

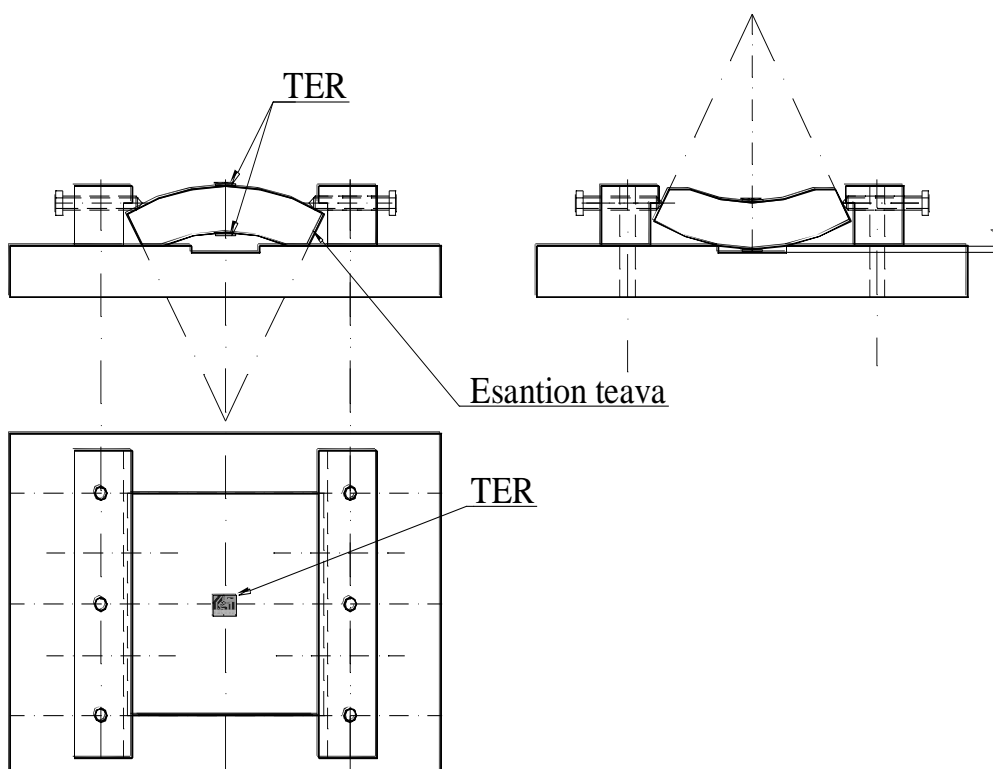
## DETERMINAREA TENSIUNILOR REMANENTE

1. Noțiuni introductive
2. Considerații privind tehnica utilizată
3. Rezultatele experimentale
4. Interpretarea rezultatelor
5. Concluzii

### 1. Noțiuni introductive

Obiectul încercărilor din lucrarea de față este **determinarea tensiunilor remanente (reziduale)**

Proba reprezintă un segment de țevă lung de 400mm, având diametrele:  $D_{ext}=275\text{mm}$ ,  $D_{int}=221\text{mm}$  (fig. 1.) prins pe o placă de fixare.

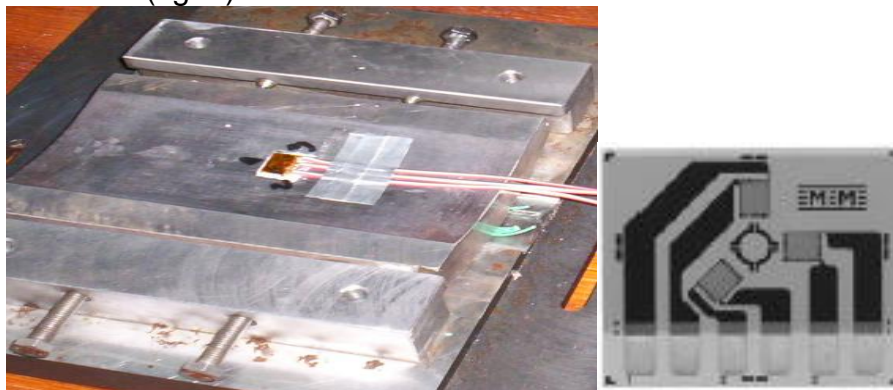


**Fig. 1.** Schema prinderii eșantionului de țevă pe placa de fixare și a traductoarele speciale

**Standardul** care prezintă condițiile de **determinare a tensiunilor remanente** este **ASTM E837**. Procedura care trebuie urmată pentru a obține date corecte este descrisă în *Vishay Micro-Measurements Tech Note TN-503, Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*.

