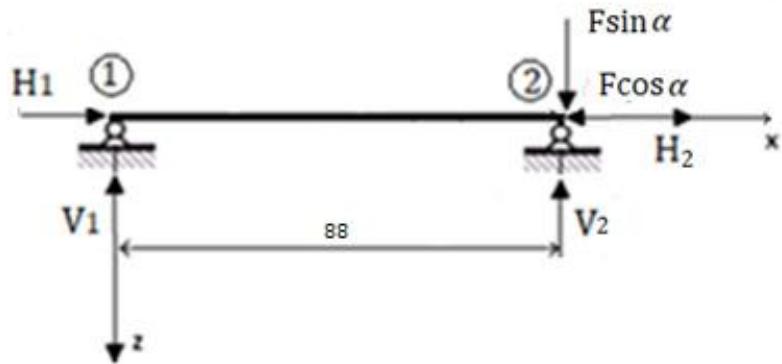


**Fig. 4.13** Schema cinematică a expandorului mecanic



**Fig.4.14** Brațul solicitat de o forță înclinată la un unghi oarecare  $\alpha$

După numerotarea punctelor caracteristice și descompunerea forțelor (Fig.4.15), se trece la determinarea eforturilor, ce apar la solicitarea de compresiune [14].

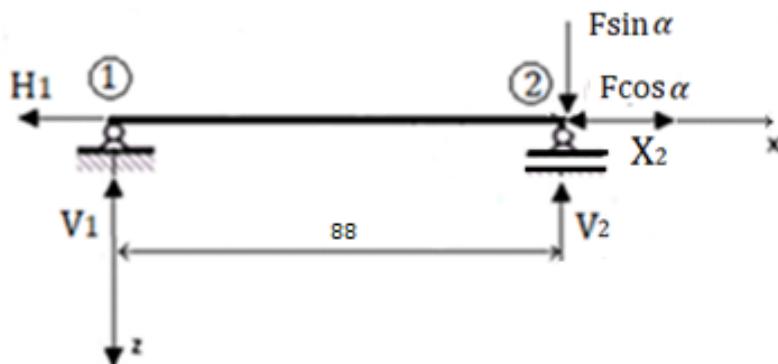


**Fig. 4.15** Sistemul static nedeterminat

- Din ecuația de echilibru static pe direcția axei x obținem:

$$\sum F_x = H_1 - F \cos \alpha + H_2 = 0 \rightarrow H_1 + H_2 = F \cos \alpha \quad (4.14)$$

Pe direcția axei  $x$ , reacțiunile  $H_1$  și  $H_2$  nu se pot determina cu ajutorul ecuațiilor de echilibru (o singura ecuație  $\sum F_x = 0$ ). Din cauza aceasta, sistemul se consideră static nedeterminat (Fig.4.14). Rezolvarea acestor sisteme este posibilă prin metoda Mohr-Maxwell [14]. Aceasta metoda constă în transformarea sistemului static nedeterminat în determinat, prin înlocuirea legăturilor suplimentare cu forță exterioară, ce se notează de obicei cu X (Fig.4.16) și prin scrierea condiției de deformare astfel încât se obțin un număr de relații egal cu numărul necunoscutelor static nedeterminate.



**Fig. 4.16** Sistemul static nedeterminat cu o forță necunoscută X

Condiția de deformare se scrie sub următoare formă [70]:

$$\delta_{22} \cdot X_2 + \delta_{20} = 0 \quad (4.15)$$

Deplasările  $\delta_{22}$  și  $\delta_{20}$  se determină prin aplicarea următoarelor relații:

$$\delta_{20} = \frac{1}{EA} \int_0^l N_i * n_i dx \quad (4.16)$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EA} \int_0^l n_i * n_i dx \quad (4.17)$$

unde

$N_i$  = expresia de forțe axiale ce apare datoria acțiunării forțelor exterioare asupra sistemului;

$n_i$  = expresia de forțe axiale ce apare datoră acțiunării sarcinii unitare aplicate în punctul aplicării efortului  $X_2$ ;

$E$  = modulul de elasticitate longitudinal al materialului, [MPa];

$A$  = aria secțiunii, [ $mm^2$ ].

În continuare se va determina efortul necunoscut  $X_2$ , iar primul pas este determinarea expresiilor forțelor axiale  $N_i$  și  $n_i$  în cazul de față sunt  $N_{21}$  și  $n_{21}$ .

Pentru determinarea expresiei  $N_{21}$  se construiește bara asupra căreia acționează doar forțele exterioare (Fig. 4.16).

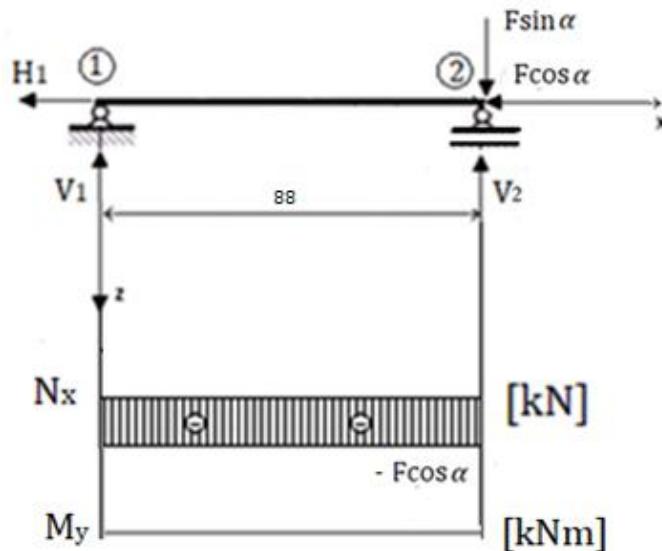


Fig. 4.17 Sistemul solicitat doar de forțele exterioare

Se scrie ecuația de echilibru static pe direcția axei x:

$$\sum F_x = -H_1 - F \cos \alpha = 0 \rightarrow H_1 = -F \cos \alpha \quad (4.18)$$

Se scriu ecuații de echilibru static pe direcția axei z:

$$\sum F_z = -V_1 + F \sin \alpha - V_2 = 0 \rightarrow V_1 + V_2 = F \sin \alpha \quad (4.19)$$

$$\sum M_1 = F \sin \alpha * 0,108 - V_2 * 0,108 = 0 \rightarrow V_2 = F \sin \alpha \quad (4.20)$$

$$\sum M_2 = V_1 * 0,108 = 0 \rightarrow V_1 = 0 \quad (4.21)$$

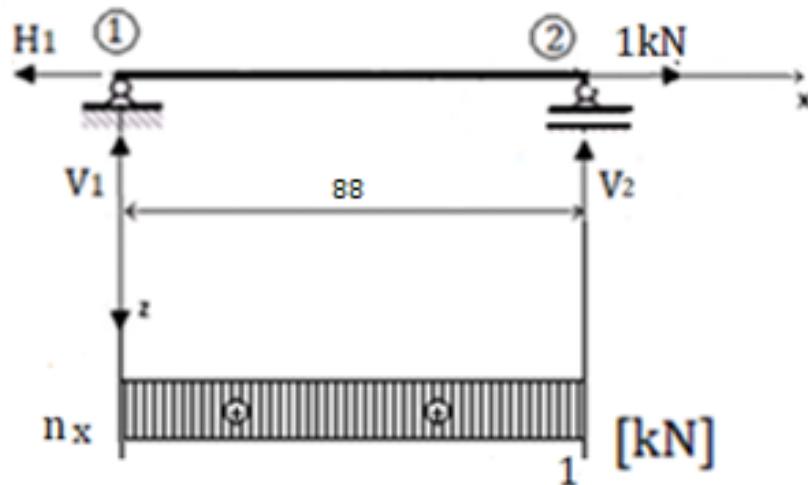
După secționarea barei pe intervalul 2-1, se scriu expresiile pentru forței axiale  $N_x$  și pentru momentele de încovoiere  $M_y$ :

$$N_{21} = -F \cos \alpha \quad (4.22)$$

$$M_{21} = V_2 * x_{12} - F \sin \alpha * x_{12} = 0 \rightarrow x_2 = 0 \rightarrow M_2 = 0; \\ x_2 = 0,108 \rightarrow M_2 = 0; \quad (4.23)$$

În continuare se construiește diagrama de eforturi pentru forțe axiale  $N_x$  și pentru momentele de încovoiere  $M_y$  (Fig.4.17). După construirea diagramei de efort, se observă faptul că momentul de încovoiere  $M_y$  are valoarea 0, ceea ce înseamnă că nu are loc solicitarea de încovoiere.

Expresia  $n_{21}$  este determinată prin aplicarea sarcinii unitare în punctul aplicării efortului necunoscut  $X_2$ , și anume în punctul 2 (Fig.4.18).



**Fig. 4.18** Sistemul solicitat de o forță unitară

Se scrie ecuația de echilibru static pe direcția axei x:

$$\sum F_x = -H_1 + 1 = 0 \rightarrow H_1 = 1 \quad (4.24)$$

Se scriu ecuații de echilibru static pe direcția axei z:

$$\sum F_z = -V_1 - V_2 = 0 \quad (4.25)$$

După secționarea barei pe intervalul 2-1, se scriu expresiile pentru determinarea forței axiale  $n_x$ :

$$n_{21} = 1 \quad (4.26)$$

În continuare se construiește diagrama de eforturi pentru forțe axiale  $n_x$ .

Pasul următor reprezintă momentul determinării efortului necunoscut  $X_2$ .

$$\delta_{22} \cdot X_2 + \delta_{20} = 0 \quad (4.27)$$

$$\delta_{20} = \frac{1}{EA} \int_0^l N_{21} * n_{21} dx \rightarrow \frac{1}{EA} \int_0^l (-F \cos \alpha) * 1 dx = \frac{F \cos \alpha * l}{EA} \quad (4.28)$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EA} \int_0^l n_{12} * n_{12} dx \rightarrow \frac{1}{EA} \int_0^l 1 * 1 dx = \frac{l}{EA} \quad (4.29)$$

$$X_2 = -\frac{\frac{F \cos \alpha * l}{EA}}{\frac{l}{EA}} = F \cos \alpha \quad (4.30)$$

Valoarea efortului necunoscut  $X_2 = F \cos \alpha$  reprezintă valoarea reacțiunii  $H_2$ .

În calculul de verificare al brațului se vor prezenta 2 situații și anume se va calcula tensiunea efectivă cu valoarea unghiului  $\alpha$  la  $45^\circ$  și la  $60^\circ$ .

Formula generală pentru verificarea barei la compresiune este [14]:

$$\sigma_{ef} = -\frac{N_x}{A} \quad (4.31)$$

unde

$\sigma_{ef}$  = tensiunea normală efectivă, [ $MPa$ ];

$N_x$  = forță axială, [ $kN$ ];

$A$  = aria secțiunii transversale [ $mm^2$ ].

Pentru situația în care valoarea unghiului  $\alpha = 45^\circ$ , valoarea tensiunii efective  $\sigma_{ef}$  este:

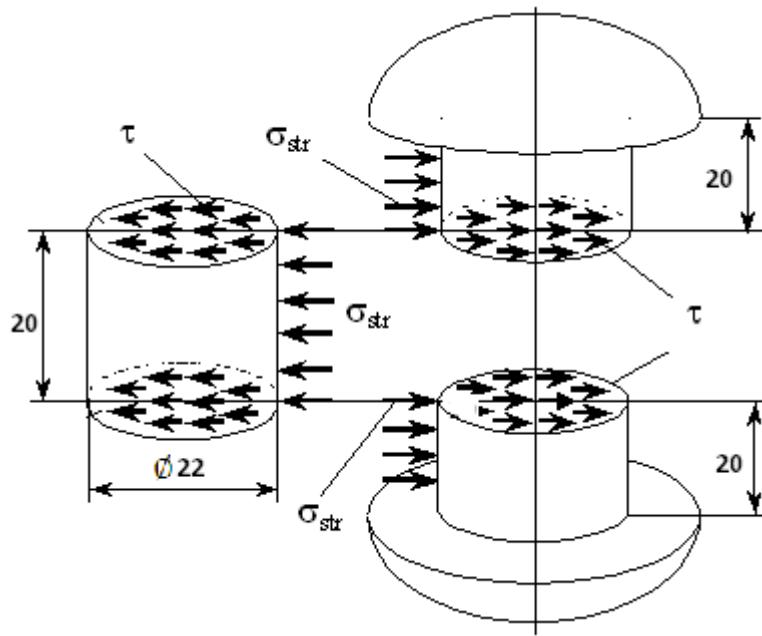
$$\sigma_{ef} = -\frac{N_x}{A} = \frac{F \cos 45^\circ kN}{600 mm^2} = \frac{131 * \frac{\sqrt{2}}{2} * 10^3}{600 mm^2} = -154,38 MPa < \sigma_a; \quad (4.32)$$

Pentru situația în care valoarea unghiului  $\alpha = 60^\circ$ , valoarea tensiunii efective  $\sigma_{ef}$  este:

$$\sigma_{ef} = -\frac{N_x}{A} = \frac{F \cos 60^\circ kN}{600 mm^2} = \frac{131 * \frac{1}{2} * 10^3}{600 mm^2} = -109,16 MPa < \sigma_a; \quad (4.33)$$

În urma calculului de verificare, valoarea maximă la care este supus brațul este de  $154,38 MPa$ , ceea ce reprezintă  $40,3\%$  din valoarea tensiunii admisibile.

Imaginea completă privind rezistența expandorului mecanic, oferă calculul de verificare al elementelor de îmbinare al brațului, și anume articulațiile. Pentru fiecare braț, articulațiile sunt în număr de 2 bucăți, ceea ce înseamnă că forța de compresiune va acționa pe jumătate pentru fiecare. Îmbinarea este considerată ca fiind o îmbinare nituită. Solicitarea și localizarea tensiunilor este prezentată în figura 4.19 [68].



**Fig. 4.19** Verificarea tijei la strivire și forfecare

Într-o îmbinare nituită, apar două tipuri de tensiuni, tensiunea tangențială  $\tau$  și tensiunea normală la strivire  $\sigma_{str}$  (Fig.4.20). Conform metodologiei de calcul al tensiunilor într-o îmbinare nituită, tensiunea tangențială  $\tau$  și tensiunea normală la strivire  $\sigma_{str}$  au următoare formă [68]:

$$\tau = \frac{F}{n * s * \frac{\pi d^4}{4}} \leq \tau_{af} \quad (4.34)$$

unde

$F$  = forța de întindere/compresiune, [ $kN$ ];

$n$  = numărul tijelor (niturilor);

$s$  = numărul suprafețelor de forfecare;

$d$  = diametrul tijei (nitului), [ $mm^2$ ]

$\tau_{af}$  = tensiunea admisibilă la forfecare,  $\tau_{af} = 0,8\sigma_a$ , [ $MPa$ ].

$$\sigma_{str} = \frac{F}{n \cdot d \cdot t} \leq \sigma_{astr} \quad (4.35)$$

unde

$F$  = forța de întindere/compresiune, [ $kN$ ];

$n$  = numărul tijelor (niturilor);

$t$  = grosimea tablei celei mai subțiri, [ $mm$ ];

$d$  = diametrul tijei (nitului), [ $mm^2$ ];

$\sigma_{astr}$  = tensiunea admisibilă la strivire,  $\sigma_{astr} = 2\sigma_a$ , [ $MPa$ ];

În continuare este prezentat calculul analitic al tensiunilor respective.

$$\tau = \frac{F}{n \cdot s \cdot \frac{\pi d^2}{4}} = \frac{65,5 * 10^3}{1 \cdot 2 \cdot \frac{3,14 \cdot 22^2}{4}} = 86,29 MPa < \tau_{af} \quad (4.36)$$

$$\sigma_{str} = \frac{F}{n \cdot d \cdot t} = \frac{65,5 * 10^3}{1 \cdot 22 * 20} = 148 \text{ MPa} < \sigma_{astr} \quad (4.37)$$

Pentru executarea părților active ale expandorului, s-a folosit oțel naval de rezistență mărită de marcă A36 cu grosimea  $h = 30$  [53], iar brațele au fost executate din oțelul L 415 MB.



**Fig.4.20** Dispozitivul de expandare – vederea de sus



**Fig.4.21** Dispozitivul de expandare - vederea principală

## 4.3 MĂSURAREA DEFORMAȚIILOR CU AJUTORUL METODEI OPTICE – CORELAREA DIGITALĂ A IMAGINII (CDI)

### 4.3.1 Descrierea și principiul de funcționare a CDI

Metoda Corelării Digitale a Imaginilor (CDI) este o metodă experimentală, nedestructivă, modernă de masurare a deplasărilor/deformațiilor [27]. Ea permite determinarea cu precizie de ordinul micronilor, cu magnitudini până la cățiva centimetri, a deplasărilor cu ajutorul imaginilor înregistrate simultan de către două camere video, care ne permit obținerea unor imagini spațiale, asemenea celor realizate de către ochiul uman. Cele două camere video, de înaltă rezoluție, sunt montate pe un trepied rigid. Camerele sunt dispuse transversal, pentru a putea să privească obiectul supus analizei sub aceleași unghiuri, ele fiind simetric dispuse față de acesta [76].

Un element ce constituie baza măsurătorilor este calibrarea suprafețelor ce urmează a fi studiate. Inițial camerele se calibrează cu ajutorul unui etalon, care se numește etalonul de gri. Acesat este constituit dintr-un set de puncte calibrate dispuse la distante bine definite. Corpul supus analizei va fi vopsit cu un spray special pentru a se obține pete care vor asigura ulterior identificarea ușoară a acestora. Dupa calibrare se realizează investigația propriu-zisă a corpului. Imaginile captate de către fiecare cameră se constituie în matrice de pixeli. Inițial se baleiază corpul supus investigației nesolicitata, după care se baleiază coprul solicitat. Un software special analizează un număr de puncte selectate atât în stare nesolicitată cât și în stare solicitată și calculează deplasările [26], [45].

In cazul nostru sistemul CDI 3D Q – 400 este unul produs de compania Dantec Dynamics, Danemarca. Sistemul Q400 este compus din: senzor cu două camere Schneider; stand pentru sustinerea și fixarea senzorului; sistem de declanșare pentru camere și controlul înregistrării imaginilor; PC foarte performant care operează sub sistemul GOM Linux 7 și softul specializat versiunea 6.1[76].

### 4.3.2 Măsurarea deformațiilor în fiecare etapă a procesului de fabricație a țevilor sudate longitudinal

În cele ce urmează vom parcurge fluxul tehnologic de fabricație a unei țevi sudate longitudinal prin metoda JUOE, iar la fiecare dintre cele 4 etape vom măsura deformațiile cu ajutorul metodei optice Corelarea Digitală a Imaginii (CDI).

#### 4.3.2.1 Îndoirea marginilor

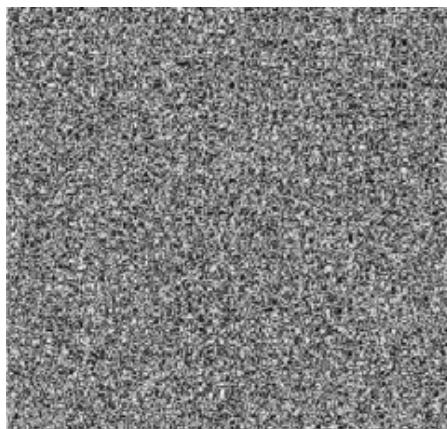
Echipamentul necesar realizării îndoierii marginii se compune din mașina de încercat la tracțiune și compresiune ZDM 100. În paralel vom folosi un sistem digital de corelare a imaginii 3D Q – 400 pentru măsurarea deformațiilor.

Montajul și ajustarea echipamentelor este prezentată în figura 4.22.

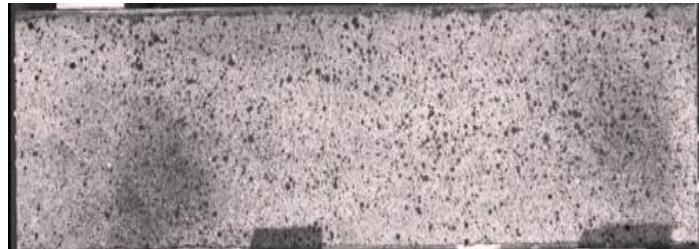


**Fig.4.22** Montarea și calibrarea echipamentelor pentru îndoirea marginilor și măsurarea deformațiilor

După montarea echipamentului, se realizează calibrarea echipamentului. Etalonul de gri este prezentat în figura 4.23, iar pentru crearea corelării imaginilor suprafeței tablei a fost prelucrată special după cum a fost menționat mai sus.

