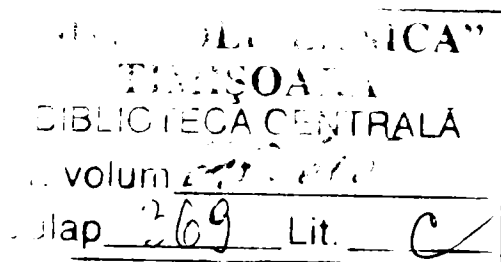


ing. **IOAN PĂDUREAN**

**CERCETĂRI ASUPRA MĂRIRII REZISTENȚEI
LA EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ
A ROTOARELOR DE TURBINĂ
TURNATE DIN OȚELURI INOXIDABILE**

TEZĂ DE DOCTORAT



Conducător Științific

Prof. univ. dr. ing. **MARIN TRUȘCULESCU**
Membru titular al Academiei de Științe Tehnice
din România

2005

CUPRINS

Cuprins	1
Cuvânt înainte	4
CAP. 1	
Studii asupra fenomenului de cavitație în mașinile hidraulice	6
1.1 Considerații teoretice asupra fenomenului de cavitație	6
1.1.1 Ecuația de mișcare a bulei cavitaționale în lichide vâscoase și incompresibile	6
1.2 Mecanisme de distrugere cavitațională și metode de protecție și atenuare a degradării cavitaționale a materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice.....	10
1.3 Cercetări din punct de vedere a distrugerii cavitaționale asupra materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice.....	12
1.4 Metode de investigație pentru evidențierea instalării și dezvoltării cavitației	15
1.5 Modelarea și simularea în laborator a degradării prin cavitație materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice.....	16
1.5.1 Instalații de laborator	16
1.5.1.1 Tunele hidrodinamice.....	17
1.5.1.2 Aparate cu disc rotitor imersat în lichid	17
1.5.1.3 Aparate vibratorii.....	17
1.6 Obiective – Perspective	22
CAP. 2	
Cercetări asupra oțelurilor inoxidabile tratate termic utilizate la fabricarea rotoarelor turbinelor hidraulice	24
2.1 Considerații generale.....	24
2.2 Materiale folosite la fabricarea organelor active a mașinilor hidraulice.....	26
2.3 Obiective urmărite în teza de doctorat.....	30
2.4 Tratamente termice aplicate oțelurilor inoxidabile selectate	31
2.4.1 Tratamente termice aplicate oțelului austenitic GX5CrNi19-10	31
2.4.1.1. Călirea de punere în soluție	31
2.4.1.2 Nitruarea oțelului inoxidabil GX5CrNi19-10	33
2.4.1.3 Sablarea și nitruarea oțelului GX5CrNi19-10	35
2.4.1.4 Simularea sudării zonelor degradate prin cavitație a oțelului inoxidabil GX5CrNi19-10.....	37
2.4.2 Tratamente termice aplicate oțelului martensitic GX4CrNi13-4	42
2.4.2.1 Călirea și revenirea oțelului martensitic.....	42
2.4.2.2 Nitruarea oțelurilor inoxidabile GX4CrNi13-4	45
2.4.2.3 Sablarea și nitruarea oțelurilor GX4CrNi13-4.....	46
2.4.2.4 Simularea sudării zonelor degradate prin cavitație a oțelurilor inoxidabile GX4CrNi13-4	46
2.5. Concluzii parțiale	49
CAP. 3	
Cercetări experimentale de laborator asupra rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 tratate termic	52
3.1 Încercări de laborator privind distrugerea cavitațională	52