Pe eșantionul extras din țevă (fig. 1.) se aplică rozete Micro-Measurements (Vishay) pentru măsurarea tensiunilor remanente, tip CEA-06-062UL-120: una pe față

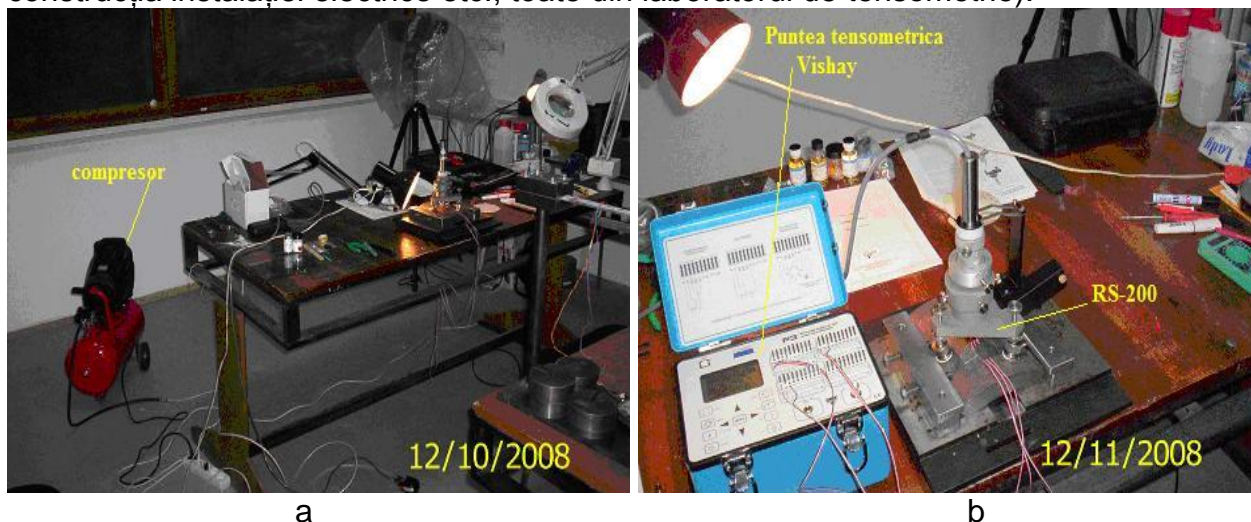
interioară și cealaltă pe fața exterioară, orientate cu axa traductorului 1 pe direcția generatoarei cilindrului (fig. 2).



**Fig. 2.** Dispunerea traductoarelor din rozeta folosită (CEA-06-062UL-120) pentru măsurarea tensiunilor reziduale

## 2. Considerații privind tehnica utilizată

Pentru o măsurare corectă se utilizează materiale din trusa de tensometrie *Vishay* (materiale și substanțe de preparare a suprafeței, adezivi, conductoare și elemente pentru construcția instalației electrice etc., toate din laboratorul de tensometrie).