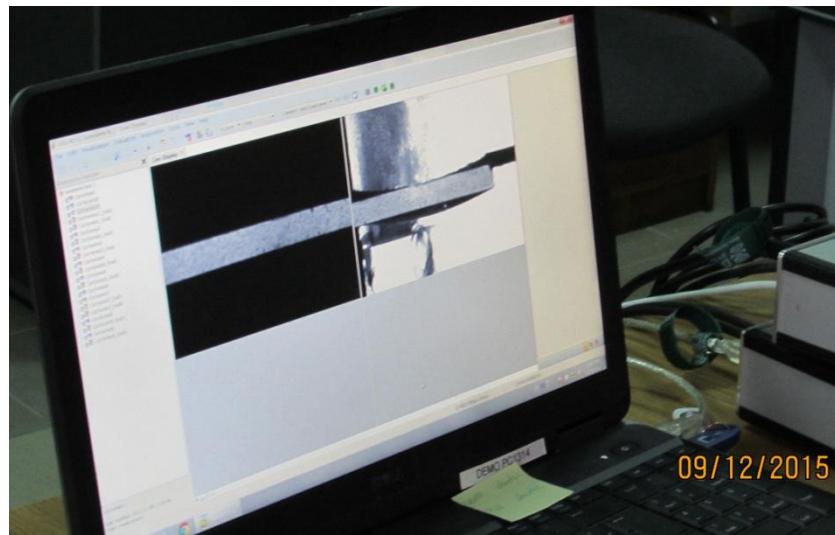


**Fig 4.23** Etalonul de gri



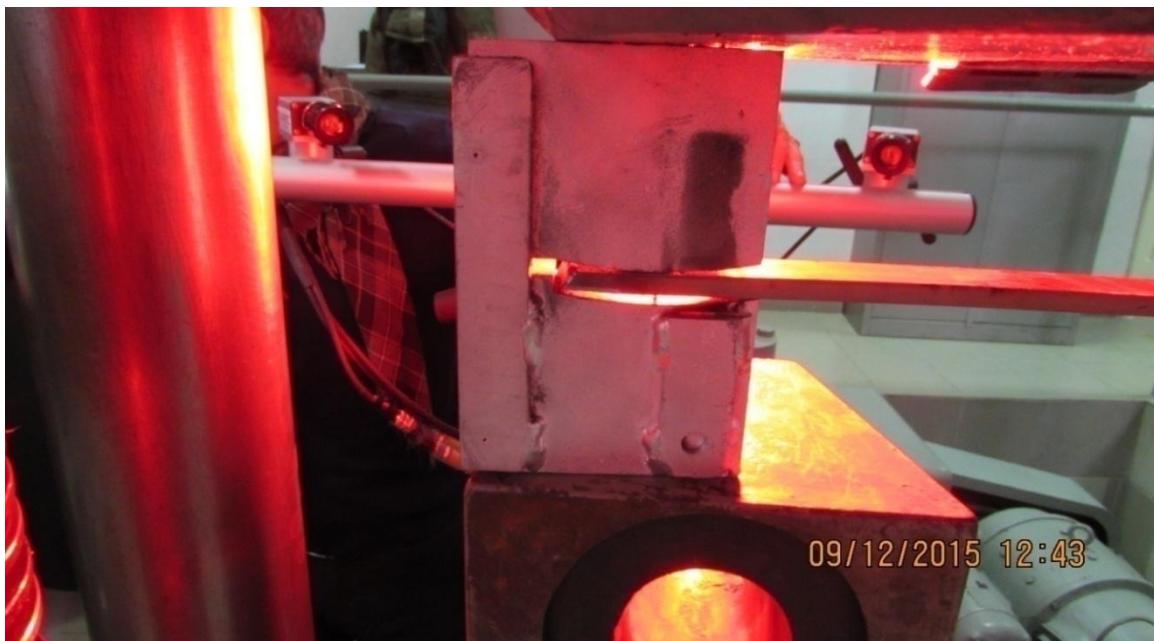
**Fig.4.24** Suprafața pregătită măsurătorilor

Corectitudinea calibrării se poate observa în figura 4.27, unde poziția semifabricatului și suprafața sunt detecate de către camera și sunt vizualizate cu ajutorul computerului.



**Fig. 4.25** Calibrarea sistemului CDI față de semifabricat

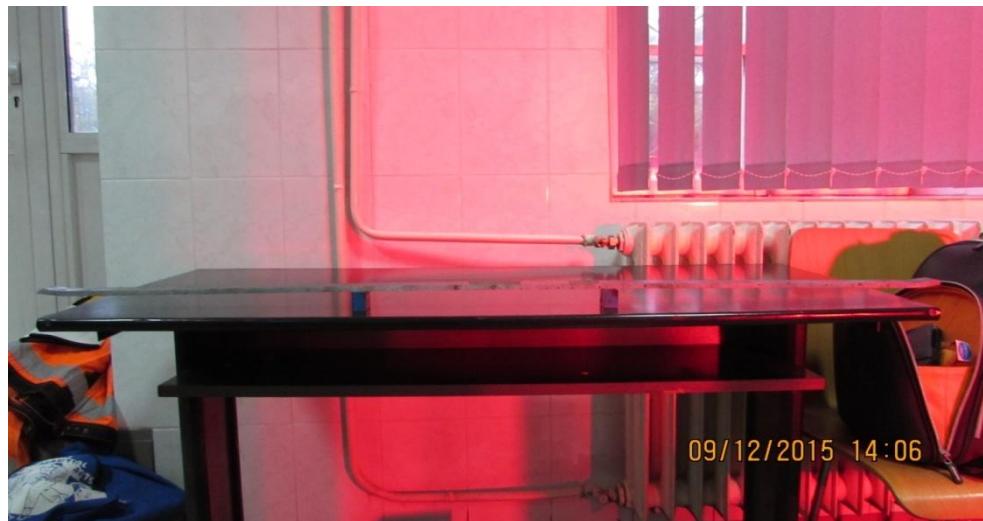
După efectuarea tuturor pregătirilor se trece la etapa propriu-zisă de îndoire a marginilor. Cum este prezentat în figura 4.26, poansonul este poziționat pe bacul fix al mașinii de încercat și semifabricatul este poziționat în partea activă a poansonului. Se acționează presa a mașinii de încercat și începe procesul de îndoire a marginilor.



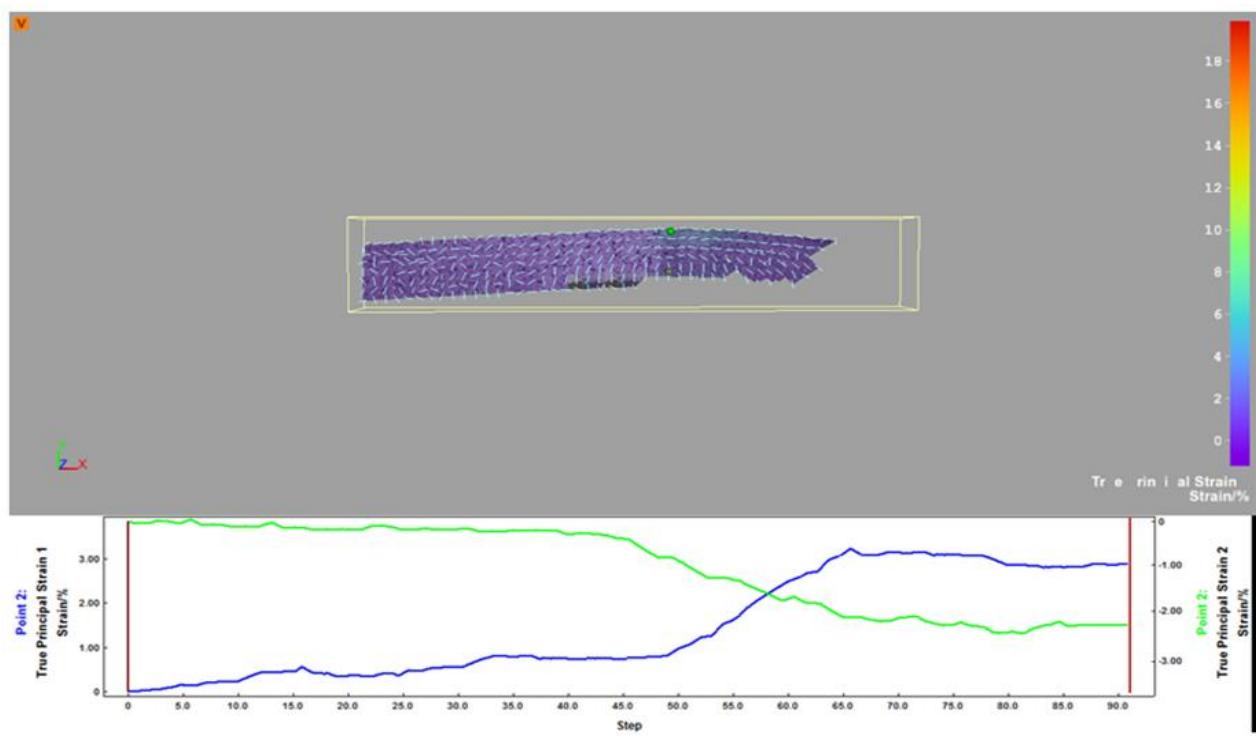
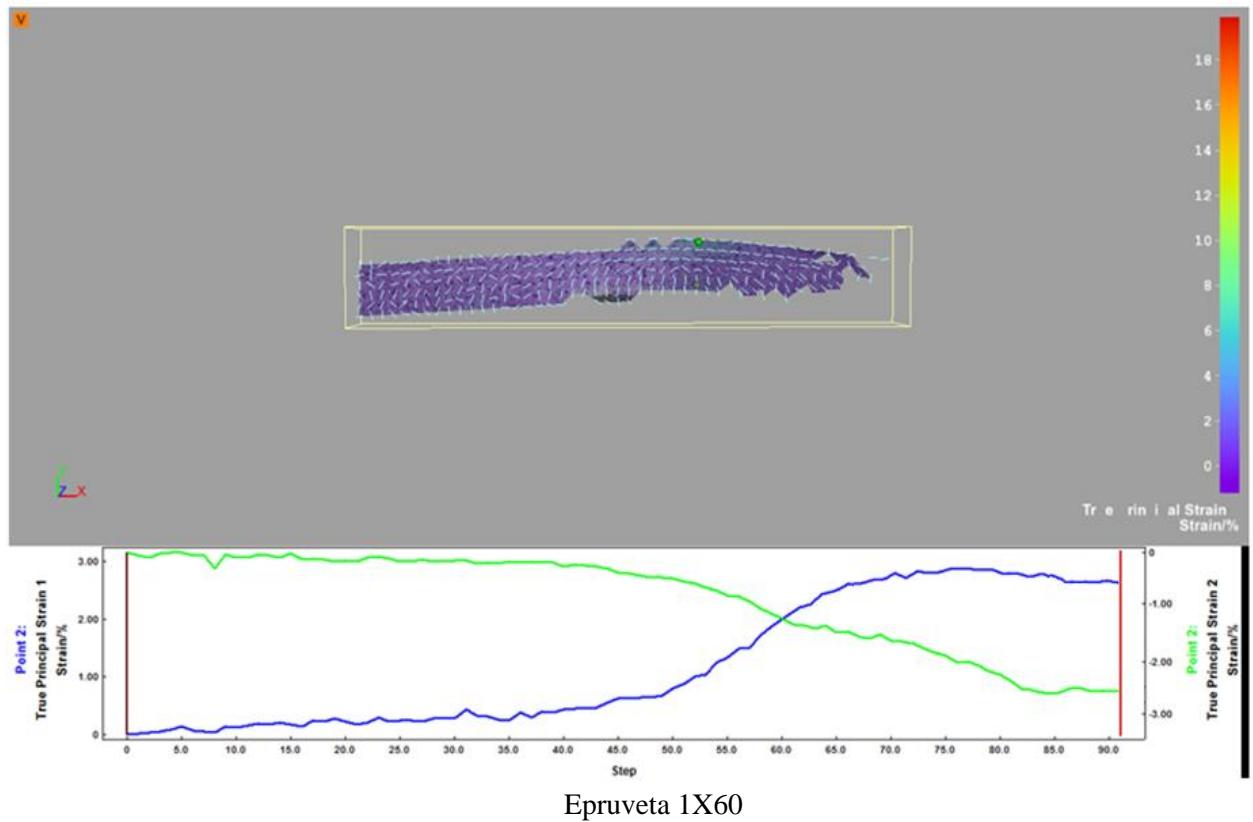
**Fig. 4.26** Prima etapa – îndoirea marginilor

**Fig. 4.27 Marginile rezultate**

Rezultatul obținut este prezentat în figurile 4.27 și 4.28

**Fig.4.28 Vederea generală a tablei cu marginile îndoite**

Un element important reprezintă corectitudinea rezultatelor obținute. Din cauza aceasta s-au efectuat 2 măsuratori pe 2 epruvete diferite. Graficul și evoluția deformațiilor sunt prezentate în figura 4.31. Trebuie precizat faptul că punctele ce urmează a fi măsurate sunt alese după zonele cele mai deformate, în cazul respectiv sunt acele de trecere din forma plană în cea curbă. În continuare sunt prezentate rezultatele obținute pentru cele 2 epruvete (Fig. 4.29).



**Fig. 4.29** Rezultatele deformațiilor măsurate în urma îndoirii marginii  
Curba albastră – deformația principală 1, Curba verde – deformația principală 2

După derularea procesului, valorile maxime ale deformațiilor și cele reziduale sunt următoarele:

Pentru epruveta 1X60:

- deformația principală 1:  $\varepsilon_{jmax}^1 = 2,73\%$ ;
- deformația principală 2:  $\varepsilon_{jmax}^2 = -2,39\%$ ;
- deformația reziduală 1:  $\varepsilon_{jrez}^1 = 2,66\%$ ;
- deformația reziduală 2:  $\varepsilon_{jrez}^2 = -2,33\%$ ;

Pentru epruveta 2X60:

- deformația principală 1:  $\varepsilon_{jmax}^1 = 2,71\%$ ;
- deformația principală 2:  $\varepsilon_{jmax}^2 = -2,34\%$ ;
- deformația reziduală 1:  $\varepsilon_{jrez}^1 = 2,63\%$ ;
- deformația reziduală 2:  $\varepsilon_{jrez}^2 = -2,23\%$ ;

#### 4.3.2.2. Îndoirea în forma "U"

Pasul următor îl constituie obținerea formei „U”. Având toate echipamentele pe poziții, se schimbă mătrița corespunzătoare operațiunii, după cum se vede în figura 4.30. Pentru această etapă se efectuează calibrarea sistemului CDI pe înălțime față de poanson. Poziționarea semifabricatului față de poanson este simetrică (Fig.4.31). Imaginea generală a poziției poansonului și a semifabricatului este prezentată în figura 4.30.



**Fig.4.30** Montarea echipamentului



**Fig. 4.31** Poziționarea semifabricatului

După realizarea tuturor pregătirilor necesare acestei etape, începe procesul propriu-zis de îndoire.



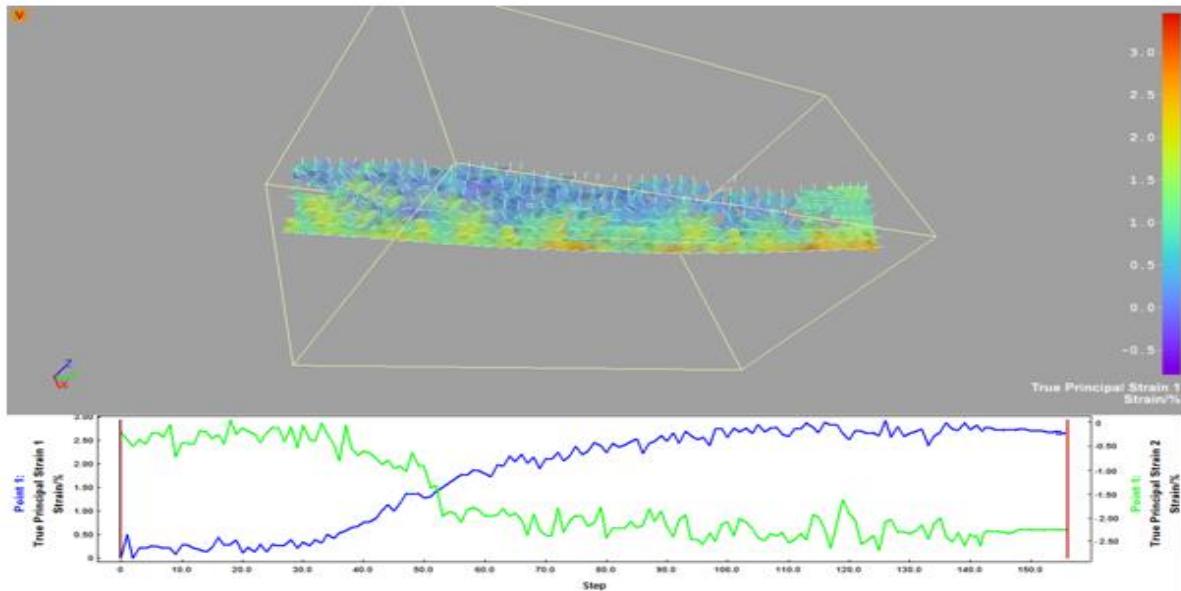
**Fig.4.32** Derularea etapei de obținere a formei „U”

Deplasarea verticală a presei se efectuează până la momentul în care semifabricatul a luat forma matriței, aşa cum este prezentat în figura 4.33.

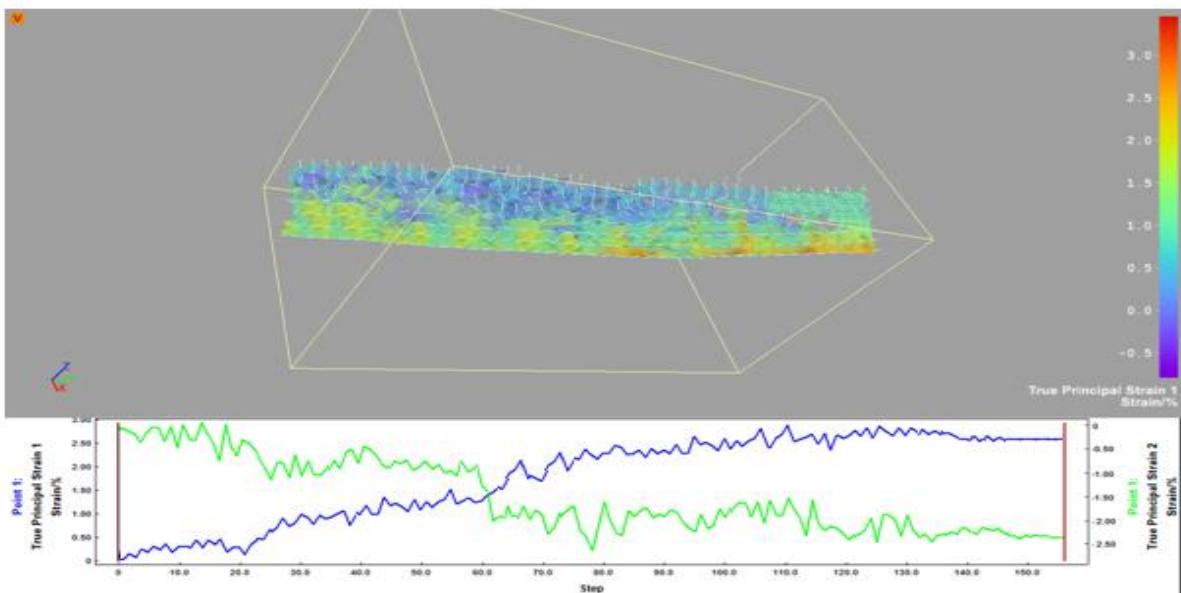


**Fig.4.33** Semifabricatul îndoit în forma „U”

La fel ca și la etapa precedentă, în momentul obținerii formei “U” s-au efectuat masuratorile pentru 2 epruvete diferite (Fig. 4.34).



Epruveta 1X60



Epruveta 2X60

**Fig. 4.34** Rezultatele deformațiilor măsurate în urma obținerii formei „U”

Curba albastră – deformația principală 1; Curba verde – deformația principală 2;

După efectuarea masurătorilor, valorile maxime ale deformațiilor și a celor reziduale pentru obținerea formei “U”, sunt următoarele:

Epruveta 1X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{Umax}^1 = 3,2\%$  ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{Umax}^2 = -2,6\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{Urez}^1 = 2,62\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{Urez}^2 = -2,42\%$ ;

### Epruveta 2X60:

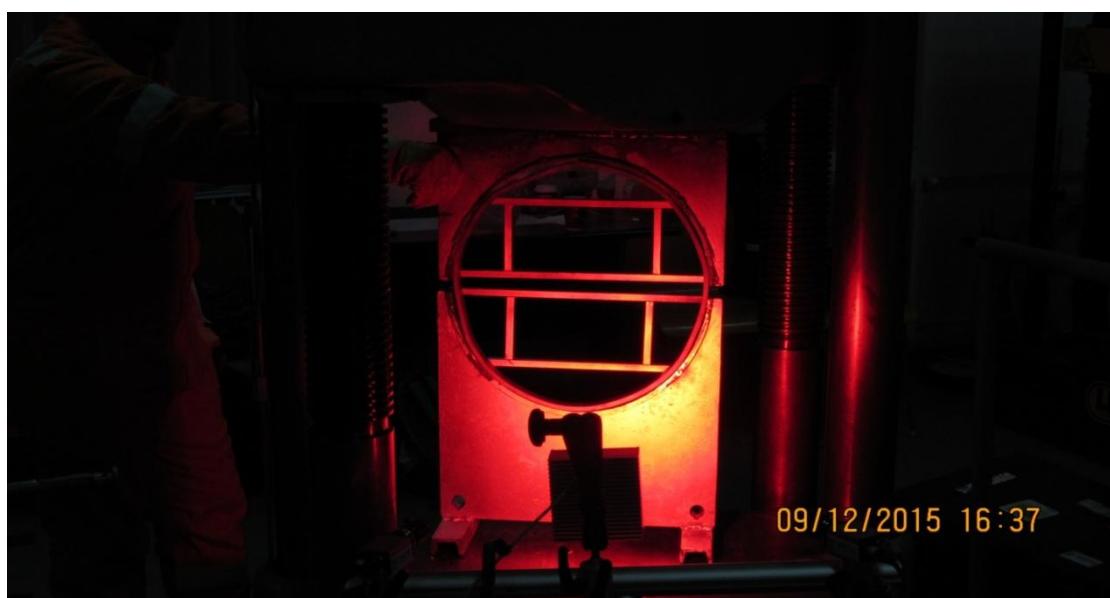
- deformația principală 1  $\varepsilon_{Umax}^1 = 2,91\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{Umax}^2 = -2,72\%$ ;
- deformația reziduală 1 :  $\varepsilon_{Urez}^1 = 2,57 \%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{Urez}^2 = -2,38 \%$ ;

#### 4.3.2.3 Îndoirea în forma „O”

Operațiunea privind obținerea formei „O” constituie ultima etapa în care este utilizată solicitarea de încovoiere. Matrița pentru etapa respectivă, este compusă din două componenete identice, formând un cadru închis necesar obținerii formei “O”. Înaintea derulării etapei, echipamentul de monitorizare este calibrat față de matriță (Fig.4.35).