3.1.1 Metodica de lucru	52
3.1.2 Obiective	53
3.2 Instalații de laborator utilizate la încercările de eroziune cavitațională.....	54
3.2.1 Regimuri de încercare. Aparatură	54
3.2.2 Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel.....	54
3.2.2.1. Principiu de funcționare. Părți componente.....	54
3.2.2.2. Descrierea instalației.....	55
3.3 Cercetări asupra rezistenței la eroziune cavitațională a oțelurilor GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 tratate termic în diferite variante tehnologice	62
3.4 Rezultate experimentale ale încercărilor de laborator. Aparatură. Regim de încercare.....	64
3.4.1 Încercări la cavitație ale oțelului austenitic GX5CrNi19-10 CS	64
3.4.2 Încercări la cavitație ale oțelului austenitic GX5CrNi19-10 CS +N.....	68
3.4.3 Încercări la cavitație ale oțelului austenitic GX5CrNi19-10 CS+S+N	72
3.4.4 Încercări la cavitație ale oțelului austenitic GX5CrNi19-10 CS +Sudat....	76
3.4.5 Încercări la cavitație ale oțelului martensitic GX4CrNi13-4 C+R.....	80
3.4.6 Încercări la cavitație ale oțelului martensitic GX4CrNi13-4 (C+R)+N.....	84
3.4.7 Încercări la cavitație ale oțelului martensitic GX4CrNi13-4 (C+R)+S+N ..	88
3.4.8 Încercări la cavitație ale oțelului martensitic GX4CrNi13-4 (C+R)+Sudat	92
3.4.9 Compararea rezistenței la cavitație în zona de stabilizare după 165 min. de atac cavitațional	97
3.5. Analiza metalografică a probelor erodate cavitațional.....	103
3.5.1. Analiza macroscopică a probelor încercate la cavitație	103
3.5.2. Pregătirea și atacul probelor metalografice	107
3.5.3. Structura probelor încercate la cavitație	109
3.5.3.1 Structura probelor din oțel austenitic CS.....	109
3.5.3.2 Structura probelor din oțel austenitic CS +N	112
3.5.3.3 Structura probelor din oțel austenitic CS +S+N.....	115
3.5.3.4 Structura probelor din oțel austenitic CS +Sudat	118
3.5.3.5 Structura probelor din oțel martensitic C+R	121
3.5.3.6 Structura probelor din oțel martensitic (C+R)+N	124
3.5.3.7 Structura probelor din oțel martensitic (C+R) +S+N.....	127
3.5.3.8 Structura probelor din oțel martensitic (C+R) +Sudat.....	130
3.6 Încercări de duritate a probelor supuse atacului cavitațional.....	133
3.6.1 Pregătire și zone de măsurare	133
3.6.2. Măsurători de microduritate pe probe din oțel austenitic CS.....	133
3.6.3 Măsurători de microduritate pe probe din oțel austenitic CS+N	134
3.6.4 Măsurători de microduritate pe probe din oțel austenitic CS+S+N ..	134
3.6.5 Măsurători de microduritate pe probe din oțel austenitic CS+Sudat.	135
3.6.6 Măsurători de microduritate pe probe din oțel martensitic C+R	135
3.6.7 Măsurători de microduritate pe probe din oțel martensitic(C+R)+N .	135
3.6.8 Măsurători de microduritate pe probe din oțel martensitic (C+R)+S+N.....	136
3.6.9 Măsurători de microduritate pe probe din oțel martensitic (C+R) +Sudat	136
3.7 Influența calității oțelului și a variantelor de tratament termic asupra rezistenței cavitaționale	145
3.7.1 Rezultate macrostructurale	145
3.7.2 Rezultate microstructurale	145

3.7.3 Rezultate ale încercărilor de duritate.....	147
3.7.4 Concluzii	149
CAP. 4	
Calcul estimative tehnico – economice.	
Evaluarea costurilor la reparația de cavitație. Deviz de cheltuieli	150
4.1 Calculul costurilor în cazul oțelului martensitic GX4CrNi13-4	150
4.2 Calculul costurilor în cazul oțelului austenitic GX5CrNi19-10.....	153
4.3 Deviz pentru calculul costurilor la reparația de cavitație.....	157
4.3.1 Date de intrare pentru evaluarea costului la reparația de cavitație pentru un agregat din CHE Porțile de Fier I	157
4.3.2 Deviz de calcul pentru reparația la cavitație a turbinelor	158
4.4 Concluzii	159
CAP.5	
Cercetări privind conceperea, proiectarea, și realizarea unui aparat vibrator magnetostrictiv cu generatorul de ultrasunete din componente semiconductoare.....	160
5.1 Sisteme autooscilante generatoare de câmpuri magnetice alternative. Generalități.....	160
5.2 Cercetări privind înlocuirea părții electronice a aparatelor vibratorii de tip T1 (Potencz-1958) cu componente semiconductoare T3 (Pădurean - 2005)	164
5.3 Generator de ultrasunete prin magnetostricțiune pe baza de semiconductoare.....	165
5.3.1 Sisteme rezonatoare în condiții reale de funcționare	165
5.3.2 Blocul oscilator	167
5.3.3 Amplificatorul de putere	171
5.3.4 Blocul de alimentare.....	176
5.3.5 Descrierea și utilizarea aparatului	177
5.3.6 Date tehnice principale.....	179
5.3.7 Precizări și concluzii.....	179
CAP. 6	
Considerații finale, contribuții originale, probleme de viitor.....	189
6.1. Implicațiile fenomenului de cavitație asupra exploatării și duratei de viață a mașinilor hidraulice	189
6.2. Tehnologia și metodologia de cercetare a rezistenței la cavitație a materialelor.....	190
6.3. Materiale selectate pentru cercetări ale rezistenței cavitaționale din grupa oțelurilor inoxidabile.....	191
6.4. Cercetări asupra rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 tratate termic în diverse variante tehnologice și sudate	194
6.5. Proiect tehnic și de execuție al unui aparat vibrator pentru încercări la cavitație	202
6.6. Contribuții proprii la studiul fenomenului de cavitație	203
6.7. Direcții posibile de continuare a cercetărilor rezistenței la cavitație a materialelor.....	205
Bibliografie.....	224
Anexe	232

SUMARY

CHAPTER 1

Studies on the cavitation phenomenon in the hydraulic machines..... 6

1.1 Theoretical consideration on the cavitation phenomenon 6

1.2 Cavitation destruction mechanism and methods of protection and diminution of cavitation degradation on materials used in the manufacturing of hydraulic machines. 10

1.3 Researches on the cavitation destruction of the materials used in the manufacturing of hydraulic machines. 12

1.4 Investigation methods used the appearance and development of the cavitation. Big 15

1.5 Laboratory analyzing and stimulating of the cavitation destruction of the materials used in the manufacturing of hydraulic machines 16

CHAPTER 2

Researches of thermally treated stainless steels used to produce runners for hydraulic turbines. 24