**Fig. 3.** Laboratorul de tensometrie: a) compresorul care furnizează aerul comprimat necesar antrenării turbinei care rotește freza; b) puntea tensometrică P3 Vishay cu care s-au măsurat și înregistrat deformațiile specifice pe direcțiile traductoarelor rozetei; se mai observă: sistemul RS-200, trepiedul fixat pe eșantionul de țevă

Trepiedul trusei de determinat tensiunile remanente *RS-200* se fixează pe eșantionul de oțel cu ajutorul unui adeziv special, bicomponent (pulbere și polimerizator lichid, furnizate de *Vishay*). Fixarea trepiedului a fost precedată de o vizare inițială a rozetei printr-un sistem optic (lupă) și marcarea poziției tălpilor. După întărirea adezivului, s-au blocat șuruburile care permiteau mișcarea platoului și mișcarea în articulațiile sferice ale tălpilor. În această situație s-a putut face un reglaj final a poziției platoului din șuruburile inelului circular, pentru a suprapune reticulația lupei peste marcajul circular al rozetei, unde s-a efectuat găurirea. S-au efectuat găuri cu ajutorul frezei antrenată de turbina acționată cu aer comprimat, situată în capătul inferior al tubului care se montează în locul lupei. Avansul pe verticală al tubului cu turbină este controlat de un șurub micrometric care a permis coborârea frezei în trepte de câte 0,2mm. După fiecare treaptă de găurire, freza a fost retrasă pentru a evita vibrațiile induse de atingerea flancurilor găurii. În plus, s-a preferat menținerea turbinei în *mișcare* pe toată perioada de măsurare, deoarece aerul de antrenare curge și peste rozeta de traductoare și influențează

temperatura lor, ceea ce influențează apoi echilibrul punții tensometrice (s-a utilizat o schemă de măsurare *în sfert de punte*, fără marcă de compensare, ceea ce a impus un regim staționar - de temperatură - pentru cele trei punți de măsurare).

### 3. Rezultatele experimentale

Indicațiile punții tensometrice *P3 (Vishay)* se înregistrează la comandă manuală pe o cartelă de memorie (în mod text). Deformațiile celor trei traductoare ale unei rozete de tensiuni remanente, pentru o măsurare efectuată pe o față, au fost introduse într-un program special de prelucrare numit *H-Drill*. În tabelul 1 se prezintă deformațiile specifice înregistrate în procesul de măsurare a tensiunilor reziduale (fig. 3.).

*Tabelul 1.* Valorile deformațiilor specifice înregistrate la găurirea rozetelor aplicate pe față interioară și pe față exterioară a eșantionului de țevă

interior				exterior			
adâncime	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$	adâncime	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$	$\varepsilon_3$
mm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	mm	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	4	5	10	0.2	3	5	5
0.4	7	9	13	0.4	7	8	10
0.6	10	12	13	0.6	9	9	11
0.8	11	15	10	0.8	9	12	13
1	13	17	6	1	8	12	13
1.2	14	21	1	1.2	7	9	10
1.4	15	22	-3	1.4	6	8	10
1.6	15	24	-5	1.6	6	8	9
1.8	16	27	-5	1.8	6	8	10
2	17	33	-6	2	6	9	10
2.2	19	35	-5	2.2	7	10	13
2.4	20	35	-6	2.4	7	10	12
2.6	20	34	-7	2.6	6	9	10
				2.8	6	9	9

Cu programul *H-Drill* se calculează tensiunile normale și tangențiale maxime și minime în trei ipoteze (metode de calcul):

- metoda valorilor constante (uniform stress);
- metoda seriilor de puteri (power series method);
- metoda integrală (integral method).

*Tabelul 2*

H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Uniform Stresses -----

Data Title interior

Rosette type = 062 UL

Rosette mean diameter = 13 mm

Young's modulus = 204.5 GPa

Hole diameter = 1.600 mm

Poisson's ratio = 0.297

Stress depth limit = 2.05 mm

Std modulus error = 1.0 %

Std diameter error = 0.100 mm

Std strain error = 0

$\beta$  = angle gage 1 clockwise to <sub>max</sub>

----- Strains ----- 90%

-----Stresses -----

prob.