**Fig.4.35** Calibrarea echipamentului



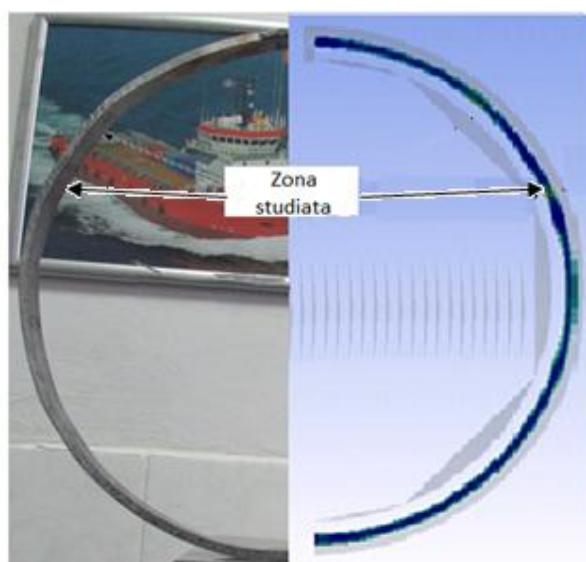
**Fig.4.36** Derularea etapei de obținere formei „O”

În urma etapei de obținere a formei „O” ies în evidență două zone cu deformațiile cele mai mari, după cum se vede în figura 4.37. Este de menționat faptul că acele zone corespund cu cele din studiul numeric. Pentru a vedea această comparație este prezentată figura 4.38, unde se văd clar că cele două zone din etapa experimentală corespund cu cele din etapa numerică.

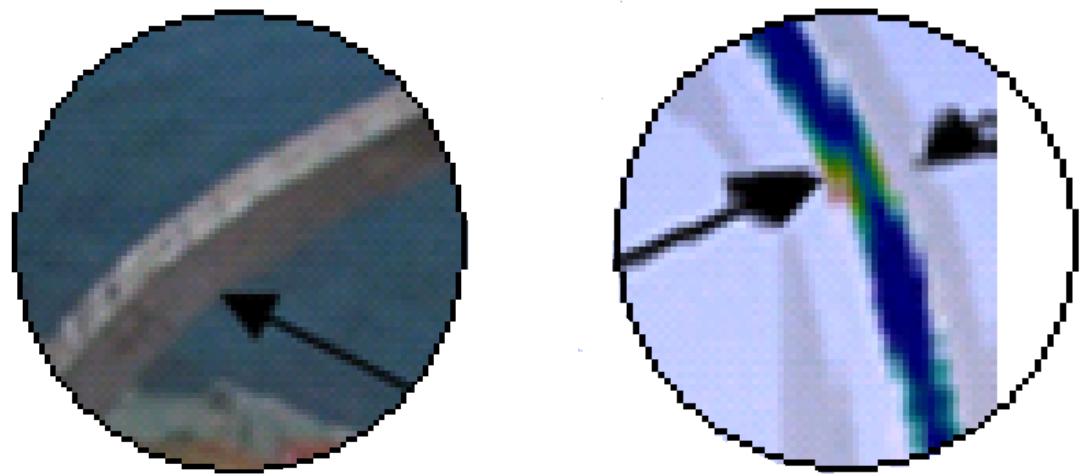


**Fig.4.37** Rezultatul obținut după operațiunea de obținere formei “O”

Trebuie precizat faptul că, operațiunea privind obținerea formei “O”, a fost repetată pentru 2 epruvete pentru a identifica zona cu cele mai mari valori ale deformațiilor. După monitorizarea procesului, zona cu valorile cele mai mari ale deformațiilor a fost identificată. Cu ajutorul figurii 4.38 s-a scos în evidență zona respectivă comparată cu aceeași zonă rezultată în urma studiului numeric. În continuare, sunt prezentate în figura 4.40 valorile deformațiilor pentru cele 2 epruvete.

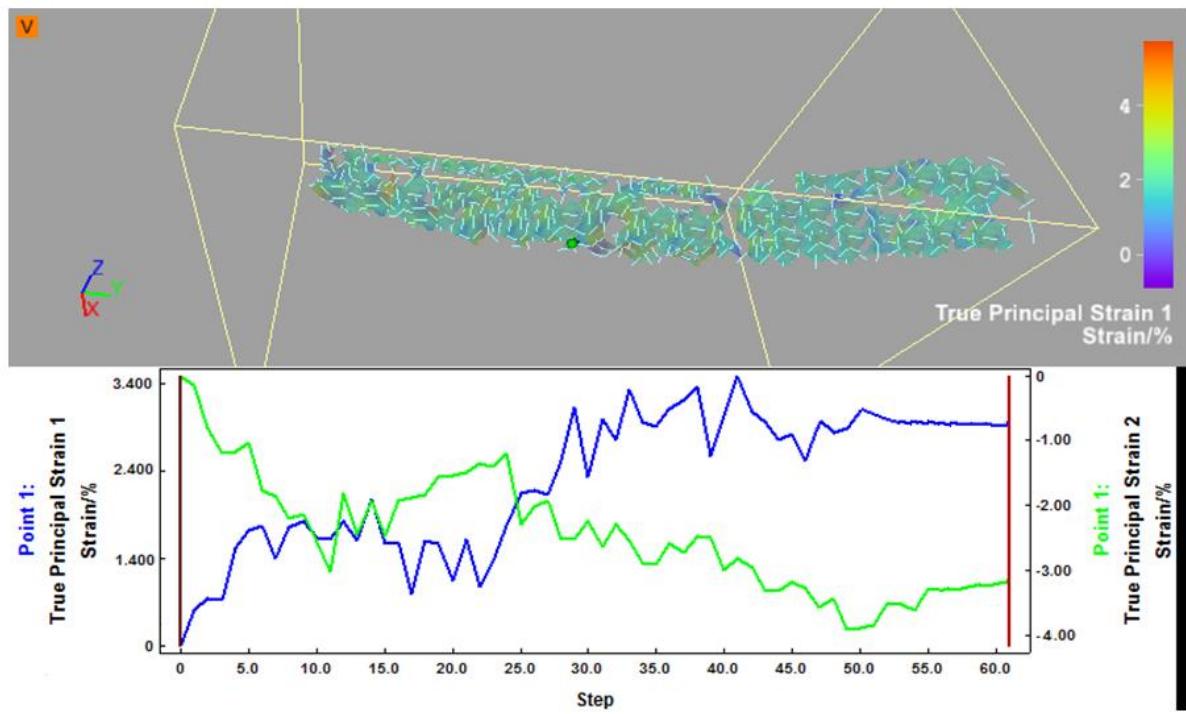


**Fig. 4.38** Forma semifabricatului obținută în urma utilizării celor două metode de studiu

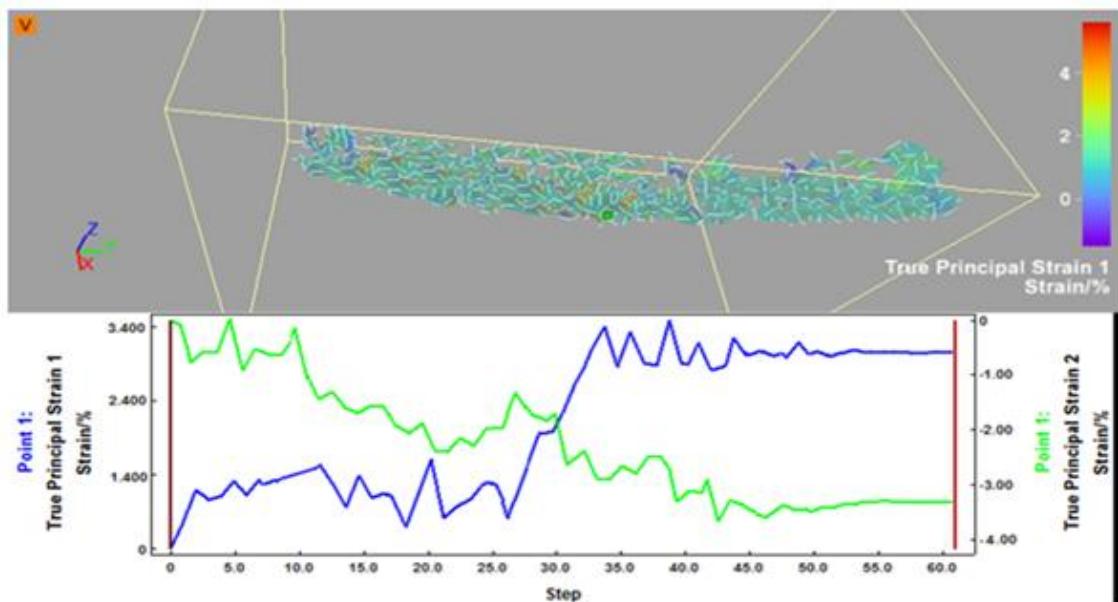


**Fig. 4.39** Zona cea mai deformată rezultată în urma metodei experimentale și celei numerice

Dupa identificarea zonei cu deformații cele mai mari, aceasta din urmă s-a monitorizat pentru toate cele 2 epruvete. In figura 4.42 sunt prezentate rezultatele obținute în urma măsurătorilor efectuate.



Epruveta 1X 60



**Fig. 4.40** Rezultatele deformațiilor măsurate în urma obținerii formei „O”

Curba albastră – deformația principală 1 Curba verde – deformația principală 2

În continuare sunt prezentate valorile obținute în urma efectuării etapei de obținere a formei „O”. După efectuarea masurătorilor, valorile maxime ale deformațiilor la care a fost supus semifabricatul pentru obținerea formei „O” și a celor reziduale sunt următoarele:

Epruveta 1X60:

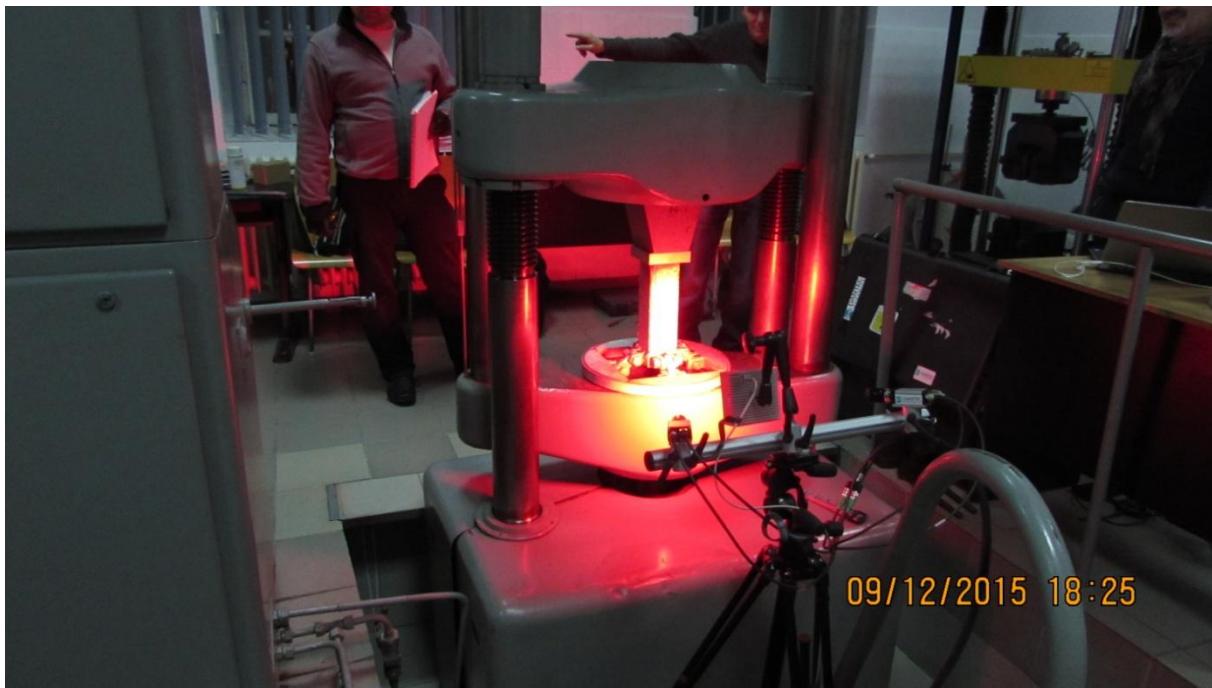
- deformația principală 1  $\varepsilon_{0max}^1 = 3,42\%$  ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{0max}^2 = -3,75\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{0rez}^1 = 3,01\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{0rez}^2 = -3,18\%$ ;

Epruveta 2X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{0max}^1 = 3,51\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{0max}^2 = -3,49\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{0rez}^1 = 3,08 \%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{0rez}^2 = -3,28 \%$ ;

#### 4.3.2.4 Expandarea

În procesul de expandare semifabricatul este acționat de către un expandor hidraulic, ce produce o presiune interioară orientată radial către corpul țevii în aşa fel încât se produce deformația plastică, dar în cazul de față, se utilizează echipamentul proiectat special pentru expandarea țevilor cu DN 400. Montarea și calibrarea echipamentelor este prezentată în figura 4.41.



**Fig. 4.41** Montarea echipamentului destinat operațiunii de expandare

Conform standardelor API (American Petroleum Institute), țeava va fi expandată cu o rată de 0,8% față de diametrul obținut în urma obținerii formei „O”[75].

Defenim rata de expandare ca fiind:

$$r_E = \frac{|D_E - D_0|}{D_0} \quad (4.38)$$

unde:

$r_E$  = rata de expandare, [%];

$D_0$  = diametrul înaintea operațiunii de expandare, [mm];

$D_E$  = diametrul după operațiunea de expandare, [mm].

Pentru aceasta pe bacul fix al presei se va puncta deplasarea egală cu 3,25 mm, corespunzătoare valorii de 0,8%. În continuare este prezentată derularea procesului de expandare (Fig. 4.42). La valoarea forței de 52 tf s-a obținut deplasarea egală cu 3,25 mm.

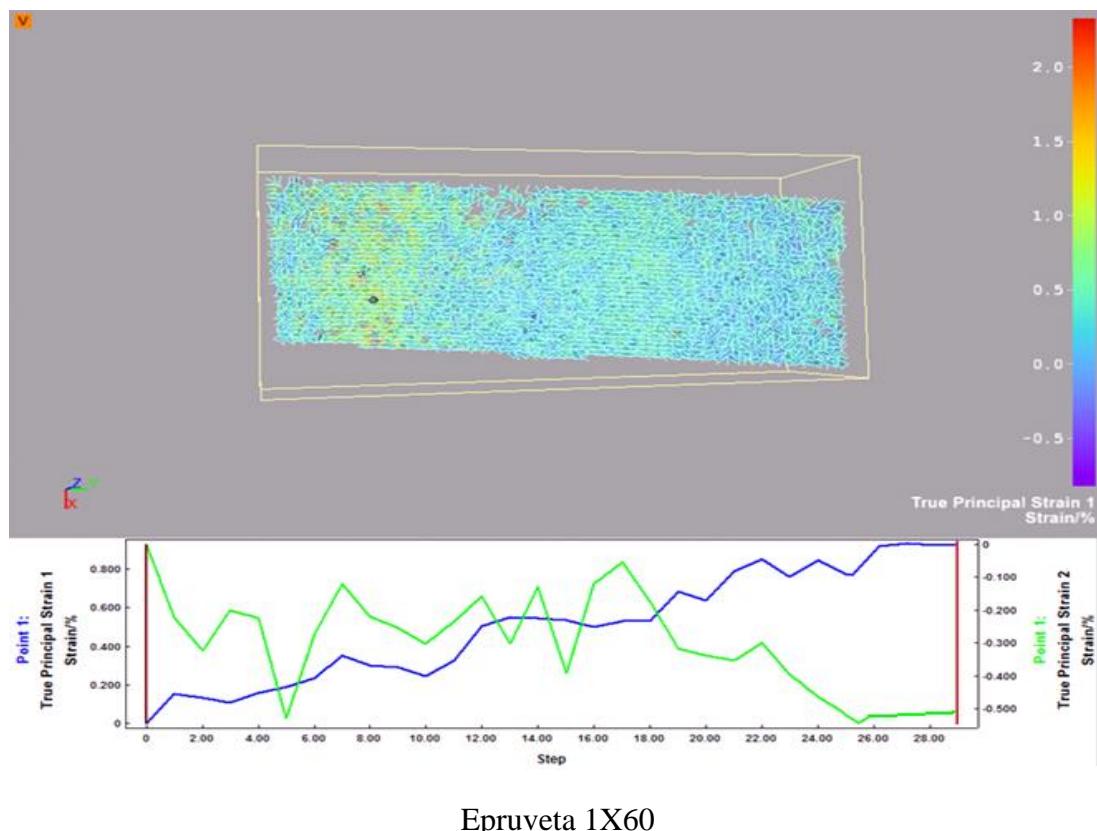


**Fig. 4.42** Derularea procesului de expandare

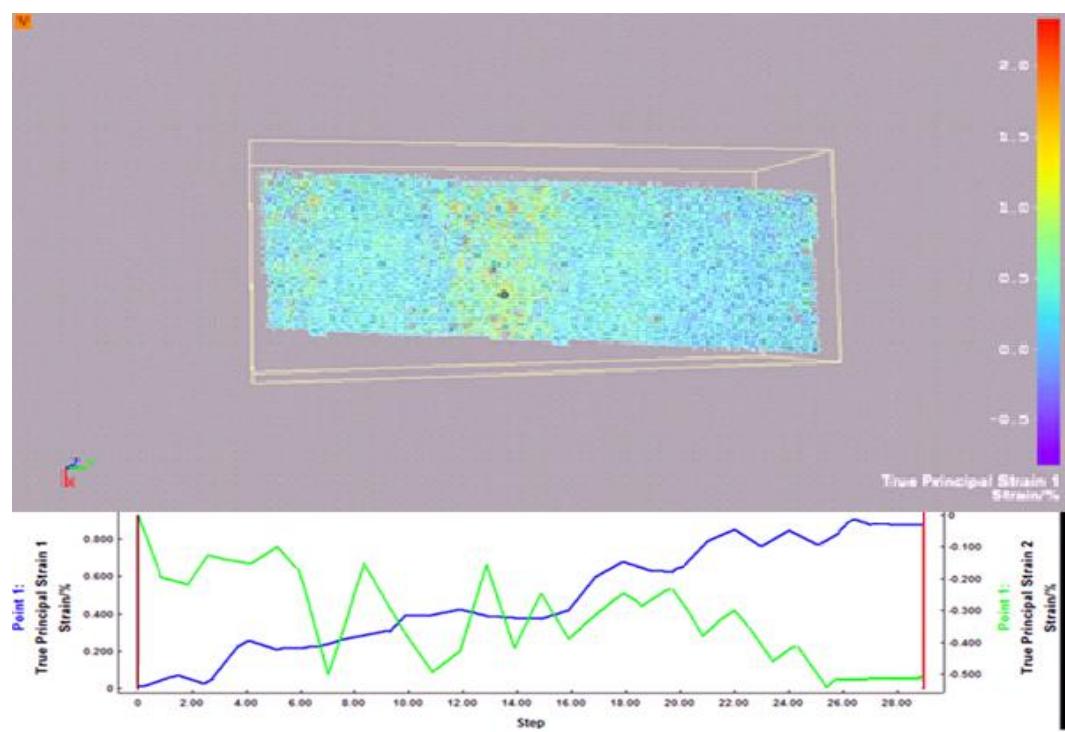


**Fig. 4.43** Rezultatul obținut în urma operațiunii de expandare

Pe parcursul operațiunii de expandare, au fost monitorizate două zone. Prima corespunzătoare zonei cu deformațiile cele mai mari din etapa obținerii formei "O", iar cealaltă reprezintă restul. În continuare în figura 4.44 sunt prezentate evoluția deformațiilor în zona cea mai deformată, iar în figura 4.45 zona cu deformații uniforme.