2.1 General 24

2.2 Materials used to make the active ports of the hydraulic machines..... 26

2.3 Objectives followed in the thesis. 30

2.4 Thermal treatments on selected stainless steels..... 31

2.5 Partial conclusions 49

CHAPTER 3

Laboratory researches on the cavitation resistance of stainless steels type thermally treated. 52

3.1 Laboratory tests on cavitation destruction..... 52

3.2 Laboratory installations used at tests of cavitation erosion. 54

3.3 Researches on the resistance at cavitation erosion of stainless steels thermally treated in different technologies. 62

3.4 Test results. Installations. Testing methods. 64

3.5 Metallographic analyses of samples with cavitation erosion. 103

3.6 Hardness tests of the samples under cavitation..... 133

3.7 Influence of steel quenching and thermally treated samples on the cavitation resistance. 145

CHAPTER 4

Technical- economical calculations. Cost calculation at the cavitation mending. Spending schedule. 150

CHAPTER 5

Researches for designing and making a magnetostrictive vibration with the ultrasound generator with semi conducting components. 160

CHAPTER 6

Final consideration, original contributions, future problems..... 189

CUVÂNT ÎNAINTE

Distrugerea materialelor prin eroziune cavitațională rămâne o provocare permanentă, actuală și de perspectivă a oamenilor de știință din întreaga lume care au preocupări legate de proiectarea și exploatarea mașinilor hidraulice, precum și a celor care lucrează și cercetează în domenii conexe.

Problemele sunt multiple, semnele de întrebare la fel, iar răspunsurile prea puține. Am încercat să mă alătur celor mulți, cu preocupări în domeniu și să-mi aduc modesta contribuție la temelia edificiului.

Complexitatea fenomenului distrugerii cavitaționale depinde de foarte mulți factori caracteristici materialului și fluidului cavitant, obținerea unor materiale cu rezistență bună la distrugerea cavitațională, rămâne un deziderat important ce stă în fața cercetătorilor.

Majoritatea studiilor sunt orientate spre stabilirea unor materiale rezistente la cavitație, spre analiza și corelarea tuturor mărimilor ce influențează distrugerea cavitațională. Din analiza normelor și standardelor de fabricație ale oțelurilor inoxidabile care pot fi folosite la turnarea rotoarelor de turbină, am ales spre analiză două mărci de oțeluri: oțelul austenitic GX5CrNi19-10 și oțelul martensitic GX4CrNi13-4. Aceste mărci au fost tratate inițial prin călire de punere în soluție, respectiv călire/revenire urmate de tratamente de nitrurare și sablare /nitrurare.

Am încercat prin diferite variante tehnologice de tratament termic, obținerea unei anumite stări structurale ale cărei faze și constituenți structurali, prin natura, mărimea și gradul lor de dispersie, crează posibilitatea obținerii caracteristicilor fizico-mecanice și chimice, indispensabile materialelor cu bună rezistență cavitațională.

Am încercat la cavitație în laboratorul MH Timișoara, probele confecționate din mărcile de oțel supuse diferitelor variante tehnologice de tratament termic, comparând curbele caracteristice de cavitație, și trăgând concluziile corespunzătoare în ceea ce privește alegerea mărcilor de oțel cele mai bune, atât din punct de vedere al rezistenței la cavitaționale, cât și din punct de vedere al costurilor.

După tratamentele termice mai sus menționate am făcut analize macro și microscopice prin care am lămurit, în parte, mecanismul distrugerii cavitaționale (desprinderi de microgrăunți, topiri microzonale, stări tensionale, termice și mecanice care au provocat microfisuri, modificări de faze în substraturi și expulzarea de material prin craterele formate). Încercările de duritate au pus în evidență caracteristici mecanice după aceste tratamente.

Estimarea costurilor cu intervenția la reparații prin sudare și a materialelor m-a dus la concluzia că oțelul martensitic este recomandat pentru turnarea rotoarelor de turbină.

Am proiectat și executat un generator de frecvență care să înlocuiască partea electronică a instalației actuale cu o versiune nouă, bazată pe dispozitive semiconductoare, mult mai fiabilă și mai puțin costisitoare. În realizarea noului aparat hotărâtoare a fost colaborarea și ajutorul dat de dl. Virgil Popescu, tehnician electronist la Facultatea de Electronică și Telecomunicații.

Mulțumesc pentru ajutorul dat de prietenii și colaboratorii de la SC. UCM Reșița SA., d-nii: dr. ing Iulian Georgevici, ing. Octavian Megheleş, ing. Ioan Peia, dr. ing. Iosif Radu.

În realizarea tezei un real sprijin l-am primit de la șeful catedrei de Știința Materialelor dl. Conf. Dr. ing Aurel Răduță, precum și de la dl. tehnician Lazăr Soveja, în cercetările privind analizele macroscopice, microscopice și de micoduritate a probelor degradate cavitațional, cărora le mulțumesc pentru ajutorul dat.

De mare ajutor în realizarea încercărilor experimentale, precum și a bunei funcționări aparaturii magnestocactice mi-a fost dl. ing. Iosif Potencz, căruia îi mulțumesc încă odată.