$\beta$

Depth mm	$\square_1$	$\square_2$	$\square_3$	bound	MPa	MPa	MPa	deg	MPa	MPa	MPa
				max	9	-25	17	-53	-13	-3	16
0.000	0	0	0	min	4	-25	15	-57	-17	-4	14
					0	-26	13	-62	-20	-5	11
0.200	4	5	10								
0.400	7	9	13								
0.600	10	12	13								
0.800	11	15	10								
1.000	13	17	6								
1.200	14	21	1								
1.400	15	22	-3								
1.600	15	24	-5								
1.800	16	27	-5								
2.000	17	33	-6								
2.200	19	35	-5								
2.400	20	35	-6								
2.600	20	34	-7								

Din datele prelucrate de programul *H-Drill* (tabelele 2, 3 și 4) se rețin pe cele care evaluează tensiunea normală în direcție circumferențială  $\square_3$  (fig. 4.), care se suprapune peste tensiunea normală circumferențială maximă calculată din ipoteza de tub cu pereți groși, solicitat de presiunea interioară de 130bari.

Tabelul 3

## H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Power Series Method -----

Data Title interior

Rosette type = 062 UL

Rosette mean diameter = 13 mm

Young's modulus = 204.5 GPa

Hole diameter = 1.600 mm

Poisson's ratio = 0.297

Stress depth limit = 1.03 mm

Std modulus error = 1.0 %

Std diameter error = 0.100 mm

Std strain error = 0  $\square \square$ beta = angle gage 1 clockwise to  $\square_{\max}$ 

--- Strains ---

90%

----- Stresses -----

Depth	$\square_1$	$\square_2$	$\square_3$	prob. bound	$\square_{\max}$	$\square_{\min}$	$\square_{\max}$	$\beta$	$\square_1$	$\square_3$	$\square_{13}$
mm	$\square \square$	$\square \square$	$\square \square$		MPa	MPa	MPa	deg	MPa	MPa	MPa
				max	-27	-56	30	18	-30	-53	-8
0.000	0	0	0	min	-35	-71	18	18	-39	-68	-11
					-43	-86	6	18	-47	-82	-13
				max	-19	-29	13	10	-19	-28	-2
0.200	4	5	10	min	-25	-37	6	10	-25	-37	-2
					-31	-45	0	10	-31	-45	-2
				max	2	-14	10	-54	-8	-3	8
0.400	7	9	13	min	-1	-16	7	-57	-11	-6	6
					-5	-17	5	-62	-15	-8	5
				max	39	-6	21	-64	2	30	18
0.600	10	12	13	min	33	-5	19	-64	2	26	15

Determinarea tensiunilor remanente											
				min	27	-4	17	-64	2	21	12
0.800	11	15	10	max	80	5	38	-65	18	67	2824
					67	5	31	-65	16	57	24
				min	55	5	25	-66	13	46	19
1.000	13	17	6	max	121	18	54	-66	35	104	38
					102	15	43	-66	29	88	32
				min	82	13	32	-66	24	71	26
1.200	14	21	1								
1.400	15	22	-3								
1.600	15	24	-5								
1.800	16	27	-5								
2.000	17	33	-6								
2.200	19	35	-5								
2.400	20	35	-6								
2.600	20	34	-7								

Tabelul 4.