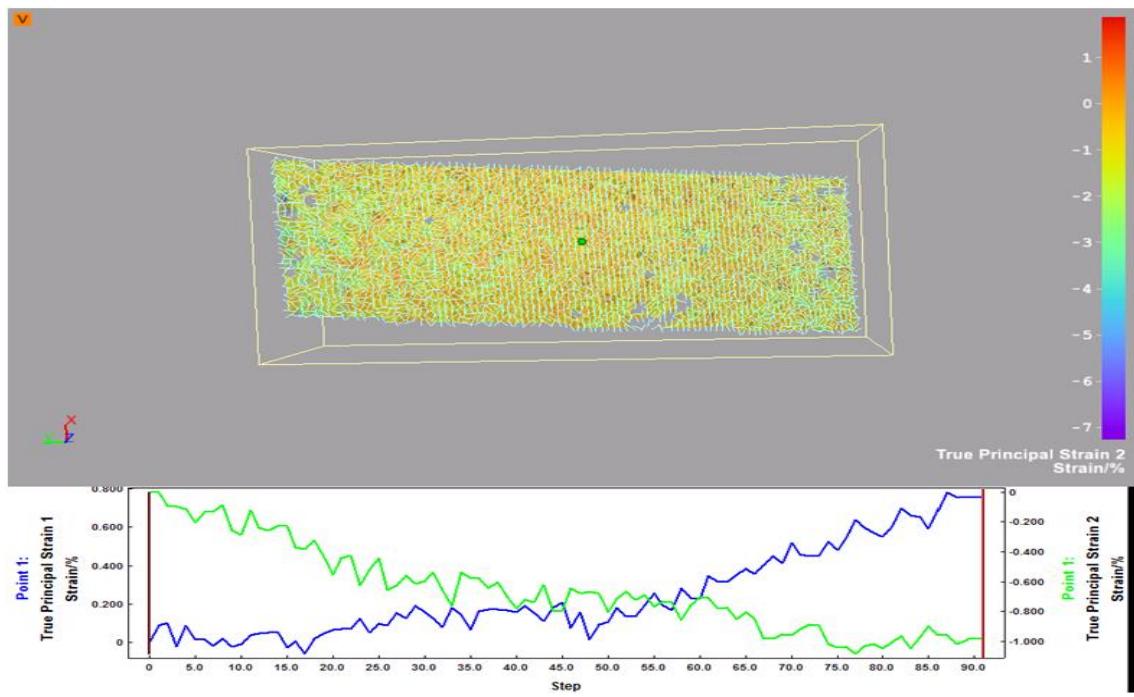
Epruveta 1X60



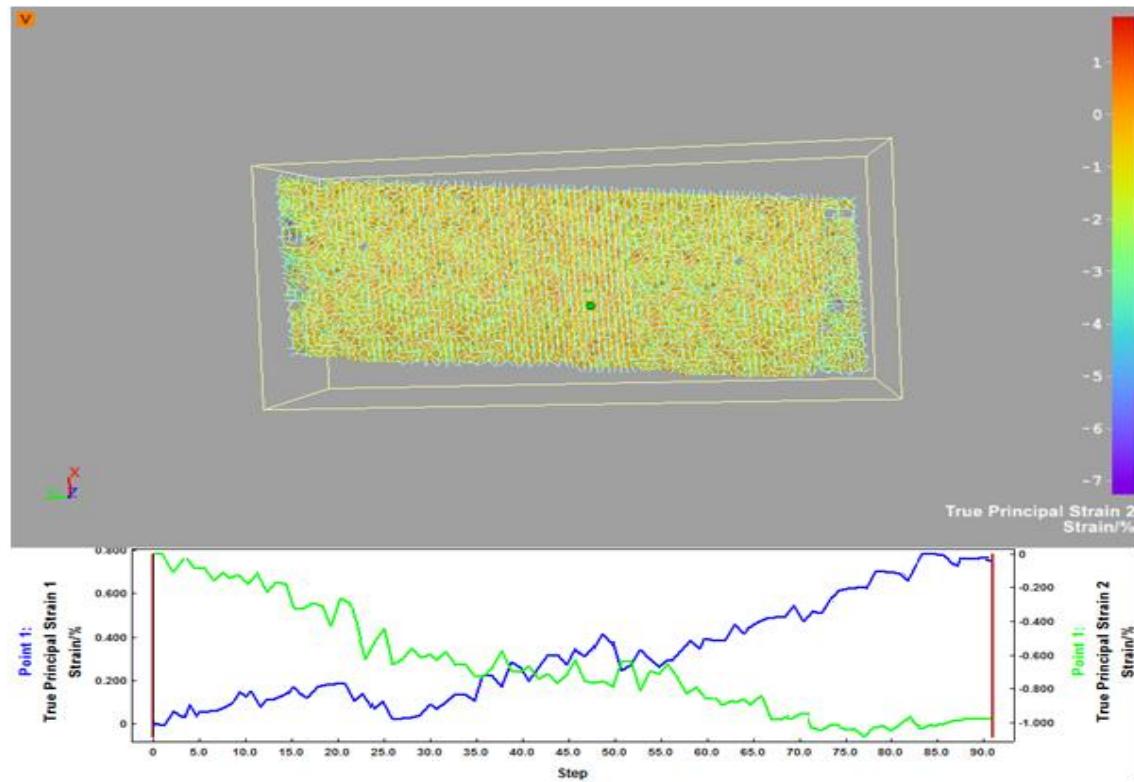
Epruveta 2X60

**Fig. 4.44** Rezultatele deformațiilor măsurate în urma expandării mecanice pentru zona cu deformatii vizibile

Curba albastră – deformația principală 1 Curba verde – deformația principală 2



Epruveta 1X60



Epruveta 2X60

**Fig. 4.45** Rezultatele deformațiilor măsurate în urma expandării mecanice

Curba albastra – deformația principală 1

Curba verde – deformația principală 2

După derularea etapei și efectuării măsurătorilor, valorile maxime a deformațiilor care au rezultat în urma expandării sunt următoarele:

### **Zonele cu deformații mari**

Epruveta 1X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{E\max}^1 = 0,93\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{E\max}^2 = -0,56\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{E\text{rez}}^1 = 0,88\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{E\text{rez}}^2 = -0,53\%$ ;

Epruveta 2X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{E\max}^1 = 0,96\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{E\max}^2 = -0,54\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{E\text{rez}}^1 = 0,91\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{E\text{rez}}^2 = -0,51\%$ ;

### **Zonele fără deformații mari**

Epruveta 1X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{E\max}^1 = 0,79\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{E\max}^2 = -1,08\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{E\text{rez}}^1 = 0,76\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{E\text{rez}}^2 = -0,95\%$ ;

Epruveta 2X60:

- deformația principală 1  $\varepsilon_{E\max}^1 = 0,80\%$ ;
- deformația principală 2  $\varepsilon_{E\max}^2 = -1,28\%$ ;
- deformația reziduală 1  $\varepsilon_{E\text{rez}}^1 = 0,74\%$ ;
- deformația reziduală 2  $\varepsilon_{E\text{rez}}^2 = -0,98\%$ ;

Deforamațiile totale  $\varepsilon_{\text{rez}}^{\text{tot}}$  ce rămân după procesul tehnologic în zona cu deformații mari, au următoare formă:

$$\varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}} = \varepsilon_{O\text{rez}} + \varepsilon_{E\text{rez}} \quad (4.39)$$

Valorile deformațiilor prezentate mai sus reprezintă suma deformațiilor reziduale după obținerea formei „O”  $\varepsilon_{O\text{rez}}$  plus cele reziduale rezultate după operațiunea de expandare  $\varepsilon_{E\text{rez}}$ .

#### Epruveta 1X60:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}-1} &= 3,01\% + 0,88\% = 3,89\% \\ \varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}-2} &= 3,18\% + 0,53\% = 3,71\%\end{aligned}$$

#### Epruveta 2X60:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}-1} &= 3,08\% + 0,91\% = 3,99\% \\ \varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}-2} &= 3,28\% + 0,51\% = 3,79\%\end{aligned}$$

Valoarea deformației  $\varepsilon_{E\text{rez}}^{\text{tot}-1} = 3,99\%$  din epruveta 2X60 este maximă și reprezintă nivelul deformațiilor ce ramân în corpul țevii după întreg proces tehnologic.

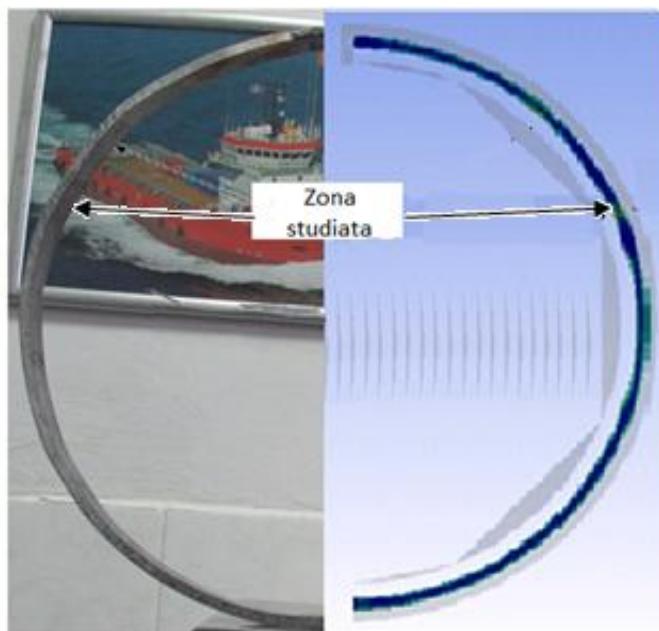
#### 4.4 DETERMINAREA TENSIUNILOR REZIDUALE ÎN URMA STUDIULUI EXPERIMENTAL

Tensiunile reziduale rezultate în urma parcurgerii întregului proces tehnologic sunt esențiale în studiul stării de tensiune și deformație a țevii sudate longitudinal rezultate.

Pentru situația dată, tensiunile reziduale  $\sigma_{rez}$  reprezintă diferența dintre tensiunile maxime rezultate din solicitările tehnologice  $\sigma_{max}$  și cele de revenire  $\sigma_{rev}$  [17].

$$\sigma_{rez} = \sigma_{max} - \sigma_{rev} \quad (4.40)$$

Ultima etapa, cea de expandare, se consideră și cea mai importantă. Operațiunea de expandare constă în calibrarea și uniformizarea tensiunilor pe toată circumferința țevii. Conform standardelor API, țeava este expandată până când diametrul crește cu 0,8%. Calculul tensiunilor reziduale se va efectua pentru zona cu valoarea deformației cea mai mare (Fig. 4.49).



**Fig.4.49** Zona propusă pentru determinarea tensiunilor reziduale

După operațiunea de expandare, deformațiile maxime au următoare formă:

$$\varepsilon_{E\max}^1 = \varepsilon_{0\text{rez}}^1 + \varepsilon_E^1 \quad (4.41)$$

$$\varepsilon_{E\max}^2 = \varepsilon_{0\text{rez}}^2 + \varepsilon_E^2 \quad (4.42)$$

Trebuie menționat faptul că, zona cu deformațiile cele mai mari a ajuns la etapa de expandare cu deformațiile reziduale inițiale aferente etapei de obținere formei „O”. Din cauza aceasta, valorile deformațiilor prezentate mai sus reprezintă suma deformațiilor reziduale după obținerea formei „O”  $\varepsilon_{0\text{rez}}^1$  plus cele maxime rezultate după operațiunea de expandare  $\varepsilon_E^1$ .

Epruveta 1X60:

$$\varepsilon_{E\max}^1 = 3,01\% + 0,93\% = 3,94\%$$

$$\varepsilon_{E\max}^2 = 3,18\% + 0,56\% = 3,74\%$$

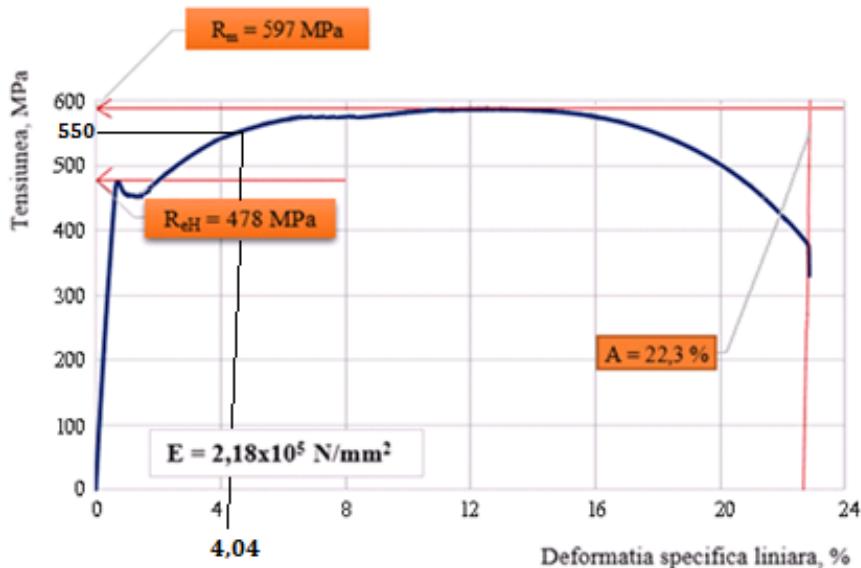
Epruveta 2X60:

$$\varepsilon_{E\max}^1 = 3,08\% + 0,96\% = 4,04\%$$

$$\varepsilon_{E\max}^2 = 3,28\% + 0,54\% = 3,82\%$$

În continuare determinarea tensiunilor reziduale rezultate după operațiunea de expandare se va face față de valoarea maximă a deformației pentru epruveta 2X60, și anume  $\varepsilon_{E\max}^1 = 4,04\%$ .

Tensiunile maxime corespunzătoare zonei (afferente deformațiilor determinate) sunt de  $\sigma_{E\max}^1 = 550 \text{ MPa}$  (Fig. 4.48). Tot aici conform studiului numeric, tensiunea principală maximă  $\sigma_E^{\text{princ}} = 5,5822 \times 10^8 \text{ Pa}$  (558 MPa). Pentru calculul ulterior, se va lăsa în considerare valoarea tensiunilor maxime  $\sigma_{\max} = 550 \text{ MPa}$ .



**Fig. 4.48** Curba caracteristică oțel L 415 MB

Operațiunea de expandare implică acționarea asupra corpului țevii cu o presiune interioară. Cu ajutorul formulei inginerului francez Gabriel Lame tensiunile de revenire  $\sigma_{Erev}$  se vor determina având la bază presiunea exterioară, care trebuie aplicată asupra țevii pentru compensarea presiunii interioare [82], [54]:

$$\sigma_{Erev} = -\frac{p \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) \quad (4.43)$$

unde:

$p$  = presiunea de expandare, [MPa];

$r_1$  = raza interioară, [mm];

$r_2$  = raza exterioară, [mm];

$r$  = raza la care se calculează tensiunea, [mm];

În continuare se vor calcula tensiunile de revenire pentru suprafața interioară și pentru cea exterioară:

Tensiune de revenire pentru suprafața interioară cu raza  $r = 195,2 \text{ mm}$ :

$$\sigma_{Erev} = -\frac{p \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left( 1 + \frac{r_2^2}{r_1^2} \right) = -\frac{14 \cdot 195,2^2}{203^2 - 195,2^2} \left( 1 + \frac{203^2}{195,2^2} \right) = 356 \text{ MPa} \quad (4.44)$$

Tensiune de revenire pentru suprafața exterioară cu raza  $r = 203 \text{ mm}$ :

$$\sigma_{Erev} = -\frac{p \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_2^2}{r^2}\right) = -\frac{14 \cdot 195,2^2}{203^2 - 195,2^2} \left(1 + \frac{203^2}{203^2}\right) = 343 MPa \quad (4.45)$$

Tensiunile reziduale principale rezultate în urma expandării au următoarele valori:

Epruveta 2X60 pentru suprafața exterioară:  
 $\sigma_{Erez}^1 = \sigma_{Emax}^1 - \sigma_{Erev} = 550 - 343 = 207 MPa \quad (4.46)$

Epruveta 2X60 pentru suprafața interioară:  
 $\sigma_{Erez}^1 = \sigma_{Emax}^1 - \sigma_{Erev} = 550 - 356 = 194 MPa \quad (4.48)$

În urma efectuării operațiunii de expandare au rezultat următoarele tensiuni reziduale maxime:

Epruveta 2X60 pentru suprafața exterioară :

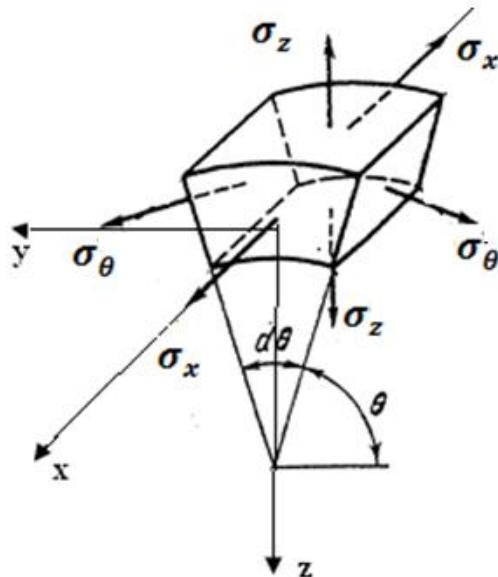
$\sigma_{Erez}^1 = 207 MPa$  ceea ce reprezintă 43% din  $\sigma_c = 478 MPa$

Epruveta 2X60 pentru suprafața interioară :

$\sigma_{Erez}^1 = 194 MPa$  ceea ce reprezintă 40% din  $\sigma_c = 478 MPa$

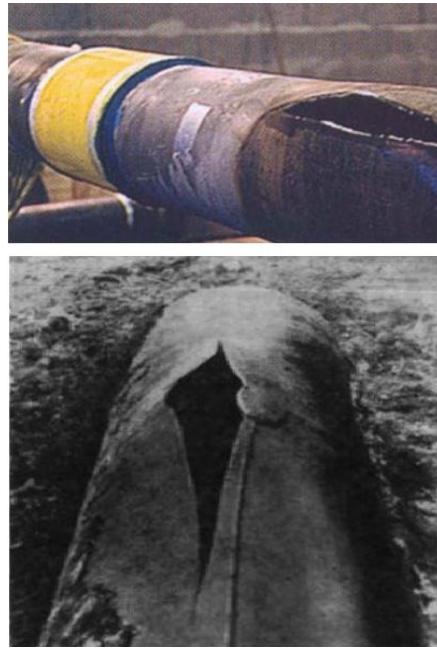
#### 4.5 VALIDAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Tensiunile reziduale, rezultate în urma parcuregrii tuturor etapelor tehnologice, sunt tensiuni circumferențiale  $\sigma_\theta$ , deoarece s-au produs deformații plastice pe direcția circumferențială. Valoarea tensiunilor circumferențiale  $\sigma_\theta$  într-o țeavă încărcată cu presiune interioară, sunt mult mai mari decât valoarea tensiunilor axiale  $\sigma_x$  (Fig. 4.50) [51].



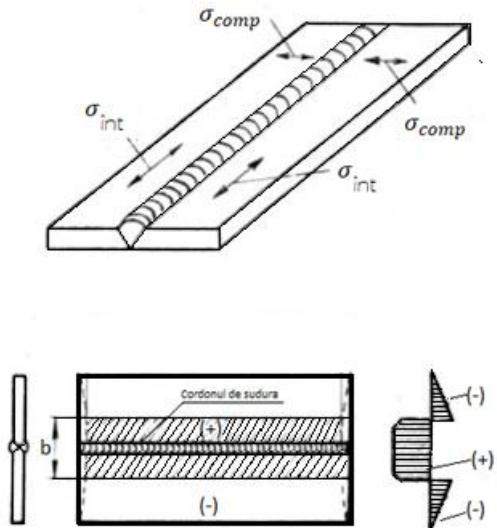
**Fig. 4.50** Distribuția tensiunilor în corpul unei țevi

Din cauza aceasta, eventualele fisuri în corpul unei țevi sunt cauzate de tensiuni circumferențiale și sunt propagate pe direcția generatoarei (Fig. 4.51).



**Fig. 4.51** Poziția fisurii pe suprafața exterioară unei țevi

Un element important îl reprezintă faptul că țeava sudată longitudinal (conducta magistrală) este o construcție sudată. Tensiunile reziduale rezultate din procesul de sudare se împart în două categorii (Fig. 4.52): tensiuni de întindere  $\sigma_{int}$ , ce se regasesc în cordonul de sudură și tensiuni de compresiune  $\sigma_{comp}$ , ce acționează în vecinătatea cordonului de sudură.