Mirările mele continue, au provocat discuții plăcute, utile, poate uneori agasante din partea mea și sfaturi înțelepte din partea dl. Prof. Dr. ing. Mircea Popoviciu. Îi mulțumesc, recunoscând că și cu ajutorul domniei sale am trecut, în cunoașterea mea, de la cauză la efect, de la dinamica bulei cavitaționale la structura cristalină a materialului erodat. Faptul că s-a aplecat asupra tezei încă din faza de manuscris și sugestiile pe care mi le-a făcut cu generozitate au dat contur și sper, o modestă valoare tezei.

Fără îndrumarea continuă a d-lui Prof. Dr. ing. Marin Trușculescu această lucrare nu ar fi putut să apară. Domnia sa m-a înțeles, în primul rând ca om, întinzându-mi o mână de ajutor, într-un moment greu al carierei mele. Pentru efortul domniei sale de a mă îndruma pas cu pas, cu îngăduință și răbdare, pentru deosebitele sfaturi ce mi le-a dat, îi mulțumesc rămânând-i recunoscător.

Mândria de a-l avea ca mentor m-a stimulat și provocat pentru a elabora teza, domnia sa, având capacitatea, ca fără a fi imperativ să obțină de la inerlocutor tot ceea ce dorește.

Profesorul Marin Trușculescu, având harul magistrului autentic: să creeze știință, să formeze discipoli și să transmită cunoștiițe, m-a ajutat să-mi ating ținta, lucru pe care nu îl voi uita niciodată.

Sper ca lucrarea să aducă unele lămuriri în ceea ce privește degradarea cavitațională, rezultatele obținute, mai ales în ceea ce privesc intervențiile la reparații prin sudare a rotoarelor turbinelor hidraulice fiind foarte încurajatoare, putând fi de un real folos industriei românești producătoare de echipamente hidromecanice care intră în componența CHE.

Cercetările privind rezistența la eroziune cavitațională, a celor două mărci de oțeluri, din familia oțelurilor inoxidabile tratate termic îmbogățesc studiile privind cavitația și mărirea duratei de viață a mașinilor hidraulice.

Teza nu și-a propus un studiu exhaustiv și nu a putut să rezolve toate problemele, cercetările viitoare urmând a adăuga elemente noi cercetării.

CAPITOLUL 1

STUDII ASUPRA FENOMENULUI DE CAVITAȚIE ÎN MAȘINILE HIDRAULICE

1.1 Considerații teoretice asupra fenomenului de cavitație

Cavitația este un fenomen complex, cu repercusiuni negative asupra funcționării agregatelor hidraulice datorită în primul rând căderii curbilor caracteristice energetice prin modificarea caracteristicilor hidrodinamice ale curentului, prin distrugerea materialelor, prin zgomote și vibrații, care apar la surparea – implozia cavităților sau bulelor cavitaționale.

Cavitația este un proces dinamic de formare a unor bule sau cavități umplute cu vapori de apă sau gaze, transportul acestora în masa unui lichid și surparea – implozia lor în momentul atingerii unei presiuni minime, critice – în general presiunea de vaporizare a lichidului la temperatură constantă, având drept consecință distrugerea peretelui solid al mașinii hidraulice [2, 3, 4].

Dinamica bulei cavitaționale, care constă în determinarea câmpurilor de presiune și viteze, de viteza peretelui ce implodează datorită gradientilor de presiune și temperatură, se studiază în general pornind de la ipoteza bulei singulare de formă sferică într-un fluid polifazic real, neomogen și anizotrop, caracterizat prin proprietatea de fluiditate, rezultat din amestecul nemiscibil a cel puțin două corpuri cu stări de agregare diferite (lichid – solid, lichid – gaz, gaz – solid). La interfața fazelor sunt valabile ecuațiile de salt cum ar fi: condițiile de conservare a masei și momentului.

Studiul dinamicii bulei cavitaționale a fost abordat de mulți autori datorită importanței efectelor cavitației asupra funcționării mașinilor hidraulice, studiu care a fost cu atât mai complet cu cât s-a făcut într-un fluid real, domeniu în care rămân valabile legile constitutive ale mediilor continue, precum și teoria relaxării elastice a lui Maxwell care precizează că într-o anumită stare a materiei se manifestă în același timp fluiditatea din curgerea vâscoasă a fluidelor precum și deformarea elastică caracteristică solidelor.

Apariția acestor cavități umplute cu vapori și gaze, la viteze mari și presiuni mici, a sesizat-o Euler în 1754 iar formularea matematică a fenomenului aparține lui W. H. Besant iar mai apoi Rayleigh urmând să stabilească ecuația care îi poartă numele și care descrie surparea peretelui bulei cavitaționale.