# H-DRILL RESIDUAL STRESS CALCULATION ----- Integral Method ----- -----

Data Title interior

Rosette type = 062 UL

Rosette mean diameter = 13 mm

Young's modulus = 204.5 GPa

Hole diameter = 1.600 mm

Poisson's ratio = 0.297

Stress depth limit = 1.03 mm

Std modulus error = 1.0 %

Std diameter error = 0.100 mm

Std strain error = 0 %

beta = angle gage 1 clockwise to  $\epsilon_{\max}$

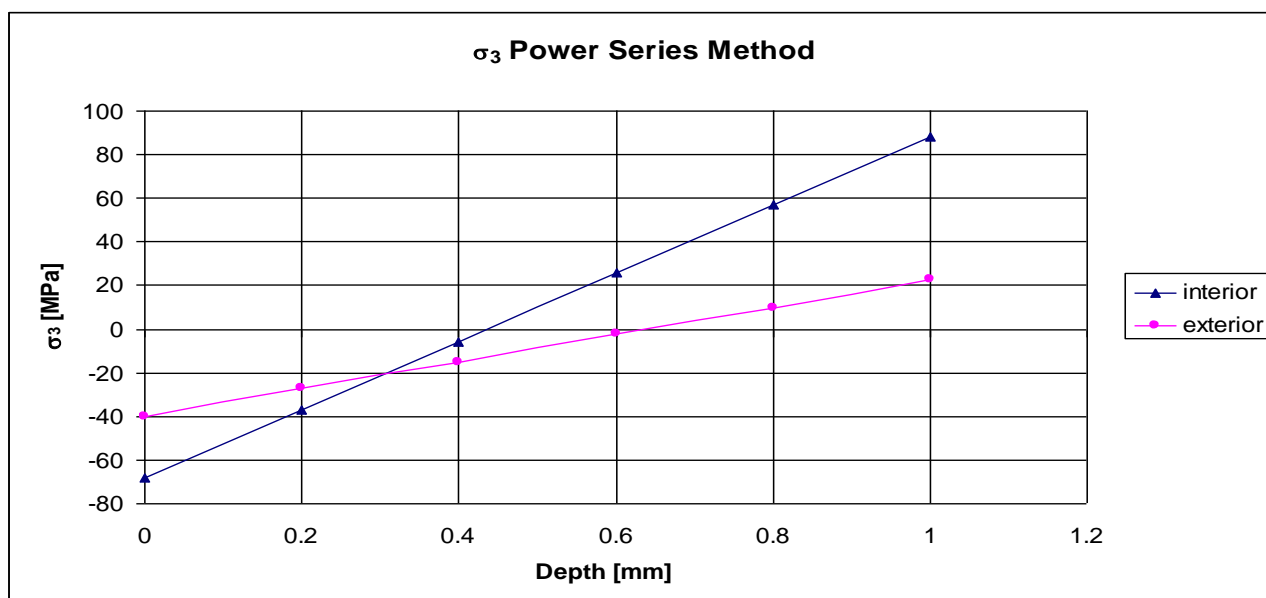
--- Strains --- 90%

----- Stresses -----

Depth	$\epsilon_1$	$\epsilon_2$	$\epsilon_3$	prob. bound	$\epsilon_{\max}$	$\epsilon_{\min}$	$\epsilon_{\max}$	$\beta$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_{13}$
mm	%	%	%		MPa	MPa	MPa	deg	MPa	MPa	MPa
0.000	0	0	0								
0.067				max	-26	-26	31	17	-28	-52	-8
					-34	-71	18	17	-37	-68	-10
				min	-43	-87	6	17	-46	-84	-12
0.200	4	5	10								
0.300				max	8	8	10	-58	-7	2	10
					6	-13	9	-60	-8	1	8
				min	4	-13	8	-64	-9	1	6
0.400	7	9	13								
0.500				max	14	14	15	-66	-7	10	9
					12	-13	12	-71	-10	9	8
				min	10	-15	11	-75	-13	8	6
0.600	10	12	13								
0.700				max	63	63	32	-58	16	45	29
					52	-2	27	-58	13	37	24

				min	42	-2	22	-58	11	30	19
0.800	11	15	10								
				max	61	61	33	-70	1	53	22
0.933					52	-6	29	-70	1	45	18
				min	43	-5	25	-71	0	37	15
1.000	13	17	6								
1.200	14	21	1								
1.400	15	22	-3								
1.600	15	24	-5								
1.800	16	27	-5								
2.000	17	33	-6								
2.200	19	35	-5								
2.400	20	35	-6								
2.600	20	34	-7								

#### 4. Interpretarea rezultatelor



**Fig. 4.** Variația tensiunilor normale în direcție circumferențială pe adâncimea găurii, la interiorul și la exteriorul țevii.



a)