**Fig. 4.52** Distribuția tensiunilor reziduale în cordonul de sudură

În cazul de față, tensiunile reziduale din cordonul de sudură au o corespondență cu tensiunile din corpul țevii și anume tensiuni de întindere  $\sigma_{int}$  corespund cu tensiuni axiale  $\sigma_x$ , iar tensiunile de compresiune  $\sigma_{comp}$  corespund cu tensiuni circumferențiale  $\sigma_\theta$ . Rolul tensiunilor reziduale în rezistență la oboseală a cordoanelor de sudură crește semnificativ cu creșterea zonelor de concentrație a tensiunilor reziduale [32]. Din cauza aceasta, tensiunile rezultate în urma solicitărilor ciclice + tensiunile rezultate în urma proceselor de fabricație + cele rezultate în urma procesului de sudare, pot modifica poziția palierului de curgere.

În continuare în tabelul 4.11 și respectiv 4.12 sunt trecute valorile deformațiilor și tensiunilor principale incluzând și erorile care de fapt reprezintă diferența dintre valorile obținute prin studiului experimental cu cele obținute prin studiul numeric.

**Tab. 4.11 Valorile deformațiilor principale rezultate în urma procesului tehnologic**

Deformații		Studiul numeric [10 <sup>-3</sup> ] $\frac{m}{m}$	Studiul experimental [10 <sup>-3</sup> ] $\frac{m}{m}$	Eroarea [%]
J	$\varepsilon_{Jrez}$	2,22	2,66	16
U	$\varepsilon_{Urez}$	2,47	2,62	6
O	$\varepsilon_{Orez}$	3,78	3,28	13
E	$\varepsilon_{Erez}$	3,62	3,99	9

**Tab. 4.12 Valorile tensiunilor principale reziduale rezultate în urma procesului tehnologic**

Tensiuni principale		Studiul numeric [MPa]	Studiul experimental [MPa]	Eroarea [%]
E	$\sigma_{rez}^{princ}$	183	207	11

In urma cercetărilor experimentale efectuate prin metoda CDI am obținut mărimele deformațiilor reziduale.

In tabelul 4.11 sunt prezentate valorile deformațiilor rezultate în urma studiului numeric și cele rezultate în urma studiului experimental.

Se observă că diferențele dintre valorile deformațiilor studiului numeric cu cele ale studiului experimental sunt cuprinse între 6% și 16% pentru diferitele etape tehnologice.

Deformațiile rezultate în urma studiului experimental au stat la baza determinării tensiunilor, utilizând diagrama caracteristică.

In tabelul 4.12 se prezintă valorile tensiunilor determinate prin studiul experimental și cele rezultate în urma studiului numeric.

Se constată că diferențele între valorile experimentale și cele numerice variază în intervalul cuprins între 6-16%.

Valorile diferențelor tensiunilor la finalul operațiilor tehnologice (după operația de expandare) este de 11%.

Se poate deci concluziona ca cercetările experimentale au validat într-un grad de acuratețe ridicat cercetările teoretice.

#### 4.6 CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

În acest capitol mi-am propus realizarea unui studiu experimental și comparativ al deformațiilor și tensiunilor reziduale ce rămân inițial în tablă și apoi în corpul țevii după principalele etape tehnologice. Aportul propriu a constat din următoarele:

- calculul tensiunilor reziduale generate în procesul tehnologic de fabricație a țevilor sudate longitudinal;
- modelarea etapelor din cadrul procesului tehnologic de fabricație a țevilor sudate longitudinal prin metoda elementului finit;
- determinarea experimentală prin metodă optică nedestructivă CDI a deformațiilor din țevile sudate longitudinal;
- proiectarea echipamentelor necesare procesului tehnologic de obținere a țevilor sudate longitudinal.

Studiul experimental a scos în evidență următoarele aspecte:

- S-a constatat că valorile deformațiilor obținute în urma etapei de îndoiere a marginilor sunt mai mici în comparație cu cele rezultate din celelalte etape,
- În schimb, la etapa obținerii formei "U" s-au produs deformații mai mari, dar având în vedere că suprafața mai mare raportată la acele deformații.
- La etapa obținerii formei „O”, semifabricatul trece din forma plană în cea circulară. În urma acestei etape tehnologice se obține o țeavă cu multiple deformații pe circumferință, dar având în vedere faptul că raza de curbură s-a mărit, valorile deformațiilor obținute s-au mărit în comparație cu etapa precedentă. Tot aici a ieșit în evidență zona cu deformațiile cele mai mari;
- Ultima etapa, cea de expandare reprezintă momentul în care țeava este calibrată și se produce o uniformizare a tensiunilor pe toată circumferința țevii. Cu toate acestea, zonele în care s-au produs deformațiile cele mai mari, după operațiunea de expandare au rămas zonele cu concentrații de tensiune. Valorile tensiunilor din aceste zone, este  $\sigma_{rez}^{princ} = 207 MPa$ . Acestea din urmă împreună cu solicitările de exploatare, pot influența negativ starea de tensiuni și deformații ale conductelor magistrale construite.

## CAPITOLUL 5.

# CERCETĂRI PRIVIND EFECTUL EXPANDĂRII ASUPRA Tensiunilor reziduale din țevile sudate longitudinal JUOE

### 5.1 ANALIZA REZULTATELOR CERCETĂRII

Prin cercetările experimentale privind determinarea tensiunilor și deformațiilor reziduale în țevile sudate longitudinal descrise în capitolul 4, a fost validat modelul teoretic de determinare al tensiunilor și deformațiilor din țevile sudate longitudinal descris în capitolul 3.

Având în vedere validarea modelului teoretic privind determinarea tensiunilor și deformațiilor din țevile sudate longitudinal putem efectua cercetări în vederea determinării nivelului tensiunilor reziduale pentru diferite valori ale ratei de expandare.

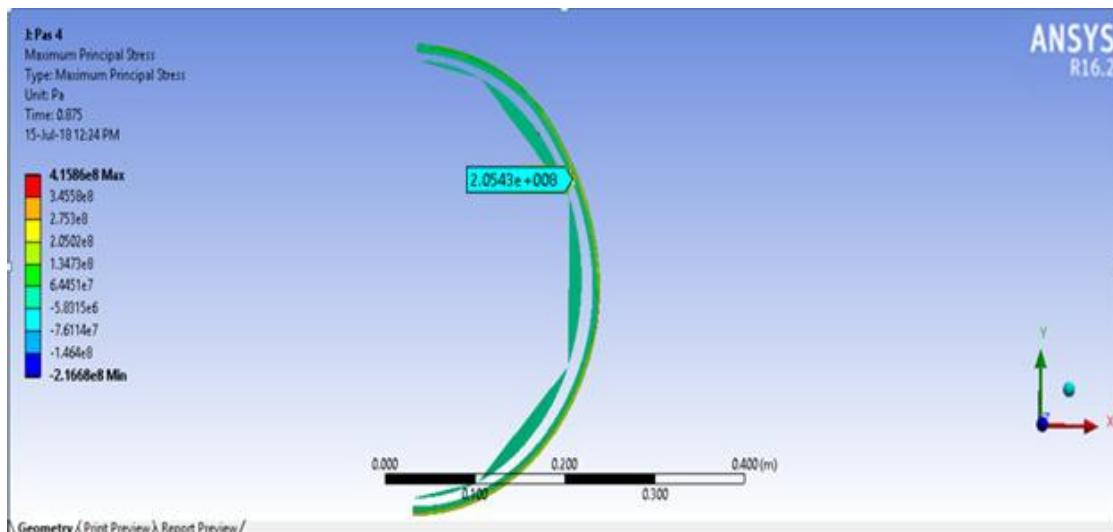
Cercetările teoretice inițiale precum și cele experimentale au fost realizate pentru o rată de expandare  $r_E = 0,8\%$ .

Standardele API Spec. 5 L, recomandă valori ale ratei de expandare cuprinde între 0,3 și 1,5 % [75]. În cele ce urmează vom studia tensiunile pentru ratele de expandare de 1,0%, 1,2% și 1,4%.

#### 5.1.1 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,0%

Vom determina tensiunea reziduală aferentă unei rate de expandare  $r_E = 1,0\%$ , pe care o vom nota cu  $\sigma_{1,0}$ . Trebuie menționat că, țeava după obținerea formei "O" este supusă expandării.

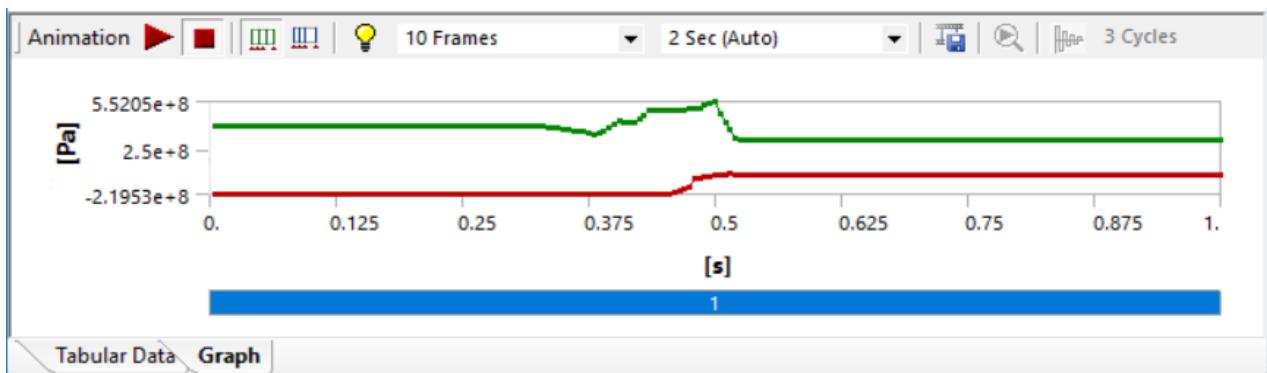
Rezultatul obținut este prezentat în figura 5.1.



**Fig. 5.1** Distribuția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,0}$ 

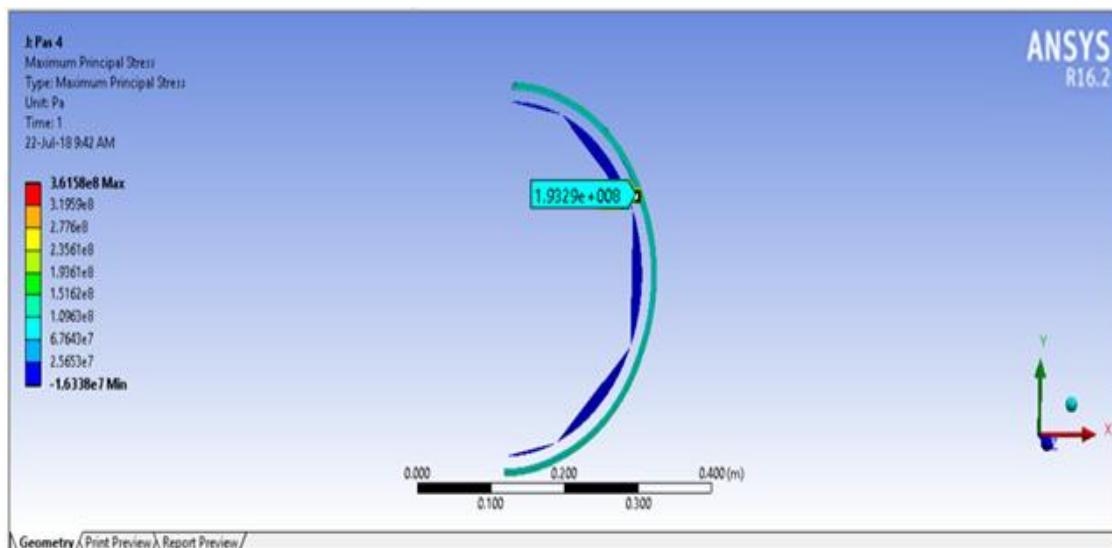
După simularea procesului de expandare realizată în programu Ansys 16.2, s-a obținut valoarea maximă a tensiunilor principale reziduale, de  $4,1586 \times 10^8$  Pa (415 MPa), dar aceasta valoarea nu poate fi luată în considerare deoarece ea se datorează și efectului erorilor de discretizare. În acest caz, valorile tensiunilor principale reziduale în zona cea mai deformată este de  $2,0543 \times 10^8$  Pa (205 MPa).

În continuare, în figura 5.2, este prezentat graficul tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,0}$ .

**Fig. 5.2** Graficul tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,0}$ 

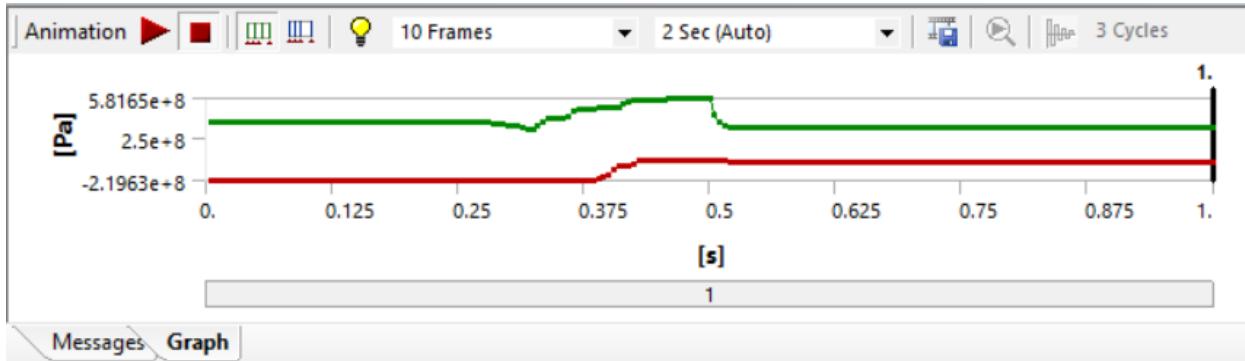
### 5.1.2 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,2%

Pasul următor reprezintă momentul în care țeava este expandată cu o rată de 1,2%. În cazul de față, diametrul exterior al țevii este marit cu 4,8768 mm sau 2,4384 mm pe jumătatea simetrică a țevii. Rezultatul obținut este prezentat în figura 5.3.

**Fig. 5.3** Distribuția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,2}$ 

Valoarea maximă tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,2}$ , obținută după rularea procesului de expandare este de  $3,6158 \times 10^8$  Pa (361 MPa). La fel ca în cazul prezentat mai sus,

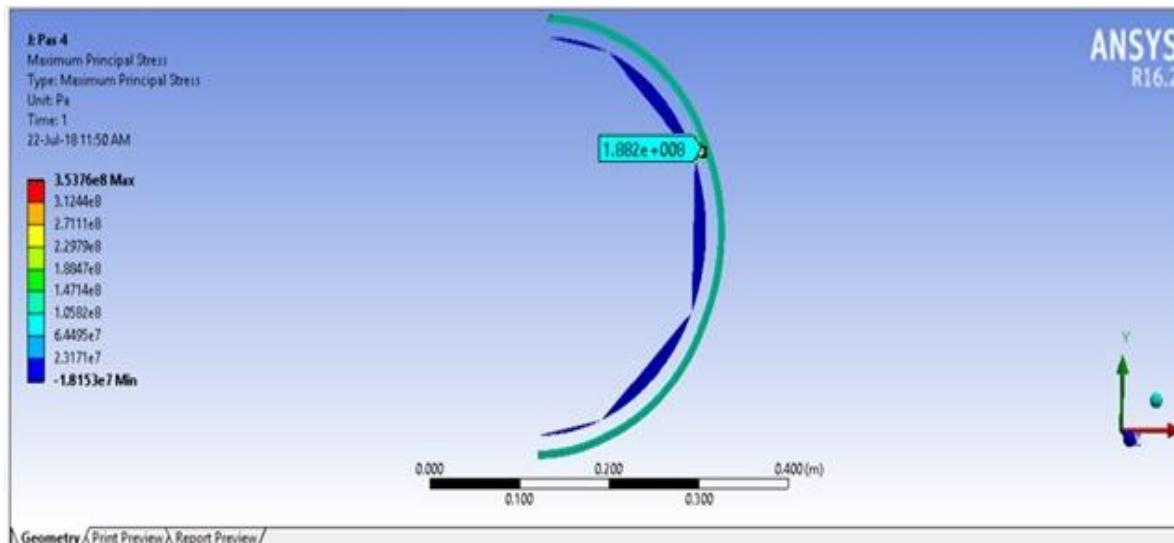
această valoarea reprezintă eroare de discretizare. Valorile tensiunilor principale reziduale se situeză în jurul valorii de  $1,9329e8$  Pa (193 MPa). În urma rulării operațiunii de expandare la două valori diferite, se observă o uniformizare a distribuției tensiunilor principale. În figura 5.4, este prezentată evoluția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,2}$ .



**Fig. 5.4** Evoluția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,2}$

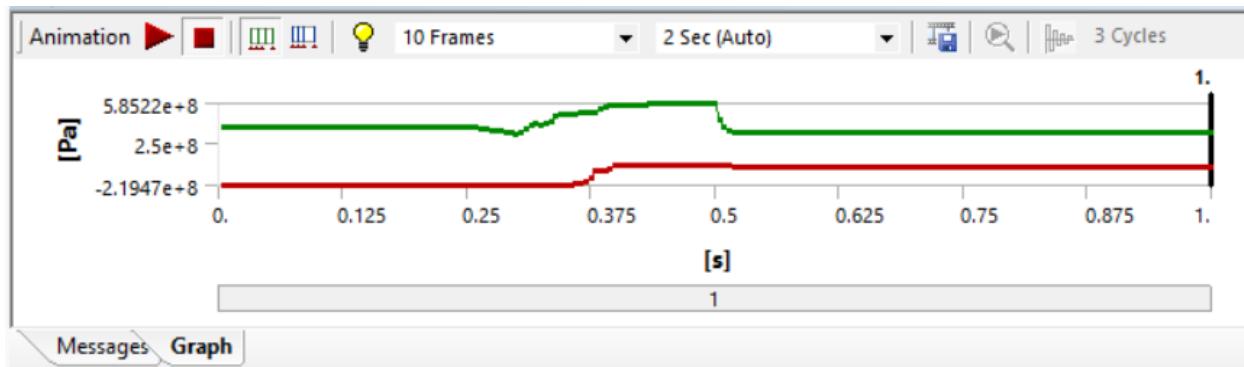
### 5.1.3 Expandarea țevii JUOE la o rată de 1,4%

Ultimul pas este acela de a expada diametrul exterior al țevii cu o rată de 1,4%. În momentul respectiv diametrul este mărit cu o valoare de 5,6896 mm, respectiv 2,8448 mm pentru jumătatea simetrică. Rezultatul obținut este prezentat în figura 5.5.



**Fig. 5.5** Distribuția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,4}$

Tensiunile principale  $\sigma_{1,4}$ , obținute în urma simulării, au valoarea maximă de  $3,5376e8$  Pa (353 MPa), la fel ca și în etapele anterioare, reprezintă erori de discretizare. Valorile tensiunilor principale în zonele cele mai deformate se situeză în jurul valorii de  $1,882e8$  Pa (MPa). În figura 5.6 este prezentată evoluția tensiunilor principale începând cu etapa inițială.

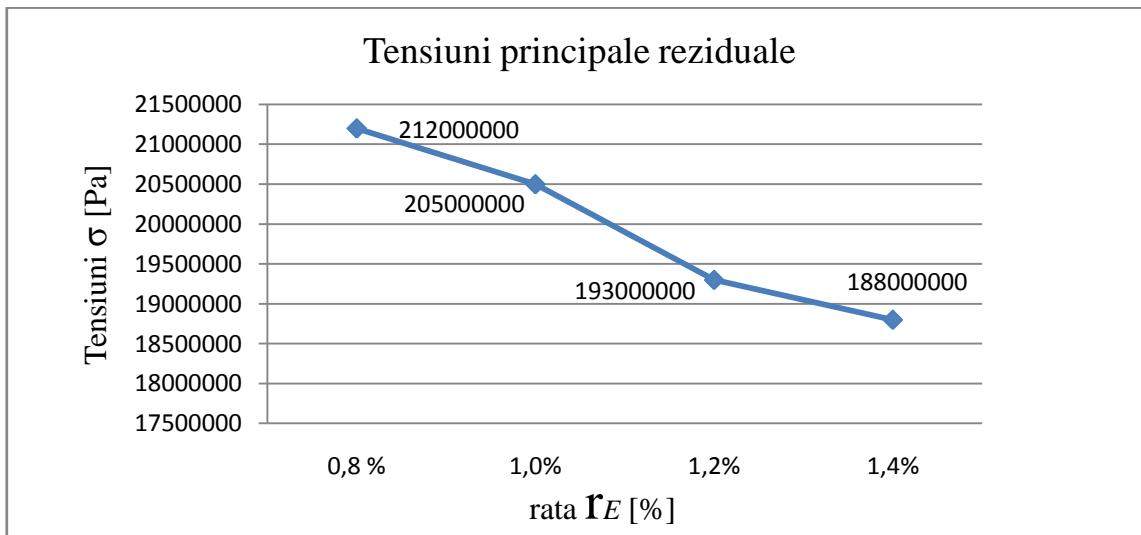


**Fig. 5.6** Evoluția tensiunilor principale reziduale  $\sigma_{1,4}$

## 5.2 CONCLUZII

Operațiunea de expandare este o etapă finală care influențează fiabilitatea conductei ce urmează a fi construite. În urma modelării procesului de expandare a țevilor sudate longitudinal cu DN 400, s-au elaborat trei modele cu elemente finite, și anume: expandarea cu rata de 1,0%, expandarea cu rata de 1,2%, expandarea cu rata de 1,4%.