1.1.1 Ecuația de mișcare a bulei cavitaționale în lichide vâscoase și incompresibile

Primul model teoretic a dinamicii bulei cavitaționale a fost elaborat de Rayleigh în 1917.[2,3]

Acest model admite următoarele ipoteze:

- 1) se admite o bulă sferică de rază $R(t)$ care își păstrează geometria tot timpul oscilației. (fig.1.1)
- 2) bula este plină cu vapori și gaze.
- 3) este plasată într-un lichid nelimitat extins la infinit
- 4) presiunea la infinit $p_{\infty}=ct$, dar presiunea variază suficient de brusc la peretele bulei
- 5) lichid incompresibil ($\rho=ct$)
- 6) efectul forțelor masice și a transferului de căldură sunt neglijabile:
 $\bar{f} = \bar{0}$

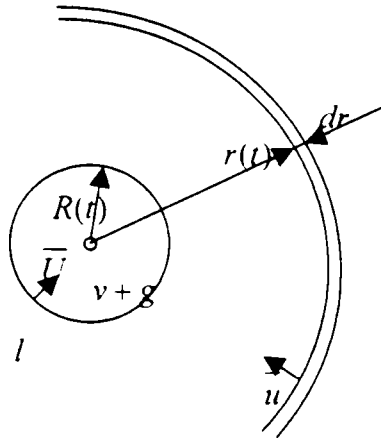


Fig. 1.1

**Modelul Rayleigh al bulei cavitaționale
 conținând vapori și gaz**

Considerăm la distanța "r" în jurul bulei o suprafață de grosime "dr".
 În timpul surpării :

$$U = \frac{dR}{dt} = \dot{R} \tag{1}$$

U este viteza peretelui.

$$u = \frac{dr}{dt} \tag{2}$$

u este viteza lichidului la raza r.

În cazul mișcării lichidului interior în ipoteza simetriei sferice, mișcarea este irotațională.

$$rot \bar{u} = \nabla \times \bar{u} = \bar{0} \tag{3}$$

Vitezele derivă dintr-un potențial:

$$\Phi(r,t) = \nabla u \tag{4}$$

În mișcare simetrică, după Lamb:

$$\Phi = \frac{R^2}{r} U \tag{5}$$

Ecuția de continuitate:

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \tag{6}$$

Ecuția Euler:

$$\frac{d\bar{u}}{dt} = \bar{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (7)$$

Prin dezvoltarea derivatei substanțiale ținând cont că $\bar{f} = \bar{0}$ și $\bar{u} = -\nabla\Phi(r,t)$:

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial\bar{u}}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (8)$$

Sub forma Lamb – Gromeko ecuația Euler se scrie:

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{u^2}{2} \right) + \text{rot}(\bar{u} \times \bar{u}) = \frac{1}{\rho} \nabla p \quad (9)$$

În mișcarea simetrică când ea derivă dintr-un potențial:

$$\text{rot} \bar{u} = \bar{0} \quad (10)$$

rezultă deci

$$\frac{\partial\bar{u}}{\partial t} + \nabla \left(\frac{u^2}{2} \right) = -\frac{1}{\rho} \nabla p \quad (11)$$

Ținând cont de (4) rezultă:

$$-\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{u^2}{2} = -\int_{r_x}^{r(r,t)} \frac{dp}{\rho} \quad (12)$$

Observație

$$\Phi = \Phi(r,t) = \frac{R^2}{r} \dot{R} \quad (13)$$

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{1}{r} \left(2R\dot{R}^2 + R^2 \ddot{R} \right) \quad (14)$$

$$\left(\frac{\partial\Phi}{\partial t} \right)_{r=R} = 2\dot{R}^2 + R\ddot{R} \quad (15)$$

$$\int \frac{dp}{\rho} = -\frac{p(r,t) - p_x}{\rho} \quad (16)$$

Rezultă:

$$\dot{R}\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{p(R) - p_x}{\rho_l} \quad (17)$$

(17) reprezentând ecuația Rayleigh

sau sub forma:

$$R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = \frac{p(R) - p_x}{\rho_l} \quad (18)$$

Relația (18) reprezentând **forma generală a ecuației Rayleigh** a mișcării pentru o bulă sferică, într-un lichid incompresibil.

Unde $p(R) - p_\infty = p = ct$.

Unde $p(R)$ este presiunea la peretele bulei.

Relația (18) este deosebit de importantă dar nu permite desprinderea unei concluzii practice imediate.

Se utilizează frecvent relația:

$$U^2 = \frac{2p_{\infty}}{3\rho_l} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right] \quad (19)$$

În care se vede imediat că pentru o bulă complet implodată ($R=0$) viteza pereților devine $U = \infty$, ciocnirea cu viteza $U = \infty$ a particulelor care înconjoară peretele bulei R determină presiuni $p(R) = \infty$, (în realitate presiunile putând ajunge la 10.000 atm., în bulă fiind vapori de apă și gaze).

- din Ecuația de continuitate

$$- 4\pi r^2 u = 4\pi R^2 U \quad (20)$$

- rezultă

$$- u = U \frac{R^2}{r^2} \quad (21)$$

- Energia cinetică pentru stratul "dr" este :

$$- dE_c = dm \frac{u^2}{2} = \rho_l 4\pi r^2 dr \frac{u^2}{2} = 2\pi\rho_l u^2 r^2 dr \quad (22)$$

- Energia cinetică pentru întreaga masă

$$- E_c = \int_R^{\infty} 2\pi\rho_l u^2 r^2 dr = 2\pi U^2 R^4 \int_R^{\infty} \frac{dr}{r^2} = 2\pi\rho_l U^2 R^3 \quad (23)$$

- Lucrul mecanic la parcurgerea lui dr va rezulta:

- Forța se scrie:

$$- F = 4\pi r^2 p_{\infty} \quad (24)$$

$$- dL = F dr = 4\pi r^2 p_{\infty} dr \quad (25)$$

$$- L = 4\pi p_{\infty} \int_R^{R_0} r^2 dr = \frac{4}{3}\pi p_{\infty} (R_0^3 - R^3) \quad (26)$$