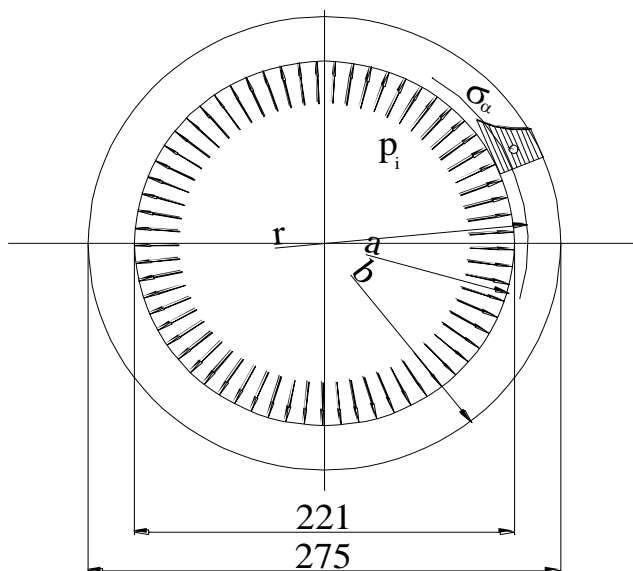


b)

**Fig. 5** a) Măsurarea tensiunilor remanente pe fața interioară a conductei; b) măsurarea tensiunilor remanente pe fața exterioară a conductei.

*Tensiunea normală în direcție circumferențială - efectul presiunii interioare din exploatare*

Țeava de abur viu care urmează să fie montată în instalația turbinei de abur poate fi considerată un tub cu pereți groși, solicitată de presiunea interioară  $p_i$  (fig. 6).



**Fig. 6.** Variația tensiunii circumferențiale -  $\sigma_\alpha$  - pe grosimea tubului solicitat de presiunea interioară  $p_i$ :  $a$  = raza interioară,  $b$  = raza exterioară,  $r$  = raza curentă.

Tensiunea normală în direcție circumferențială se poate calcula cu relația:

$$\sigma_{\alpha} = \frac{E}{1-\nu^2} \left[ A(1+\nu) + \frac{B}{r^2} (1-\nu) \right] \quad (5.1)$$

unde:

$$A = \frac{1-\nu}{E} \cdot \frac{a^2 p_i - b^2 p_e}{b^2 - a^2}$$

$$B = \frac{1+\nu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2 (p_i - p_e)}{b^2 - a^2},$$

în care  $a=D_{\text{int}}/2=110,5\text{mm}$ ,  $b=D_{\text{ext}}/2=137,5\text{mm}$ ;

$r$  = raza curentă ( $r=110,5\text{mm}+(0,2\cdot n)$ ; unde  $n=0, 1, \dots, 5$ );

$E$  = modulul de elasticitate longitudinal al materialului tubului;

$\nu$  = coeficientul contracției transversale (Poisson) al materialului;

$p_i, p_e$  = presiunea interioară, respectiv, exterioară (în cazul de față  $p_e=0$ ,  $p_i=130\text{bar} = 13\text{MPa}$ ).

Rezultă, din înlocuirea valorilor specificate în relația (5.1):

$$\sigma_{\alpha} = \frac{a^2}{a^2 - b^2} p_i \left( 1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (5.2)$$

de unde:

$$\sigma_{\alpha} = 23,70568 \left( 1 + \frac{137,5^2}{r^2} \right) \quad (5.3)$$

#### *Tensiunile normale în vecinătatea suprafeței interioare a conductei*

Pentru raza curentă (considerată necunoscută independentă, variabilă)  $r=110,5+0,2n$ , cu numărul pasului de găurire  $n=0, 1, 2, \dots, 4$ ; s-a considerat adâncimea de găurire  $z = 1\text{mm}$ , iar pasul găuririi a fost  $0,2\text{mm}$ ; s-a calculat tensiunea  $\sigma_{\alpha}$  în tabelul 5 (cu relația 3):

*Tabelul 5*

$r$ mm	$\sigma_{\alpha}$ (circumferențial) MPa
110.5	60.411365
110.7	60.27885362
110.9	60.14705852
111.1	60.01597454
111.3	59.88559657
111.5	59.75591957