Pentru fiecare caz s-au determinat tensiunile principale reziduale  $\sigma$ . Pe baza rezultatelor obținute s-a construit graficul de mai jos (Fig.5.7).



**Fig.5.7** Variația tensiunilor principale reziduale în funcție de rata de expandare  $r_E$

Pe baza alurii obținute din figura 5.7 se poate confirma faptul că rata nivelului tensiunilor reziduale este invers proporțională cu valoarea ratei de expandare. De asemenea, se observă și o uniformizare a tensiunilor reziduale pe circumferința țevii (Fig. 5.1 și Fig. 5.5). Tot aici se observă faptul că, valoarea tensiunilor reziduale din zonele puternic deformate reprezintă valorile destul de ridicate față de limita de curgere ( $\sigma_c = 478 \text{ MPa}$ ), iar riscurile descrise în capitolele anterioare pot influența negativ fiabilitatea conductelor magistrale construite ulterior.

Rezultatele cercetărilor efectuate demonstrează necesitatea luării în calcul nivelul tensiunilor reziduale din corpul țevii sudate longitudinale. Acestea influențează direct fiabilitatea conductelor magistrale.

## CAPITOLUL 6.

### CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI PRACTICE

#### 6.1 ANALIZA REZULTATELOR CERCETĂRII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Scopul tezei de doctorat este cercetarea analitică, numerică și experimentală a stării de tensiune și deformație a semifabricatului după fiecare etapă din procesul de fabricație.

În urma efectuării cercetărilor teoretice și experimentale privind tensiunile reziduale din țevile sudate longitudinal s-au desprins următoarele concluzii:

1. Una dintre țintele cercetărilor o reprezintă găsirea unui echilibru dintre următorii parametrii: presiunea de lucru  $p_{max}$ , ovalitatea  $\Delta_o$  și valoarea expandării la care este supusă țeava, deoarece expandarea reduce ovalitatea țevii, dar în același timp reduce și proprietățile mecanice de compresiune. În această situație expandarea redice ovalitatea care însă nu este un factor important. Practică curentă de expandare țevii cu 1% tinde să reducă proprietățile mecanice pentru toate cazurile studiate. În urma efectuării studiilor s-a ajuns la concluzia că valorile presiunii maxime de lucru  $p_{max}$  sunt dependente de parametrul de expandare  $\varepsilon_E$ , și cu cât parametrul de expandare  $\varepsilon_E$  crește cu atât valoarea presiunii maxime de lucru  $p_{max}$  scade.

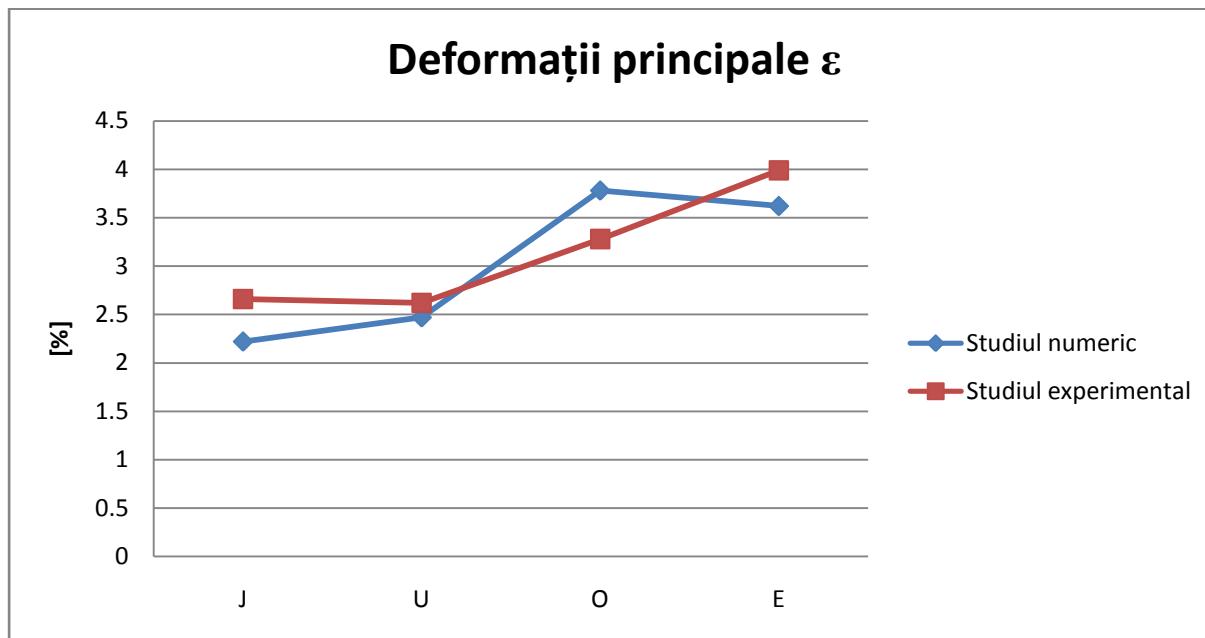
2. Cercetările teoretice au scos în evidență faptul că tensiunea normală axială din placa semifabricat dreptunghiulară  $\sigma_y$  devine tensiunea circumferențială în învelișul cilindric  $\sigma_\theta$ . Cum s-a discutat și în capitolul precedent o atenție mare a fost dedicată ultimei etape tehnologică, cea de expandare, atunci când se produc deformații plastice pe direcția circumferențială. Cea mai mare parte a tensiunilor reziduale sunt induse de operațiunea de expandare și cu toate că aceste valori sunt mai mici decât tensiunea de rupere, este posibil ca aceste tensiuni reziduale însumate cu cele rezultate din exploatare să depășească tensiunea de rupere  $\sigma_r$ .

3. Cercetările teoretice efectuate privind tensiunile reziduale apărute după fiecare dintre etapele procesului de fabricație a țevilor sudate longitudinal prin metoda JUOE, au identificat zonele în care acestea apar și valoarea lor.

4. În vederea validării modelului experimental realizat folosind metoda elementelor finite, am efectuat cercetări experimentale utilizând metoda Corelării Digitale a Imaginii. Aceasta ne-a permis măsurarea deformațiilor după fiecare etapă tehnologică. În urma efectuării măsurării deformațiilor s-a constatat faptul că marja de eroare dintre studiul numeric și cel experimental este cuprinsă în intervalul 8% -16%. Aceste diferențe se pot vedea în figura 6.1. Tot aici, intersecția celor două curbe reprezintă faptul că nu există eroarea sistematică de masurare.

După obținerea formei "O", atât la studiul numeric cât și la cel experimental, s-a observat poziționarea aproape identică a zonelor cu deformații mari.

În placa semifabricat de formă dreptunghiulară, deformațiile se produc pe direcția axei y. Ca urmare a deformațiilor plastice apar tensiunile reziduale  $\sigma_y^{rez}$ . Trebuie subliniat faptul că aceste tensiuni  $\sigma_y^{rez}$  din placă pe parcursul procesului tehnologic devin tensiuni circumferențiale  $\sigma_\theta^{rez}$  din corpul țevii. O atenție mare a fost dedicată ultimei etape tehnologică, cea de expandare, atunci când se produc deformații plastice pe direcția circumferențială. Ca urmare aceste tensiuni reziduale  $\sigma_\theta^{rez}$  sunt cele mai mari.



**Fig.6.1** Deformațiile principale rezultate în urma studiului numeric și celui experimental

5. Pe baza alurei obținute din cercetările efectuate, se poate confirma faptul că rata nivelul tensiunilor reziduale este invers proporțională cu valoarea ratei de expandare. De asemenea, se observă și o uniformizare a tensiunilor reziduale pe circumferința țevii.

În afara beneficiilor prezentate, operațiunea de expandare ce are la bază deformăția plastică a materialului, prezintă anumite particularități:

- pe parcursul operațiunii de expandare, în corpul țevii apar tensiuni ce depășesc limita de curgere a materialului și în unele momente chiar se apropiie de rezistența la rupere al oțelului;
- zonele în care s-au produs deformații majore datorită procesului de fabricație, prezintă concentrații de tensiune și după operațiune de expandare, ceea ce poate duce la apariția microfisurilor;

Studiul complex privind influența tehnologiei de fabricație a țevilor sudate longitudinal oferă posibilitatea, începând cu etapa proiectării conductelor magistrale, să se realizeze recomandări și soluții practice de evitare a distrugerii conductelor magistrale pe parcursul perioadei de funcționare.

Începând cu etapa proiectării și continuând cu construcția conductelor magistrale, se recomandă poziționarea zonelor cu un nivel ridicat de tensiuni reziduale în locații unde există un nivel scăzut al tensiunilor de exploatare.

Având la bază studiul efectuat, pentru reducerea influenței zonelor cu tensiuni reziduale, apărute în urma procesului de fabricație a țevilor, este necesară poziționarea zonei cordonul de sudură în zone cu tensiuni de compresiune, care se determină prin efectuarea calculului de verificare la rezistență statică.

## 6.2 PERSPECTIVE DE CERCETARE

1. Studiul de cercetare prezentat în această lucrare a scos în evidență un element important ce influențează integritatea țevilor sudate longitudinal. Operațiunea de expandare este acel element care lungește sau scurtează perioada de exploatare a conductelor magistrale. Alegerea valorilor optime de expandare care să reprezinte un echilibru între presiunea de lucru și ovalitatea constituie subiectul de perspectivă pentru cercetarea domeniului conductelor magistrale. Toate acestea sunt posibile după calibrarea modelului matematic.

2. Un fenomen care este destul de puțin studiat îl reprezintă fisurarea corozivă sub tensiune (Stress Corrosion Cracking). Fisurare corozivă sub tensiune este produsă de o influență combinată a tensiunilor din corpul țevii și a mediului coroziv. Acest fenomen a fost studiat prima dată de către savanții canadieni în perioada 1953-1982 și s-a constatat că perioada de incubație este cuprinsă între 15 – 45 de ani. În prezent, relația între fisurare corozivă sub tensiune și concentrațiile de tensiune din corpul țevii este foarte puțin studiată, deoarece în procesele verbale de avariere a conductelor magistrale este trecută doar presiunea de lucru la momentul avarierii. Tensiunile ce apar în momentul fabricării, transportării, construcției sau din timpul exploatarii conductelor magistrale, dar și corozivitatea solului nu se iau în considerare. Din cauza aceasta nu se determină elementele componente ce au influențat zona avariată.

3. O altă temă de cercetare de perspectivă o constituie îmbunătățirea și eficientizarea echipamentelor tehnologice ce fac parte din lanțul tehnologic JUOE. Chiar pentru acest subiect se propune proiectarea unui echipament universal ce va scurta timpul de fabricație al unei țevi sudate longitudinal, dar va reduce și numărul zonelor cu concentrații de tensiune. Consideram a fi de interes studiul detensionării țevilor sudate longitudinal prin vibrații, deoarece tratamentul termic implică costuri mari ce au efecte economice negative.

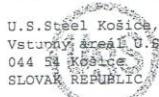
4. Un alt potențial subiect de cercetare, îl reprezintă influența tensiunilor induse de temperaturile scăzute pentru conductele magistrale care traversează zonele arctice.

5. În cazul conductelor submarine se impune efectuarea de cercetări privind influența presiunii hidrostatice și a influenței curenților marini.

## ANEXE

### A 1: Certificatul metalurgic a oțelului L 415 MB – EN 10208-2/09

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1



U.S. Steel Košice, s.r.o.  
Vstupný areál U.S. Steel  
044 54 Košice  
SLOVAK REPUBLIC

Code: 7B7P8AK4/01  
Works Order No: XC410869  
Advice No: 14/415842 01  
Your order: A582

DAEWOO INTERNATIONAL  
CORPORATION  
84-11, Namdaemunno 5 (o)-ga, J  
100-753 SEOUL  
Korea South

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 14/415842 01

Desc. of goods: HOT ROLLED STEEL COILS		Size: 7,800 x 1250,0 mm EN 10051/10
Standard: EN 10208-2/09		Net Weight: 17 830 kg
Quality: L415MB	Spec. No: 20520702	

Unit No	Coil No	Heat	Unit No	Coil No	Heat
4161006	4161006	41610			

#### M E C H A N I C A L T E S T R E S U L T S

	Coil No
Min. / Max.	4161006
Tensile strength-Rm(2) (MPa)	520/ 576
Impact en. KV 0°C-average e(2) (J)	40/ 224
Impact en. KV1 0 C(2) (J)	/ 226
Impact en. KV2 0 C(2) (J)	/ 223
Impact en. KV3 0 C(2) (J)	/ 224
Yield point-Rt0,5(2) (MPa)	415/565 510
Rt0,5/Rm(2) (UNS)	/0,90 0,88
DWTT 0°C, average(2) (%)	85/ 100
Elongation A5(2) (%)	18,0/ 28,0
Direction: (2)-longitudinal;	

#### C H E M I C A L C O M P O S I T I O N, %

	Heat No		Heat No
Min. / Max.	41610		41610
C	/0,16 0,08		Mn /1,60 1,26
Si	/0,45 0,24		P /0,025 0,009
Al	0,015/0,059 0,045		N /0,012 0,007
S	/0,020 0,001		Cr /0,30 0,02
Cu	/0,25 0,01		CEV /0,420 0,303
Mo	/0,100 0,002		Nb /0,050 0,042
Ni	/0,30 0,01		Ti /0,060 0,019
"	/0,080 0,042		F05 /0,150 0,103
F11	2,000/ 6,716		F05=Nb+V+Ti
F11=A1/N			

On the basis of the IAEA recommendation allowed limit of weight-based activity of a heat sample amounts up to 300 Bq/kg.

272 Last Page: 1  
F-USM/0063-04/10-01-12

The measured weight-based activity of Co60 + Cs137 radionuclide is not higher than 100 Bq/kg.

Košice: 27.02.2014, 7:30:56 THE MATERIAL IS IN COMPLIANCE WITH ORDER REQUIREMENTS.

JOZEF ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE. e-mail:jcervenak@sk.uss.com, tel.:+421-55-6737464

DARINA BERNÁTOVÁ, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE.e-mail:dbernatova@sk.uss.com,tel.:+421-55-6732373

U. S. Steel Košice, s.r.o. 02  
 Vstupný areál U. S. STEEL  
 Odbor Analýzy kvality a špecifikácie  
 Uvoľňovanie výrobkov a Hutmé atesty  
 044 54 Košice

## A 2 Valorile deformațiilor obținute în urma studiului experimental

### 1. Indoirea marginilor

Epruveta 1X 60

Epruveta 2X 60

Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2	Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2
	$\varepsilon_j^1 \%$	$\varepsilon_j^2 \%$		$\varepsilon_j^1 \%$	$\varepsilon_j^2 \%$
0	-9.47051e-007	-3.25495e-006	0	-6.21357e-007	-5.47125e-006
1	0.02044	-0.0505616	1	0.01026	-0.0480502
2	0.04978	-0.0512152	2	0.03851	-0.021823
3	0.07541	0.0131815	3	0.07782	0.0131823
4	0.01061	0.00877414	4	0.01121	0.006782
5	0.17944	-0.039778	5	0.18044	-0.022872
6	0.0844	0.00521774	6	0.1606	0.00534012
7	0.07252	-0.0213003	7	0.05252	-0.0094678
8	0.04715	-0.0304111	8	0.03752	0.029679
9	0.17979	-0.0442115	9	0.17155	0.039678
10	0.14789	-0.0079972	10	0.15789	-0.029679
11	0.20324	-0.0398112	11	0.22955	-0.039678
12	0.24554	-0.131097	12	0.26328	-0.0079658
13	0.23013	-0.100918	13	0.27246	-0.082345
14	0.25527	-0.122019	14	0.28074	-0.132082
15	0.42582	-0.151415	15	0.11583	-0.130462
16	0.17587	-0.226876	16	0.18755	-0.123582
17	0.29615	-0.157159	17	0.19814	-0.15342
18	0.28057	-0.142259	18	0.32158	-0.17802
19	0.33628	-0.136784	19	0.43874	-0.1792
20	0.58263	-0.183671	20	0.58373	-0.18001
21	0.22726	-0.201092	21	0.32453	-0.1824

22	0.25943	-0.204888	22	0.24965	-0.189345
23	0.37127	-0.252778	23	0.37459	0.211456
24	0.27358	-0.211014	24	0.27454	-0.203212
25	0.30256	-0.165301	25	0.30358	-0.204216
26	0.30963	-0.21059	26	0.29965	-0.223817
27	0.29205	-0.261855	27	0.30246	-0.214298
28	0.35372	-0.262933	28	0.40537	-0.248123
29	0.35548	-0.255294	29	0.42548	-0.27283
30	0.82274	-0.288503	30	0.80304	-0.27343
31	0.72496	-0.212763	31	0.74583	-0.28842
32	0.71194	-0.243408	32	0.70263	-0.28392
33	0.70005	-0.266858	33	0.71547	-0.27492
34	0.72697	-0.272675	34	0.75842	-0.28933
35	0.80729	-0.320148	35	0.81229	-0.29942
36	0.76498	-0.287161	36	0.74581	-0.30124
37	0.76448	-0.324545	37	0.75612	-0.32422
38	0.79042	-0.322194	38	0.76819	-0.32851
39	0.77721	-0.399255	39	0.79213	-0.34922
40	0.83231	-0.363675	40	0.85361	-0.32133
41	0.55288	-0.443927	41	0.86823	-0.35002
42	0.56006	-0.373667	42	0.88431	-0.38328
43	0.5847	-0.45811	43	0.92862	-0.40321
44	0.67859	-0.543587	44	0.95343	-0.43873
45	0.96354	-0.579404	45	0.97434	-0.47349
46	0.96115	-0.699593	46	0.97854	-0.52583
47	0.9983	-0.669246	47	0.9994	-0.56332
48	1.11361	-0.835103	48	1.01243	-0.72368
49	1.13914	-0.904846	49	1.09623	-0.78622

50	1.28274	-0.899803	50	1.18654	-0.84836
51	1.27846	-1.00201	51	1.24601	-0.89562
52	1.22046	-1.07669	52	1.21932	-0.93673
53	1.27901	-1.20041	53	1.26582	-1.059568
54	1.38656	-1.23693	54	1.36924	-1.13623
55	1.42493	-1.32108	55	1.30394	-1.23822
56	1.51977	-1.4033	56	1.50763	-1.27548
57	1.53863	-1.55468	57	1.56213	-1.36213
58	1.58654	-1.70978	58	1.65409	-1.48322
59	1.68564	-1.82415	59	1.77201	-1.56044
60	1.83463	-1.8952	60	1.79236	-1.68348
61	1.89932	-1.87453	61	1.83421	-1.79667
62	1.84902	-1.91681	62	1.87301	-1.87093
63	1.89741	-1.90459	63	1.89004	-1.88933
64	1.95801	-1.98291	64	1.97804	-1.91624
65	2.17011	-2.03826	65	2.16009	-1.95834
66	2.22167	-2.13463	66	2.25108	-1.98623
67	2.31334	-2.14412	67	2.34821	-2.09343
68	2.39013	-2.14524	68	2.40135	-2.12823
69	2.51948	-2.21009	69	2.45521	-2.1792
70	2.42201	-2.23224	70	2.35202	-2.18001
71	2.57586	-2.26286	71	2.43181	-2.17926
72	2.53413	-2.26597	72	2.5213	-2.30622
73	2.54774	-2.27708	73	2.5818	-2.2483
74	2.60378	-2.27278	74	2.62943	-2.26723
75	2.60062	-2.30023	75	2.71059	-2.28322
76	2.60388	-2.30937	76	2.67841	-2.29822
77	2.57859	-2.31445	77	2.58981	-2.31642

78	2.58127	-2.31481	78	2.62382	-2.30223
79	2.65071	-2.34396	79	2.63822	-2.31842
80	2.62793	-2.30323	80	2.60883	-2.32006
81	2.66675	-2.33481	81	2.64542	-2.33822
82	2.5024	-2.31079	82	2.66524	-2.33648
83	2.73071	-2.34851	83	2.67147	-2.31843
84	2.69215	-2.37038	84	2.67247	-2.31976
85	2.63363	-2.37354	85	2.67363	-2.33722
86	2.67337	-2.38869	86	2.67337	-2.34985
87	2.66857	-2.39962	87	2.67247	-2.2912
88	2.66842	-2.37581	88	2.63847	-2.24136
89	2.66841	-2.37423	89	2.63801	-2.23973
90	2.6684	-2.33098	90	2.63801	-2.23892
91	2.66044	-2.33096	91	2.63026	-2.23874

Obținerea formei "U"

Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2	Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2
	$\varepsilon_U^1 \%$	$\varepsilon_U^2 \%$		$\varepsilon_U^1 \%$	$\varepsilon_U^2 \%$
0	3.65E-08	-5.73E-07	0	2.15E-08	-7.86E-07
1	0.496266	-0.105265	1	0.012548	-0.04341
2	0.447043	-0.196302	2	0.204412	-0.08324
3	0.518998	-0.105869	3	0.520321	-0.17825
4	0.204446	-0.171111	4	0.253420	-0.92232
5	0.259761	-0.0247761	5	0.234412	-1.1286247
6	0.237736	-0.0129913	6	0.078741	-1.2245424
7	0.217435	-0.0714669	7	0.213523	-1.304524