- unde R_0 este valoarea inițială a lui R

- Energia cinetică trebuie să fie egală cu lucrul mecanic:

$$- \frac{4}{3}\pi p_{\infty} (R_0^3 - R^3) = 2\pi\rho_l U^2 R^3 \quad (27)$$

$$-U^2 = \frac{2p_r}{3\rho_l} \left[\frac{R_0^3 - R^3}{R^3} \right] \quad (28)$$

În final rezultând:

$$U = \sqrt{\frac{2p_r}{3\rho_l} \left[\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right]} \quad (29)$$

1.2 Mecanisme de distrugere cavitațională și metode de protecție și atenuare a degradării cavitaționale a materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice

Distrugerea materialelor prin eroziune cavitațională este efectul sinergic al mecanismelor hidrodinamice și mecanice.

Fenomenul mecanic al distrugerii cavitaționale este dat de modul în care materialul preia energia transmisă prin surparea bulelor cavitaționale iar energia absorbită de material depinde de: proprietățile fizico – mecanice, structura cristalină și intercristalină, compoziția chimică și este folosită pentru deformații elasto-platice, fisurări și expulzări de grăunți sau subgrăunți.

Comportarea materialelor la cavitație nu poate fi descrisă folosindu-ne de niște dependențe simple.

Aceasta datorită complexității solicitărilor cavitaționale și a complexității mecanismului prin care materialul răspunde acestei solicitări.

Voi enumera mai jos câțiva factori care duc la solicitarea cavitațională și care influențează comportarea materialului și implicit a rotorilor de turbină și în final a întregului ansamblu.

a) **-solicitarea mecanică** intensă și rapidă prin microizbituri. Această solicitare este foarte variată, fiind funcție de o serie de factori fizici,

b) **- atacul chimic**, determinat de apariția în zona de implozie a unor presiuni și temperaturi extreme, precum și de prezența în apă a oxigenului liber și a vaporilor de apă.

c)-Un al treilea factor care-l potențează pe cel precedent (cel chimic), ar fi existența unor **potențiale de natură electrică** care accelerează atacul chimic.

d)- **șocul termic** care prin apariția locală a unor temperaturi foarte mari provoacă topirea locală a materialului.

Solicitarea este deosebit de complexă, factorii care caracterizează materialul atacat sunt foarte numeroși:

- a.-duratea;
- b.-ductilitatea;
- c.-proprietăți de autocălire în timpul solicitării;
- d.-termostabilitatea structurală;
- e.-modulul de elasticitate;
- f.-densitatea;

- g.-limita la oboseală;
- h.-energia de deformare la rupere;
- i.-reziliența;
- j.-conductibilitatea termică;
- k.-punctul de topire;
- l.-inerția chimică;
- m.-aderența oxizilor la suprafață;
- n.-structura cristalină;
- o.-conductibilitatea electrică.

De-a lungul timpului au existat mai multe teorii privind distrugerea cavitațională:

Prima teorie a fost cea cunoscută și tratată ca și mecanismul imploziei și dezvoltată după modelul lui Rayleigh. După acest model la surparea bulei cavitaționale, la peretele solid apar presiuni de 10^4 atm. pe suprafețe mici, într-un timp de câteva microsecunde. De fapt studiile efectuate privind dinamica fenomenului cavitației se plasează între ruptura dinamică și explozie, solicitarea ca atare având loc pe arii mici și durate de ordinul microsecundelor [3, 4].

A doua teorie acceptă o bulă cavitațională, luând în considerare efectul impulsurilor de presiune care apar la surparea undelor de șoc ce se propagă din centru către peretele solid. Bula se surpă și apoi se destinde elastic într-un lichid compresibil [3, 4].

Alți autori sunt adepții microjeturilor, considerând că acestea ar fi hotărâtoare în distrugerea cavitațională [3, 4].

În general se consideră că mecanismul mecanic al distrugerii cavitaționale este în cele din urmă suma celor două:

- a) mecanismul undelor de șoc
- b) mecanismul microjeturilor

Concluzia la care s-a ajuns și acceptată de majoritatea cercetătorilor este că efectul mecanic al distrugerii cavitaționale este întotdeauna prezent iar peste el se suprapun și efectele termogalvanic, electrochimic și chimic – care îl potențiază.

Efectele cavitației nu pot fi înlăturate complet nici din punct de vedere hidrodinamic și nici din punct de vedere al materialelor din care sunt fabricate mașinile hidraulice, pentru că presiunile și temperaturile enorme care apar în procesul de cavitație fac imposibil acest lucru – nici un material cunoscut nu rezistă presiunilor extrem de mari ce apar la implozia bulei cavitaționale.

Totuși s-au făcut încercări multiple pentru **atenuarea efectelor cavitației** și pentru protecția zonelor expuse prin următoarele căi: proiectarea sau reproiectarea organelor componente ale mașinilor hidraulice în scopul asigurării unei funcționări normale fără cavitație sau cu cavitație industrial admisă, precum și folosirea unor materiale de mare rezistență la distrugere cavitațională. Paletele de turbină hidraulică turnate din oțeluri inoxidabile rezistă cel mai bine la eroziune cavitațională dacă prin tehnologia de elaborare se obține un semifabricat de o anumită finețe și omogenitate structurală cu un anumit raport și structură a constituentilor structurali, compoziție chimică și proprietăți fizico – mecanice bine determinate [10, 11].