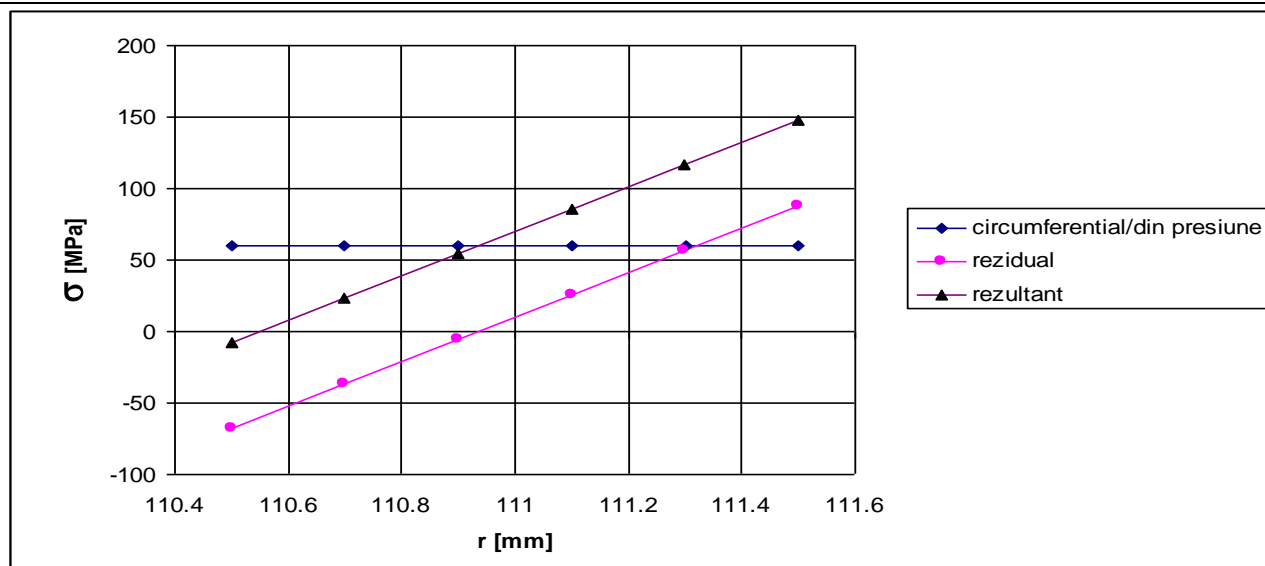
Din suprapunerea celor două tensiuni normale rezultă un nivel maxim (tabelul 6 și fig. 6.):

*Tabelul 5.6*

$r$ mm	$\sigma_{\alpha}$ rezult MPa
110.5	-7.588634998
110.7	23.27885362
110.9	54.14705852
111.1	86.01597454
111.3	116.8855966
111.5	147.7559196

$$\sigma_{\alpha} = 147.7559196\text{MPa}$$





**Fig. 6.** Variația tensiunilor normale rezultante în direcție circumferențială în vecinătatea suprafeței interioare a tubului (pe distanță de 1mm).

#### 4.3. Tensiunile normale în vecinătatea suprafeței exterioare a conductei

Pentru  $r=137,5-n \cdot 0,2$ , cu  $n=0, 1, \dots, 4$  rezultă din relația (3) tabelul 7:

Tabelul 7.