8	0.204178	0.110101	8	0.2813414	-1.014157
9	0.0765748	-0.341578	9	0.323828	-0.154587
10	0.281045	-0.150011	10	0.385412	-1.205247
11	0.277742	-0.153201	11	0.27441	-1.336247
12	0.206208	-0.167557	12	0.161823	-1.172146
13	0.17831	0.020922	13	0.178315	-1.275256
14	0.132371	0.00433784	14	0.167349	-1.183547
15	0.22625	-0.0917615	15	0.323498	-1.152354
16	0.433464	-0.0297549	16	0.518954	-1.124547
17	0.280049	-0.167183	17	0.281542	-1.201457
18	0.295102	0.172264	18	0.285102	-1.256547
19	0.391473	-0.0343994	19	0.329184	-1.092447
20	0.121118	0.0495904	20	0.343425	-1.065214
21	0.225094	0.0151647	21	0.398425	-1.065125
22	0.127018	-0.0307251	22	0.454258	-1.131452
23	0.29051	-0.14071	23	0.436548	-1.212547
24	0.138757	-0.00744752	24	0.534725	-1.265478
25	0.285737	0.063192	25	0.584125	0.0541278
26	0.265465	0.056592	26	0.663526	-1.487821
27	0.270523	-0.131517	27	0.781514	-1.2747562
28	0.395214	0.0742513	28	0.876952	-1.0945234
29	0.210237	-0.218326	29	0.964123	-1.2720145
30	0.346603	0.0998594	30	1.224752	-1.327548
31	0.265431	-0.108771	31	1.184582	-0.825265
32	0.388081	-0.122837	32	1.264525	-1.254251
33	0.328193	0.124461	33	1.227596	-1.363654
34	0.500926	-0.0285008	34	1.218547	-1.274712
35	0.614224	-0.162208	35	1.204523	-1.305472

36	0.53199	-0.394785	36	1.224720	-1.427821
37	0.59062	0.089816	37	1.235489	-1.227854
38	0.655712	-0.218903	38	1.326925	-0.794201
39	0.672582	-0.318584	39	1.131020	-1.319854
40	0.752807	-0.256225	40	1.284121	-1.252145
41	0.773048	-0.28734	41	1.244120	-1.424851
42	0.836677	-0.356531	42	1.226521	-1.454214
43	1.01089	-0.445784	43	1.324725	-1.477821
44	1.12708	-0.386562	44	1.508724	-1.484203
45	0.999251	-0.504277	45	1.324736	-1.494324
46	1.1636	-0.46956	46	1.284725	-1.524235
47	1.37214	-0.542958	47	1.383625	-1.424127
48	1.36391	-0.283771	48	1.318251	-1.52247
49	1.38017	-0.456534	49	1.48456	-1.613487
50	1.28359	-1.46814	50	1.42657	-1.47214
51	1.3134	-1.973717	51	1.22001	-1.487541
52	1.4149	-1.934729	52	1.42654	-1.684321
53	1.50313	-1.801612	53	1.48547	-2.134521
54	1.60649	-1.809589	54	1.53422	-2.186547
55	1.67354	-1.911217	55	1.58301	-2.195324
56	1.78502	-1.923999	56	1.48147	-2.064514
57	1.76225	-1.907679	57	1.50412	-1.925314
58	1.88075	-1.90305	58	1.51412	-2.23784
59	1.85606	-1.90756	59	1.48654	-2.32421
60	2.08764	-2.15671	60	1.49412	-2.18422
61	2.03448	-1.95962	61	1.50302	-2.09478
62	2.08304	-1.91331	62	1.71102	-2.23782
63	2.04917	-1.905461	63	1.63821	-2.22782

64	2.17039	-1.95588	64	1.87614	-2.01324
65	2.15562	-1.91892	65	2.02201	-2.04478
66	2.21023	-2.21162	66	2.06602	-2.38478
67	2.01193	-2.24646	67	2.08647	-2.39782
68	2.15571	-2.12469	68	1.82147	-2.41457
69	2.21321	-2.34401	69	1.62325	-2.43145
70	2.11119	-2.22234	70	1.85541	-2.43452
71	2.10522	-1.82881	71	2.28413	-2.13145
72	2.24033	-1.80439	72	2.32506	-2.40452
73	2.0703	-2.21151	73	2.02421	-2.11428
74	2.17984	-2.20824	74	2.28523	-2.12452
75	2.37875	-2.04745	75	2.29012	-2.16482
76	2.19902	-1.85648	76	2.12305	-2.24347
77	2.27417	-1.82973	77	2.30547	-2.26420
78	2.44953	-2.24409	78	2.51695	-2.12475
79	2.39611	-2.12031	79	2.41421	-2.20768
80	2.2391	-2.26127	80	2.42654	-2.33725
81	2.43891	-2.31777	81	2.49658	-2.46854
82	2.36416	-2.33015	82	2.35453	-2.25457
83	2.40213	-2.31382	83	2.43745	-2.41784
84	2.46471	-2.23104	84	2.42658	-2.19147
85	2.52911	-2.01266	85	2.30254	-2.22452
86	2.23169	-2.02836	86	2.38236	-2.20784
87	2.44223	-1.85826	87	2.43147	-2.20825
88	2.49038	-2.23465	88	2.47325	-2.26354
89	2.60553	-2.28312	89	2.43125	-2.72742
90	2.48928	-2.30311	90	2.48458	-2.25584
91	2.56302	-2.43936	91	2.63369	-2.72547

92	2.43951	-2.11139	92	2.59147	-2.21821
93	2.69691	-2.14116	93	2.35214	-1.92457
94	2.59228	-2.47801	94	2.34325	-2.22514
95	2.52028	-2.48192	95	2.59021	-2.41325
96	2.56511	-2.54953	96	2.52541	-2.235214
97	2.38711	-2.39328	97	2.52458	-2.48524
98	2.7525	-2.49829	98	2.51325	-2.32421
99	2.74861	-2.27145	99	2.49254	-2.24457
100	2.5634	-2.23618	100	2.62478	-2.19478
101	2.75577	-2.12524	101	2.73325	-2.12358
102	2.68507	-2.08917	102	2.56025	-2.17824
103	2.75508	-2.04576	103	2.72258	-2.18458
104	2.6543	-2.32506	104	2.624859	-2.11468
105	2.84362	-2.34771	105	2.73261	-2.23598
106	2.68679	-2.29393	106	2.87142	-2.13875
107	2.76454	-2.30096	107	2.74251	-2.18874
108	2.77983	-2.33409	108	2.53354	-2.28628
109	2.63884	-2.31424	109	2.724752	-2.11845
110	2.57792	-2.32353	110	2.91265	-2.08457
111	2.73937	-2.28166	111	2.62112	-2.18578
112	2.74453	-2.40038	112	2.63324	-2.31748
113	2.87314	-2.48087	113	2.66354	-2.23854
114	2.78123	-2.13288	114	2.72226	-2.50895
115	2.65746	-2.1689	115	2.65452	-2.26478
116	2.89646	-2.34285	116	2.82124	-2.41821
117	2.83034	-2.39793	117	2.73478	-2.52452
118	2.84658	-2.24569	118	2.42354	-2.53451
119	2.64339	-1.925802	119	2.64485	-2.17452

120	2.52028	-2.12653	120	2.63698	-2.32756
121	2.70469	-2.20291	121	2.60321	-2.42487
122	2.69713	-2.54224	122	2.41654	-2.26451
123	2.65174	-2.49159	123	2.52031	-2.29478
124	2.65931	-2.41869	124	2.62145	-2.38954
125	2.60592	-2.43313	125	2.72148	-2.35451
126	2.91568	-2.22718	126	2.74521	-2.32715
127	2.56268	-2.20051	127	2.7512	-2.18547
128	2.79793	-2.38297	128	2.66521	-2.11957
129	2.58636	-2.37416	129	2.64584	-2.36624
130	2.6524	-2.38124	130	2.76314	-2.42458
131	2.69726	-2.35555	131	2.69652	-2.29584
132	2.44517	-2.27549	132	2.72501	-2.43951
133	2.49592	-2.47476	133	2.67621	-2.32548
134	2.58123	-2.26651	134	2.63451	-2.18485
135	2.68302	-2.17742	135	2.62321	-2.18658
136	2.87543	-2.43957	136	2.65652	-2.32624
137	3.23579	-2.51873	137	2.65201	-2.44821
138	2.85684	-2.37517	138	2.64321	-2.50654
139	2.76881	-2.56146	139	2.2145	-2.44547
140	2.72672	-2.39618	140	2.59562	-2.51412
141	2.72268	-2.62268	141	2.58325	-2.42821
142	2.72143	-2.32143	142	2.59652	-2.13654
143	2.61004	-2.51004	143	2.58216	-2.72420
144	2.71841	-2.51841	144	2.58235	-2.15641
145	2.68272	-2.51272	145	2.58203	-2.50335
146	2.72874	-2.52874	146	2.58142	-2.51602
147	2.71272	-2.51272	147	2.58352	-2.51750

148	2.69272	-2.49272	148	2.57205	-2.49422
149	2.65165	-2.45165	149	2.58520	-2.48782
150	2.63451	-2.43451	150	2.57201	-2.48865
151	2.62382	-2.42957	151	2.57382	-2.48478
152	2.62386	-2.42753	152	2.57213	-2.48851
153	2.62385	-2.42562	153	2.57412	-2.48847
154	2.62391	-2.42165	154	2.57391	-2.48452
155	2.62392	-2.42163	155	2.57392	-2.38397
156	2.62394	-2.42164	156	2.57301	-2.38322

## 3. Obținerea formei “O”

Epruveta 1X 60

Epruveta 2X 60

Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2	Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2
	$\varepsilon_0^1 \%$	$\varepsilon_0^2 \%$		$\varepsilon_0^1 \%$	$\varepsilon_0^2 \%$
0	0	-4.86E-06	0	0	
1	1.165102	-0.288102	1	1.795265	-0.00235
2	1.221615	-0.408549	2	2.034715	-0.012541
3	1.210997	-0.599184	3	2.125468	-0.382145
4	1.451527	-1.289433	4	1.795236	-0.106214
5	2.126236	-1.118277	5	2.187451	-0.634721
6	2.146331	-2.378089	6	2.176984	-0.484121
7	1.904067	-2.324774	7	2.103247	-0.24654
8	2.140158	-2.49635	8	2.386541	-0.473568
9	2.181744	-2.56717	9	2.183024	-0.37485
10	2.007572	-2.68254	10	2.574121	-0.221126
11	2.008259	-3.01249	11	2.428471	-1.87542
12	2.186306	-1.899476	12	2.37541	-1.77541
13	2.007089	-2.22512	13	2.389562	-2.08654
14	2.467677	-1.959738	14	2.501125	-1.63475
15	1.968979	-2.23043	15	2.607451	-1.74542
16	1.974938	-1.960644	16	2.428451	-1.51472
17	1.53748	-1.935461	17	2.346547	-1.505324
18	1.980303	-1.92017	18	2.296581	-1.83174

19	1.948985	-1.777027	19	2.193014	-1.79325
20	1.686815	-1.769292	20	1.974258	-1.51354
21	1.970171	-1.649436	21	2.236574	-1.26485
22	1.569633	-1.475505	22	2.198465	-1.42654
23	2.005974	-1.253725	23	1.965487	-1.17782
24	2.15198	-1.29989	24	2.423647	-1.56420
25	2.399584	-2.13964	25	2.72653	-2.17354
26	2.409285	-2.00766	26	2.735487	-1.98032
27	2.388483	-1.955753	27	2.716548	-1.27030
28	2.845977	-2.25948	28	3.492031	-2.53015
29	3.08962	-2.25964	29	3.218474	-2.52387
30	2.618789	-2.12444	30	3.025187	-2.312541
31	3.0328	-2.30934	31	2.839821	-2.24484
32	2.939259	-2.14728	32	3.362147	-2.33652
33	3.17188	-2.57168	33	2.796524	-2.56484
34	3.02247	-2.74993	34	3.21523	-2.48752
35	3.00445	-2.75332	35	3.295712	-2.875871
36	3.0798	-2.48935	36	3.316225	-3.385147
37	3.1203	-2.85758	37	3.298464	-2.554784
38	2.68398	-2.53703	38	3.514165	-3.496514
39	2.865233	-2.84929	39	3.462547	-3.177841
40	3.05116	-3.00168	40	3.448725	-3.11421
41	3.42379	-2.80645	41	3.336593	-2.824654
42	3.0671	-3.01261	42	3.214725	-3.191954
43	3.02486	-3.35777	43	3.176548	-3.494521
44	2.9393	-3.35346	44	3.206514	-3.294845
45	2.968812	-3.28609	45	3.159847	-3.18454
46	2.848107	-3.33877	46	3.012457	-3.40432
47	2.71243	-3.42802	47	3.126521	-3.11478
48	3.056365	-3.70938	48	3.316321	-3.39754
49	2.596309	-3.95216	49	3.234651	-3.34154
50	2.598248	-3.83899	50	3.09201	-3.33841
51	3.221525	-3.71501	51	3.095412	-3.29952
52	3.20223	-3.52656	52	3.086514	-3.29471
53	3.201386	-3.47562	53	3.094825	-3.28453
54	3.016768	-3.30512	54	3.084653	-3.28541
55	3.016659	-3.20886	55	3.084213	-3.29452
56	3.013448	-3.72204	56	3.08641	-3.28412
57	3.016604	-3.68206	57	3.08889	-3.28412
58	3.014483	-3.56649	58	3.08754	-3.28512

59	3.013214	-3.18678	59	3.08541	-3.28145
60	3.013554	-3.18596	60	3.08501	-3.28121
61	3.012457	-3.18183	61	3.08505	-3.28142

## 4. Operațiunea de expandare pentru zona cu deformații vizibile

Epruveta 1X60

Epruveta 2X60

Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2	Pasul	Deformația principală 1	Deformația principală 2
	$\varepsilon_E^1/\%$	$\varepsilon_E^2/\%$		$\varepsilon_E^\theta/\%$	$\varepsilon_E^z/\%$
0	-8.66E-08	-4.42E-06	0	-4.57E-08	-0.0023
1	0.152903	-0.222587	1	0.06841	-0.214521
2	0.135867	-0.322119	2	0.048541	-0.189854
3	0.109433	-0.199922	3	0.124758	-0.136587
4	0.16189	-0.224316	4	0.265231	-0.153687
5	0.189749	-0.528924	5	0.218547	-0.115984
6	0.234168	-0.274321	6	0.225859	-0.183547
7	0.35445	-0.121245	7	0.257895	-0.492589
8	0.30263	-0.219101	8	0.276532	-0.376458
9	0.29324	-0.254776	9	0.301451	-0.368689
10	0.247179	-0.302501	10	0.396521	-0.376548
11	0.328749	-0.234891	11	0.398654	-0.486954
12	0.505047	-0.160099	12	0.414542	-0.413584
13	0.550233	-0.302028	13	0.396654	-0.206654
14	0.546921	-0.130137	14	0.394623	-0.412358
15	0.535679	-0.393096	15	0.397632	-0.258657
16	0.499963	-0.119323	16	0.408547	-0.378521
17	0.529007	-0.0543665	17	0.612558	-0.313568
18	0.530033	-0.174376	18	0.656587	-0.265742
19	0.680554	-0.318935	19	0.613247	-0.274521
20	0.638172	-0.338588	20	0.629654	-0.256321
21	0.787065	-0.353592	21	0.793254	-0.365482
22	0.850852	-0.299192	22	0.835474	-0.316584
23	0.756477	-0.394778	23	0.774859	-0.413254
24	0.865979	-0.464006	24	0.845478	-0.416584
25	0.785265	-0.565028	25	0.756859	-0.472321
26	0.916127	-0.537243	26	0.965826	-0.543654
27	0.935428	-0.533897	27	0.913257	-0.513654
28	0.886133	-0.533883	28	0.914824	-0.512254
29	0.886130	-0.523675	29	0.913254	-0.512547

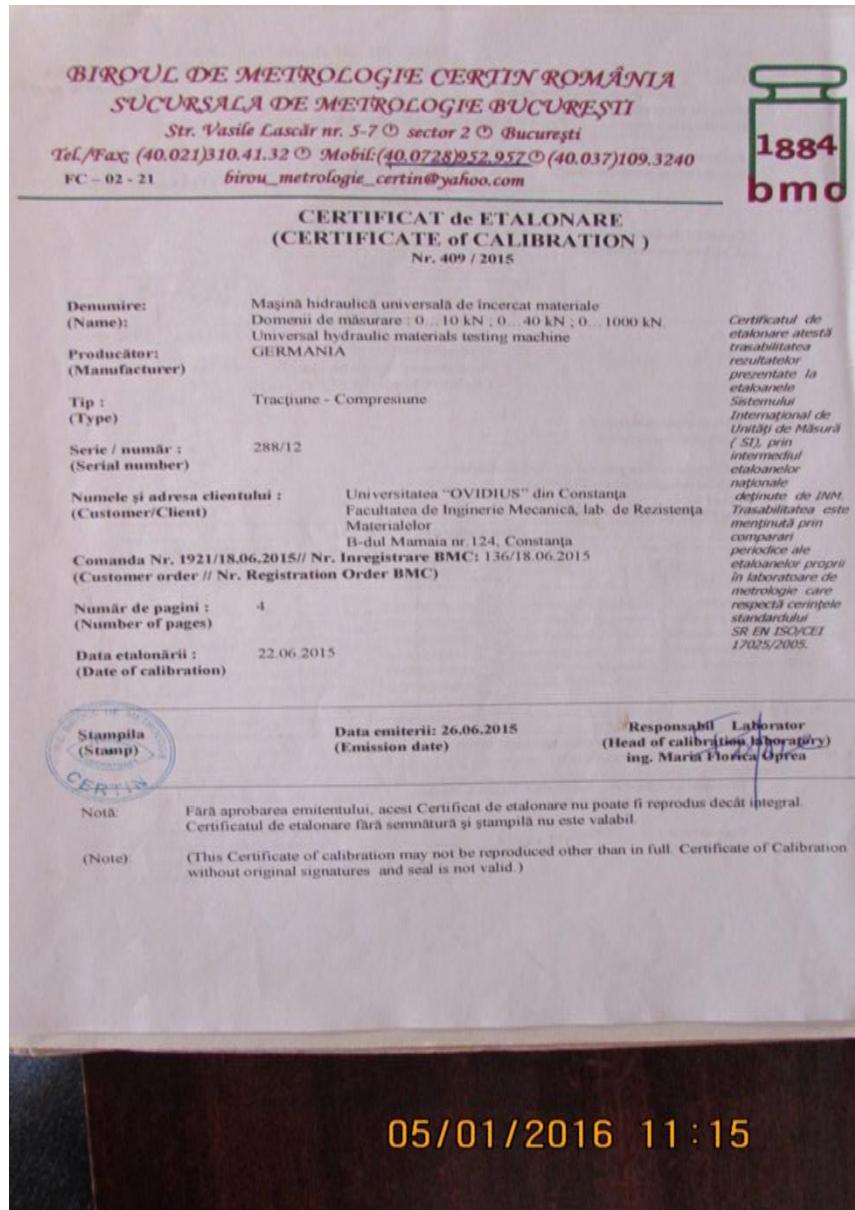
Operațiunea de expandare pentru zona fără deformații mari

Epruveta 1X60

Epruveta 2X60

Pasul	Deformația principală 1 $\epsilon_E^y/\%$	Deformația principală 2 $\epsilon_E^z/\%$	Pasul	Deformația principală 1 $\epsilon_E^y/\%$	Deformația principală 2 $\epsilon_E^z/\%$
0	-4.51E-07	-3.22E-06	0	-2.12E-07	-1.14E-07
1	0.0873635	0.00075603	1	-0.045214	-0.145578
2	0.102317	-0.088691	2	0.0167823	-0.1782214
3	-0.026163	-0.0988735	3	0.04586126	-0.1672452
4	0.0847174	-0.117073	4	0.1152378	-0.16254872
5	0.0123465	-0.203439	5	0.02475139	-0.2145269
6	0.0119176	-0.129533	6	0.04684571	-0.256872
7	-0.0194228	-0.131673	7	0.0526478	-0.21568475
8	0.0183357	-0.0853482	8	0.0875235	-0.3012457
9	-0.0227135	-0.257345	9	0.10457823	-0.1785422
10	-0.0126773	-0.289057	10	0.16247823	-0.2427823
11	0.035672	-0.123396	11	0.1945217	-0.1752469
12	0.0454691	-0.238059	12	0.17523568	-0.2458723
13	0.0493884	-0.259176	13	0.15824537	-0.2484572
14	0.0525748	-0.226474	14	0.147254	-0.2005486
15	-0.0280288	-0.22554	15	0.145412	-0.4021569
16	0.00560615	-0.37162	16	0.149521	-0.3932189
17	-0.0636701	-0.381386	17	0.154789	-0.4465821
18	0.0159616	-0.321628	18	0.176784	-0.4658723
19	0.044016	-0.428723	19	0.183487	-0.487542
20	0.0648035	-0.554972	20	0.172541	-0.325472
21	0.069005	-0.439511	21	0.177254	-0.335482
22	0.0694374	-0.425428	22	0.172654	-0.423549
23	0.123517	-0.624539	23	0.1723254	-0.625342
24	0.0489731	-0.519653	24	0.132478	-0.567892
25	0.0981395	-0.439897	25	0.1826583	-0.452166
26	0.0884876	-0.652874	26	0.13425687	-0.658732
27	0.150794	-0.623718	27	0.11895471	-0.623548
28	0.124421	-0.558945	28	0.1524871	-0.612354
29	0.188167	-0.615287	29	0.1924578	-0.602556
30	0.15603	-0.595705	30	0.1896547	-0.600254
31	0.125479	-0.536406	31	0.1654782	-0.587213
32	0.0753154	-0.65738	32	0.15365478	-0.648922
33	0.180153	-0.760391	33	0.17924571	-0.782166
34	0.1407	-0.538256	34	0.147852	-0.578232
35	0.0647077	-0.576357	35	0.1383245	-0.795423
36	0.161463	-0.576671	36	0.1782457	-0.824563
37	0.170727	-0.645021	37	0.1514578	-0.824576
38	0.168783	-0.599025	38	0.171584	-0.801664
39	0.165983	-0.704561	39	0.1864782	-0.882341
40	0.156189	-0.77942	40	0.1995478	-0.78542
41	0.187102	-0.719129	41	0.20015782	-0.785417
42	0.149953	-0.735963	42	0.1924576	-0.819822
43	0.111841	-0.621913	43	0.221457	-0.734568
44	0.178928	-0.797195	44	0.2145217	-0.678245