O altă metodă de atenuare a efectului distructiv al cavitației este cea a acoperirilor prin sudare sau pulverizare. Excelente sunt acoperirile depuse prin sudură din oțeluri inoxidabile sau bronzuri, dar tehnologia este greoaie, învelișurile

metalice depuse prin pulverizare sunt tentante fiind ușor aplicabile și ieftine, dar problema aderenței nu este rezolvată.

Lichtman, folosind cercetările proprii și ale altora, recomandă acoperirea prin pulverizare cu elastomeri, datorită bunei rezistențe la cavitație. Însă principala dificultate o constituie lipsa aderenței totale la materialul de bază și imposibilitatea obținerii unei geometrii prescrise pentru paletelile rotoarelor turbinelor. În plus sfâșierea elastomerilor creează probleme deosebite.

La aceste materiale primele semne de erodare se evidențiază prin ruperea (sfâșierea) și dislocarea elastomerilor și nu prin indentații pe suprafața acestora.

1.3 Cercetări din punct de vedere al distrugerii cavitaționale asupra materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice

Realizarea unor materiale cu rezistență bună la eroziune cavitațională și acceptabile din punct de vedere al prețului de cost a necesitat studiul lor în laborator prin analiza sistemică a comportării lor la cavitație. Studiile sunt în general realizate global prin diverse metode, cercetătorii căutând a da relații empirice sau semiempirice între mărimile fizice și parametrii de referință caracteristici eroziunii cavitaționale. Gradul de aplicabilitate a relațiilor astfel stabilite este limitat.

Astfel de studii au fost efectuate printre alții de Thiruvengadam [114], Steller [104], Hammitt F. G. [49, 50, 51] și Bordeiașu [10, 11].

Thiruvengadam stabilește și o curbă tip pentru viteza de eroziune cavitațională [105], **fig.1.2**, și recomandă ordonarea materialelor după viteza de eroziune cavitațională din zona de stabilizare v_s (zona 4).

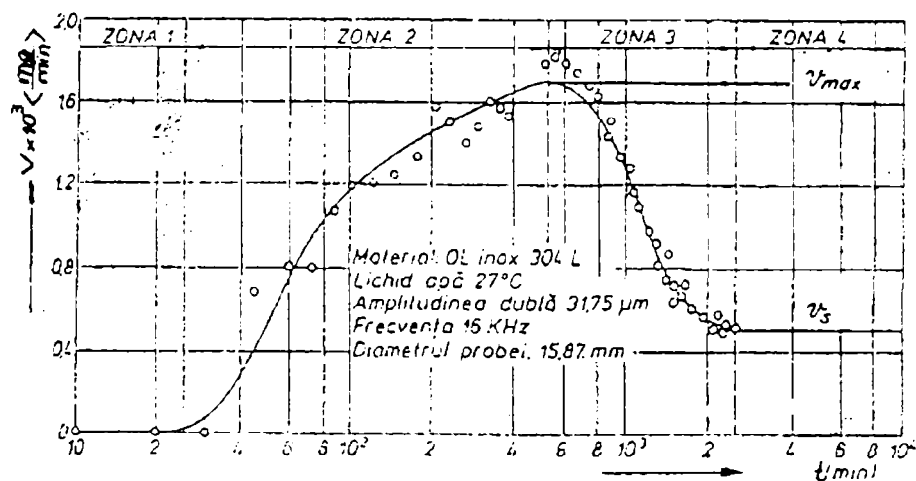


Fig.1.2 Variația vitezei de eroziune cavitațională

Dintre diferitele metode de evaluare a distrugerii prin eroziune cavitațională, cea care dă pierderea de masă este cea mai răspândită. Ea constă în măsurarea regulată a greutății probelor cu o balanță cu o precizie ridicată. Se deduce apoi pierderea de masă acumulată în funcție de durata totală a eroziunii. Intervalul de

timp între două măsurători succesive depinde de rezistența materialului și de puterea distrugerii erozive a dispozitivului de cavitație utilizat [39]. Diagrama variației pierderii de masă cumulată este funcție de timpii de eroziune totali reprezintă curba de eroziune a materialului. Este dificil să se determine pe această curbă perioadele semnificative care ar putea caracteriza comportarea la cavitație. Se trasează, din această cauză curba variației vitezei de eroziune definită ca fiind pierderea de masă instantanee în funcție de timpii de expunere la atac cavitațional. Alura tipică a celor două curbe caracteristice pentru un aliaj ductil se prezintă în **fig.1. 3**. Se disting 4 stadii diferite (Hobbs 1967, Preece 1979) [39].

I. Perioada de incubație ($t < t_1$)

Pierderea de masă este neglijabilă din cauza deformației și deplasării ductile a materialului, care disipează astfel o parte a energiei de impact

II. **Perioada de accelerare** ($t_1 < t < t_a$) – datorită căreia distrugerea progresivă se apropie de saturație și viteza de eroziune crește atingând maximul $\dot{e}_m = v_m$. Se constată „aparitia indentatiilor” mai mult sau mai puțin intense și întinse care provoacă ondularea suprafeței distruse într-un strat relativ subțire. Durificarea materialului și multiplicarea fisurilor crește probabilitatea de rupere și deci, eroziunea.