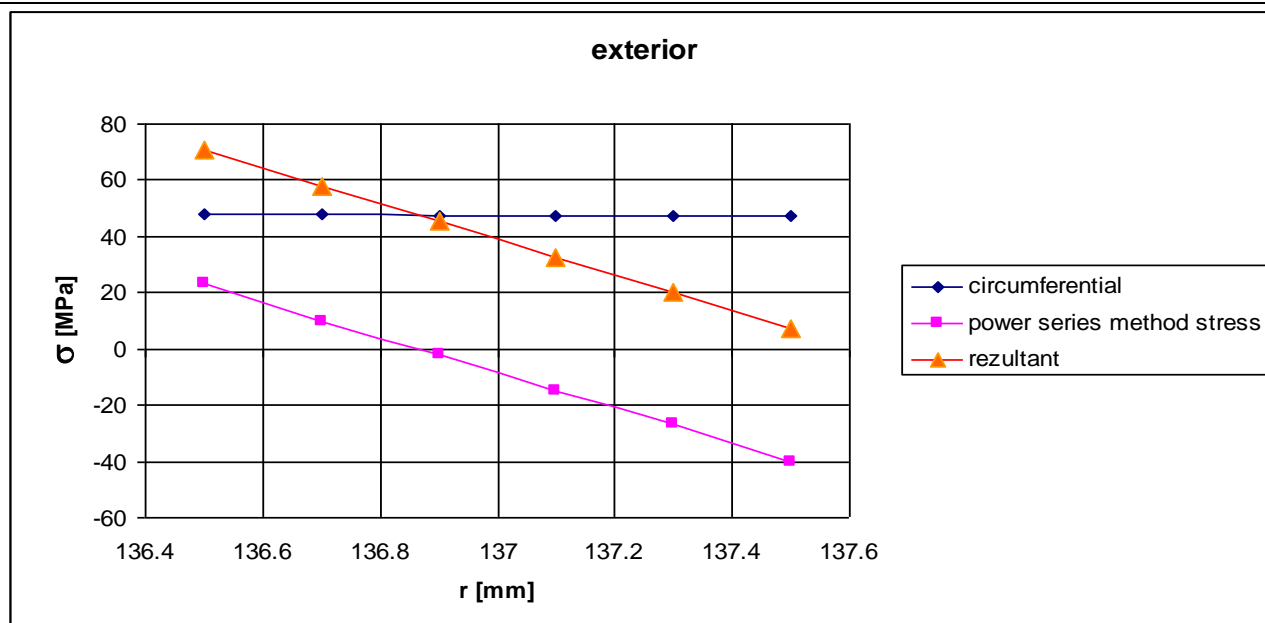
$r$ mm	$\sigma_{\theta}$ (circumferențial) MPa
137.5	47.411365
137.3	47.48047774
137.1	47.54989316
136.9	47.61961304
136.7	47.68963915
136.5	47.7599733

În tabelul 8 sunt prezentate tensiunile normale rezultante în direcție circumferențială, obținute prin suprapunerea tensiunilor reziduale calculate cu programul H-Drill și a tensiunilor dezvoltate de solicitarea presiunii interioare.

Tabelul 8.

$r$ mm	$\sigma_{\theta}$ rezult MPa
137.5	7.411365
137.3	20.48047774
137.1	32.54989316
136.9	45.61961304
136.7	57.68963915
136.5	70.7599733

În fig 7. se prezintă graficele variației tensiunilor normale în direcție circumferențială din vecinătatea suprafeței exterioare. Se observă că tensiunile reziduale de compresiune ( $\sigma_3 = -40$  MPa la cota zero a găurii) sunt atenuate de tensiunile rezultate din exploatare.



**Fig. 7.** Variația tensiunilor normale rezultante în direcție circumferențială în vecinătatea suprafeței exterioare a tubului (pe distanță de 1mm).

## 5. Concluzii

Nivelul tensiunilor rezultante maxime în direcție circumferențială, atât la interior cât și la exterior, este sub nivelul limitei de curgere determinată în cadrul încercărilor de rezistență, pe epruveta extrasă în direcție transversală ( $R_{p0.2} = 508.2633\text{MPa}$ ). Se poate trage concluzia că materialul studiat prezintă rezerve suficiente de durabilitate pentru a funcționa în regim normal de temperatură și presiune, pentru perioada normată.

## Referințe

- [1] **Vishay Micro - Measurements**, Measurement of Residual Stresses by the hole-drilling strain gage method, Tech note TN - 503 - 6, [www.vishay.com](http://www.vishay.com).
- [2] **InterTechnology Inc.**, Strain Gauge and Instrumentation for Residual Stress Measurements, [www.intertechnology.com](http://www.intertechnology.com)
- [3] **Schajer, Gary S.**, H-Drill, Hole-Drilling Residual Stress Calculation Program, Versio 2.22, user guide, 2001.
- [4] **Deutsch, I.**, Rezistența materialelor, pag. 523, Ed. didactică și pedagogică, București, 1979.