45	0.205539	-0.792946	45	0.3654782	-0.60254
46	0.0709523	-0.642247	46	0.1924572	-0.785231
47	0.156864	-0.681229	47	0.293584	-0.69877
48	0.0110722	-0.670162	48	0.179554	-0.834572
49	0.0909592	-0.67774	49	0.184229	-0.81246
50	0.107476	-0.806603	50	0.194572	-0.936589
51	0.177572	-0.714245	51	0.200145	-0.856243
52	0.135174	-0.722906	52	0.187245	-0.862435
53	0.192826	-0.688753	53	0.1876547	-0.815473
54	0.25522	-0.767104	54	0.1882457	-0.875482
55	0.195628	-0.729794	55	0.188541	-0.972357
56	0.164374	-0.739796	56	0.218924	-0.954832
57	0.283377	-0.856043	57	0.224785	-0.998542
58	0.230243	-0.75672	58	0.190014	-1.025478
59	0.226181	-0.703015	59	0.234572	-1.125603
60	0.34736	-0.707346	60	0.301278	-0.954236
61	0.315344	-0.777999	61	0.305781	-0.875423
62	0.312536	-0.775941	62	0.365478	-0.834582
63	0.353569	-0.849268	63	0.384578	-0.815478
64	0.382808	-0.801202	64	0.399847	-0.83457
65	0.354558	-0.845107	65	0.399547	-0.814782
66	0.402501	-0.980915	66	0.382476	-0.8295647
67	0.448608	-0.982738	67	0.487217	-0.924578
68	0.413992	-0.949671	68	0.482457	-0.995824
69	0.517795	-0.961312	69	0.465421	-0.978233
70	0.458587	-0.917848	70	0.425782	-0.964842
71	0.446685	-0.884353	71	0.402587	-0.924586
72	0.452383	-0.894456	72	0.495781	-0.912487
73	0.520942	-1.01759	73	0.587827	-0.9658713
74	0.482648	-1.04057	74	0.5695478	-1.098542
75	0.542171	-1.03586	75	0.5956782	-1.145785
76	0.637762	-1.08566	76	0.5985722	-1.245789
77	0.598188	-1.03252	77	0.5922452	-1.282498
78	0.570841	-1.01979	78	0.554265	-1.01457
79	0.551053	-1.05039	79	0.5547221	-1.01652
80	0.601278	-1.00494	80	0.560021	-1.088741
81	0.699267	-0.966322	81	0.568742	-0.984217
82	0.663069	-1.04618	82	0.596587	-1.005483
83	0.651277	-0.970226	83	0.6425457	-1.27542
84	0.601268	-0.896303	84	0.735482	-1.14572
85	0.630365	-0.959883	85	0.815822	-1.135487
86	0.791267	-0.957596	86	0.802217	-1.102458
87	0.771260	-0.957588	87	0.722145	-1.052678
88	0.761263	-0.957592	88	0.741924	-0.982588
89	0.761152	-0.957590	89	0.741972	-0.982354
90	0.761002	-0.955872	90	0.741882	-0.982033

**A 3:** Certificat de etalonare pentru mașina hidraulică de încercări materiale ZDM 100

**A 4. Echipamentul utilizat pentru efectuarea studiului experimental****1. Mașina de debitat cu jet de apă MAXIEM 1530 WATERJET**

MAXIEM 1530 WATERJET este un sistem de tăiere cu jet de apă și particule abrazive, în 3 axe, controlat de o placă PC și dotat cu un amplificator de înaltă presiune (50.000psi=3450 bar). Acest echipament este optimizat pentru tăierea tuturor materialelor metalice și nemetalice, cum ar fi: oțel, aluminiu, cupru, bronz, titan, precum și a materialelor compozite și a altor materiale precum sticla, piatra, granitul și materiale plastic.



## 2. Sistemul de Corelare Digitală al Imaginii – Q400

Sistemul Q400 este compus din: senzor cu două camere Schneider; stand pentru sustinerea și fixarea senzorului; sistem de declanșare pentru camere și controlul înregistrării imaginilor; PC foarte performant care operează sub sistemul GOM Linux 7 și softul specializat versiunea 6.1. Dupa crearea proiectului de măsurare cu ajutorul softului, se achiziționează imaginile în diferite stagiile de încărcare ale componentelor structurale.



### 3. Mașina de încercă la tracțiune și compresiune ZDM 100

Mașina lucrează hidraulic, iar acționarea se face prin comenzi electrice. Pentru încercările statice, instalația este echipată cu un măsurător de forță prin bară de torsiune, fără multă inerție, cu trasor de diagrame și un dispozitiv pentru a menține forță constantă. Cu excepția aparatului de trasat diagrame, aceste piese ale instalației și la încercările dinamice.

Pentru încercările dinamice, pulsatorul instalației este înzestrat cu un mecanism de acționare reglabil, fără trete, astfel că în tot intervalul frecvențelor instalația poate funcționa cu orice turăție. La încercările dinamice, amplitudinea vibrației efortului comportă cel mult 50% din dimensionarea instalației pentru încercările statice.



#### 4. Ghilotină pentru debitarea tablei de oțel

Mașinile ce pot debita tablele de oțel cu ajutorul unei lame, prin cădere sunt numite ghilotine.

Parametri tehnici:

- Lungimea de tăiere 4030 mm;
- Capacitate de tăiere ( $45 \text{ Kg/mm}^2$ ) -25 mm;
- Capacitate de tăiere ( $70 \text{ Kg/mm}^2$ ) – 15 mm;
- Unghi de tăiere -  $0,7^\circ$  –  $2,4^\circ$
- Număr de curse/minut - 4,5
- Număr de tampoane (verini) – 18 buc.;
- Greutate – 3800 kg;
- Cursa limitator spate – 1000 mm;
- Capacitate ulei – 700 litri;
- Cursa lame (distanța între cuțite) – 0,15 -1,8 mm;
- Viteza limitator spate - 110 mm/s;
- Suporți frontalii tabla – 3;
- Înălțimea mesei - 1100 mm;
- Distanța dintre montanți - 4400 mm;
- Dimensiuni mașina (WxLxH) - 2900x4850x2800 mm;
- Putere motor principal - 55 kW;
- Putere motor limitator spate - 1,1 kW;



## BIBLIOGRAFIE

- [1] *API Bulletin . 5C3*, „Bulletin for Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill pipe, and Line Pipe Properties”, fourth edition Dallas. 1985.
- [2] *Assanelli A*, „Finite element modeling an experimental validation of forming and structural behavior”, Center for Industrial Research BUCKLE ARRESTORS FOR DEEPWATER PIPELINES, Asociacion Argentina de Mecanica Computational, pag. 692, 2006.
- [3] *Assanelli A, Toscano R.G., Johnson D.H., Dvorkin E.N.*, “Experimental / numerical analysis of the collapse behavior of steel pipes”, Engineering. Computations, 17, 2000.
- [4] *Bârsenescu P. Amariei N.*, „Tensiuni remanente”, Editura Gh Asachi - Iași, 2003,
- [5] *Bejan M*, “Structural Efficiency on Plastic Composite”, Proceedings of The Romanian Academy, Series A, volume 19 number 2, București, ISSN 1454-9069, 2018.
- [6] *Bejan Mihai, Samoilescu Gheorghe*, „Interlaminar Stress and Delamination Effect on Load Capacity of Stratified Composite Materials”, Revista Materiale plastice vol. 44 nr. 3 2007 București, ISSN 0025-5289, 2007.
- [7] *Benson R.W., Raelson V.J.* From ultrasonics to a new stress-analisis technique. Acoustoelasticity. Product Eng. 30., pag.7-8, 1959.
- [8] *Benson S.* „Bending Basics: The hows and whys of springback and spring forward, The fabricator, 2014.
- [9] *Birger I.A* „Ostatochinie napreajenia,” Gos. Naucino – Teh. Izdat,1963.
- [10] *Bormambet M.*, „Tehnologii de sudare prin topire”, Ovidius University Press, Constanța, 2005.
- [11] *Certificatul metalurgic a oțelului L 415 MB (X60)*, 2014.
- [12] *Chakrabarti S.*, “Hanbook of Offshore Engeneering”, Elsevier, pag 309, 2005.
- [13] *Chadel J.D.*, “Formation of X-120 M Line Pipe through J-C-O-E Technique”, Engineering, vol.3, Scientific Research, 2011.
- [14] *Chira N, Bâlc R.*, „Statica construcțiilor. Structuri static nedeterminate”, U.T. PRESS., Cluj-Napoca., 2014.
- [15] *Ciupitu I.* „Deformări plastice. Tehnologii și echipamente.” Tipografia universității din Craiova, 2000.
- [16] *Delistoian D., Chircor M.* „UOE pipe numerical model : manufacturin process and von Mises residual stresses resulted after each technological step” ACTA Universitatis Cibiniensis, 2017.
- [17] *Delistoian D., Chircor M.* „UOE pipe manufacturing process simulation:equipment design and construction”, ACTA Universitatis Cibiniensis, 2017.

- [18] *Delistoian Dmitri, Chircor Mihael, Timur Chis*, „UOE pipe strains measurement during manufacturing process using digital image correlation”, Annals of Constanta Maritime University, - in curs de publicare.
- [19] *Delistoian Dmitri, Chircor Mihael*, „Offshore pipeline influence on middle east spiritual condition”, Dialogo journal 4:1 (2017) 247-255, doi:10.18638/dialogo. 2017.
- [20] *Feodosiev V.*, Resistance des materiaux ,Moscou, Edition Mir, pag. 35, 1971.
- [21] *Herynk M.D., Yun H.D.*, „Effects of the UOE pipe manufacturing processes on pipe collapse Pressure”, IJMS, VOL.49, 2007., 2007.
- [22] *Hencky H.*, „Über einige statisch bestimmte Falle des Gleichgewichts in plastischen Körpern”, ZAMM – Journal of applied mathematics and mechanics, 1923.
- [23] *Hillenbrand H. G., Kalwa C., Liessem A.*, “Technological Solution for Ultra-High Strength Gas Pipeline,” 1st International Conference on Super-High Strength Steels, Rome, 2005.
- [24] *Heriksen E.* „Residual stresses in Machined Surfaces”, Trans of ASME 73, 1951.
- [25] *Ionescu Bogdan*, „Tehnici Avansate de Prelucrarea și Analiza Imaginilor”, Universitatea “Politehnica” din București, 2010.
- [26] *Jain, A. K.*, „Fundamentals of Digital Image Processing”, Prentice Hall, Englewood Cliffs NJ, pag. 20-23, 1989.
- [27] *Jähne, B.*, „Practical Handbook on Image Processing for Scientific Applications”, CRC Press, pag. 12-13, 1997.
- [28] *Kelly P.A.*, „Solid Mechanics Lecture Notes : 8. Plasticity” The University of Auckland, 2013.
- [29] *Kyriakides S, Corona E, Fischer FJ.* On the effect of the UOE manufacturing process on the collapse pressure of long tubes. In:Proceedings of the Offshore Technology Conference,1992.
- [30] *Kyriakides S, Yeh M.K.*, „Collapse of deepwater pipelines”. ASME, Journal of Energy Resources Technology 1988.
- [31] *Krysl P*, „A pragmatic introduction to the Finite Element Method for thermal and stress analysis, Pressure Cooker Press”, San Diego, USA, 2005.
- [32] *Kudreavțev I.V.*, ”Ustatosti svarnih construcții”, Tip. Mashinostroenie, pag.210, 1976.
- [33] *Kumbetlian G.*, „Calculul plăcilor (Teorie și aplicații)”, Ed. Fundația Andrei Șaguna, Constanța, 1999.
- [34] *Lange K.*, „Handbook of metal forming”, McGraw-Hill, New York, 1985.
- [35] *Lee H. H.*, “Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 16. Theory, applications, case studies”, NCKU, Taiwan, 2016.
- [36] *Liessem A., Oesterlein L., Kersting T., Kalwa C.*, „Controlling product quality by accurate process control in europipe’s high performance UOE pipe mill”, 9 th Pipeline Technology Conference, 2014.

- [37] *Mars Guy Fontana*, “Corrosion Engineering”, Mc Grow – Hill New York, 1986.
- [38] *Maksay Ş, Bistrian D*, „Introducere în metoda elementului finit”, Ed. Cermi,Iași, 2008.
- [39] *Mașina de încercat LBG A016*, Material-testing machine manual LBG A016, 2015.
- [40] *Manualul de utilizare foerfecele ghilotină pentru debitarea tablei*, Uzina Mecanică Sibiu, 1986.
- [41] *Material-testing machine manual ZDM 100*, Werkstoffprüfmaschinen, Liepzig,1961.
- [42] *McCormick N., Lord J.* “Digital Image Correlation”, National Physical Laboratory, Middlesex, UK, 2010.
- [43] Mendelson V, „Spravochnik po izgotovleniu i remontu press-form”, Tehnika,1979.
- [44] *Micloş V. Scorobeiu L.*, „Bazele proceselor de sudare”, Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
- [45] *Moerman K.M.*, „Digital image correlation and finite element modelling as a method to determine mechanical properties of human soft tissue in vivo”, Pubmed, 2009.
- [46] *Moaveni S*, „Finite Element Analysis. Theory and Application with Ansys”, Minnesota State University , 1999.
- [47] *Mocanu D.R.*, „Analiza experimentală a tensiunilor și deformațiilor”, Vol. I, Editura Tehnică, București, 1977.
- [48] *Mondal S.K.* „Strength of materials, Ch.10: Thin Cylinder”, 2007.
- [49] *Murphrey C.E, Langner C.G.* „Ultimate pipe strength under bending, collapse and fatigue”. In: Proceedings of the fourth International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1985.
- [50] *Palei M.* „Tehnologhia proizvodstva prisposoblenii press form i stampov”, Mashinostroenie, 1979.
- [51] *Posea N. Anghel A.* „Statica și dinamica sistemelor de conducte” Editura Academiei Române – București , pag. 50, 1996.
- [52] *Raffo J, R. G. Toscano, L. Mantovano and E. N. Dvorkin*, “Numerical Model of UOE Steel Pipe: Forming Process and Structural Behavior,” In: S. A. Elaskar, E. A. Pilotta and G. A. Torres, Eds., Mecanica Computacional, Vol. 26, October 2007.
- [53] *Registrul Naval Roman* , „Reguli pentru clasificarea și construcția navelor maritime”, Partea A XIII Oteluri și fonte,1990.
- [54] *Repin D.*, „Matematicheskoe modelirovanie protsesssa formovki svarnih trub bolishego diametra. PGTU, Permi, 2002.
- [55] *Ress D.*, „Mechanics of solids and structures” , Imperial College Press, 20016.
- [56] *Richards D.*, „Relief and Redistribution of residual stresses in metals, Residual stress measurements”, Am. Soc. Metals, 1952.
- [57] *Rudmann L.I.* „Spravochnik constructora shtampov”, Izd. Mashinostroenie, pag. 192-195, 1988.
- [58] *Shinkin V.N., Kolikov A.P.* Engineering calculations for processes involved in the production of large diameter pipes by the SMS Meer technology , Metallurgist.. Vol. 55., 2012.
- [59] *Shinkin V.N.*, “Ostatochinie napreajenia pri ecpandirovani trub ”, Young Scientist, vol.20, 2015.

- [60] *Shinkin V.N.*, "Defect pereghiba stalinoi zagotovki na truboformovocinom pressse", Young Scientist, vol.17, 2015.
- [61] *Slater S., R. Freeman, M. Connelly, S. Wen*; "Manufacturing the thickest UOE 18" Linepipe", OPT 2010, 24th/25<sup>th</sup>, Amsterdam, 2010.
- [62] *Stark PR, McKeehan DS.*, "Hydrostatic collapse research in support of the Oman–India gas pipeline". In: Proceedings of the Offshore Technology Conference, OTC7705, 1995.
- [63] *Tommaso D, Grégoire L, Sanchez A.* „Finite Element Modeling with ANSYS, CENTRE OF STRUCTURE TECHNOLOGIES, Zurich, 2011.
- [64] *Toscano R G., Gonzalez M., Dvorkin E.N.* "Experimental validation of a finite element model that simulates the collapse and post-collapse behavior of steel pipes", Proceedings Second MIT Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, (Ed. K.-J. Bathe), Elsevier, 2003.
- [65] *Totten G. Howes M. Inoue T.* „Handbook of residual stress and deformation of steel" ASM Int., 2002.
- [66] *Tripa P.*, „Rezistența materialelor", Editura Mirton, Timișoara, 1999.
- [67] *Tudose I. Atanasiu C.* „Rezistența materialelor" Ed. Didactică și Pedagogică, București, 1981.
- [68] *Ungureanu I., Ispas B., Constantinescu E.*, „Rezistența Materialelor I (curs)", Universitatea Tehnică de Construcții București, 1995.
- [69] *Varnes D.*, Analysis of Plastic Deformation According to Von Mises' Theory With Application to the South Silverton Area, San Juan County Colorado, 1962.
- [70] *Volghina N. Sergheeva T.* „Ostatocenie naprejenia priamoshovnih i spireleshovnih trub". IRT, 1999.
- [71] *Zeid H.*, „CAD/CAM Theory and Practice," McGraw Hill, 1990.
- [72] *Zvonarev D.I.*, „Sovershenstvovanie protessov podgibki cromok i sagovoi formovki svarnih trub bolishego diametra dlja obespecenia visokoi tocinosti razmerov i form" NIU, Celeabinsk, 2015.
- [73] \*\*\*[www.ansys.com](http://www.ansys.com), „Ansys Theory – user manual", ANSYS R16.2, .2016.
- [74] \*\*\*[www.autodesk.com](http://www.autodesk.com), AutoCAD 2013, 2015.
- [75] \*\*\*[www.api.org](http://www.api.org), „API SPECIFICATION 5L Specification for line pipe", accesat 26.06.2016.
- [76] \*\*\*[www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com), „Digital Image Correlation, Denmark, accesat 18.08.2016.
- [77] \*\*\*[www.europipe.com](http://www.europipe.com), Europipe, Mulheim Pipecoatings, UOE pipe manufacturing process accesat 18.06.2016.
- [78] \*\*\*[www.great-pipe.com](http://www.great-pipe.com), JCOE SAWL pipes, Hunan Great Stell Pipe CO, LTD, accesat 08.09.2016.
- [79] \*\*\*[www.hnssd.com](http://www.hnssd.com), "Longitudinal Submerged arc Welded steel pipes, Hunan Steel Industrial –

Changsha City, accesat 28.05.2016.

[80] \*\*\*[www.hnssd.com](http://www.hnssd.com), Difference between UOE and JCOE pipe, accesat 24.04.2016.

[81] \*\*\*[www.iso.org](http://www.iso.org), ISO 3183:2013, Petroleum and natural gas industries, Steel pipe for pipeline transportation systems, accesat 26.06.2016.

[82] \*\*\*[www.petrowiki.org](http://www.petrowiki.org) ,”Strength of casing and tubing”, Society of Petroleum Engineers, Texas, USA , accesat 25.05.2015.

[83] \*\*\*[www.omax.com](http://www.omax.com), “Water jet cutting machine”, Data sheet, Kent, United States, 2014.

[84] \*\*\*[www.piping-engineering.com](http://www.piping-engineering.com), Spiral welded pipe or longitudinal, , accesat 15.08.2016.

[85] \*\*\*[www.siempelkamp.com](http://www.siempelkamp.com), „Pipe manufacturing process ”, G. Siempelkamp GmbH & Co., Germany, accesat 12.12.2016.

[86] \*\*\*[www.tatasteeleurope.com](http://www.tatasteeleurope.com), “Corus Tubes, Tubes manufacturing,” London, United Kingdom, accesat 12.03.2017.

[87] \*\*\*[www.worldmap.harvard.edu](http://www.worldmap.harvard.edu), „Global oil pipelines”, Cambridge, USA, accesat 18.06.2017