III. **Perioada de staționare** – este un palier unde viteza de eroziune este constantă. Profilul distrugerilor atinge saturația. Această perioadă este mai mică sau mai mare în funcție de rezistența materialului și de tipul dispozitivului cavitant.

IV. **Perioada de atenuare** – corespunde unei (încetiniri) micșorări a vitezei de eroziune. Apariția acestei perioade nu se datorează numai comportamentului intrinsec al materialului, ea este atribuită diferitelor mecanisme de interacțiune între curent și probă. Explicațiile cel mai des propuse țin cont de adaptarea între starea suprafeței probei și curent, care diminuează dinamica cavitației. (Thiruvengadam ș.a, 1964, Wood ș.a, 1967)[39]. Se poate imagina efectul de „pernă de aer” dizolvat sau de lichid prins între rugozități la suprafața erodată având ca efect amortizarea intensității impactului cavitațional și ducând la micșorarea eroziunii.

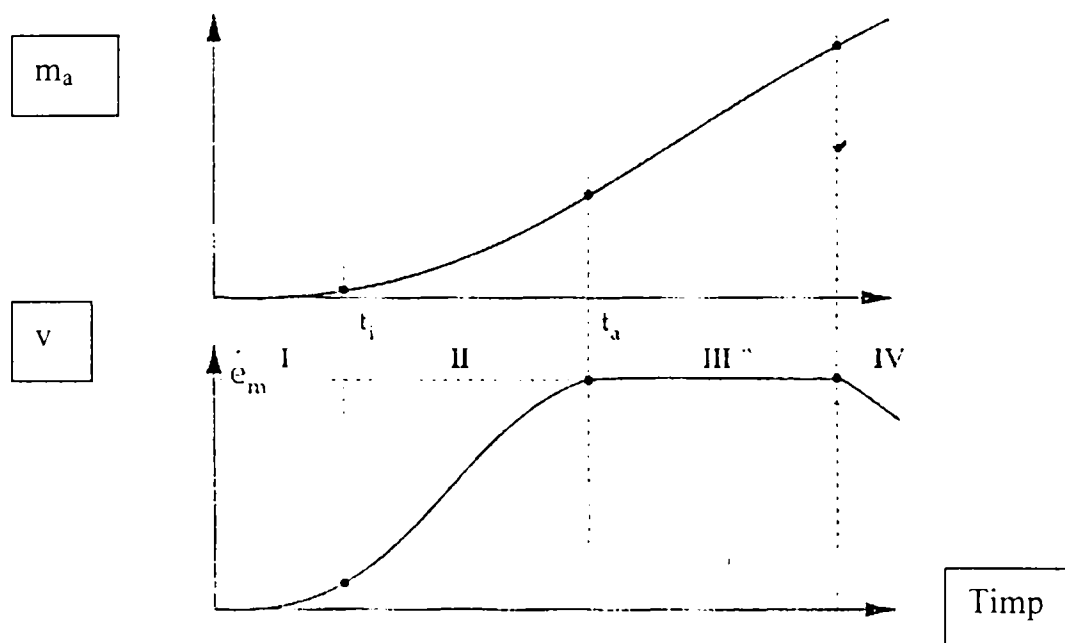


Fig.1.3 Variația pierderii de masă și a vitezei de eroziune cavitațională cu timpul de atac

Aspectul suprafeței în această perioadă de atenuare este caracterizată printr-o rugozitate mai pronunțată și de cratere mai întinse decât în perioadele precedente.

Pentru a putea compara eroziunea proprie materialului și a evita parametrii extrinseci legați de condițiile experimentale, se utilizează noțiunea de „viteză medie de penetrare” („mean depth of penetration rate MDPR). Ea este definită ca pierderea de volum împărțit la suprafața erodată (Knopp, Daily & Hammit 1970) [39].

Materialele distruse prin eroziune cavitațională pe care le-am studiat în lucrarea [7] “Consideration about how the structural constituents influenced the metal destruction by cavitation” au fost analizate din punct de vedere al structurii, a domeniilor de utilizare și a parametrului cavitațional MDPR (vezi **tab. 1.1**),

Tab. 1.1

Material	Structură	Domenii de utilizare	MDPR [mm/h]
OLC 15	90%F+10%P	Componente hidraulice	0,0208
OT 500-3	60%F+40%P	Camera rotorului	0,0728
OL 370-3k	85%F+15%P	Inele de ghidare la vane	0,0617
41MoCr11	B+M	Componente hidraulice	0,0245
40Cr10	B+M	Componente hidraulice	0,0322
Carbon I – RNR	B+M	Elice navală	0,0356
Oțel inoxidabil III – RNR	50%M+50%F	Elice navală	0,0131
T07CuMoMnNiCr–165 Nb	40%A+40%M+20F%	Palete rotor turbine	0,0120
T09CuMoMnNiCr–185 Ti	60%A+10%M+30F%	Palete rotor turbine	0,0125
CuNiAl III – RNR	Soluție solidă	Elice navală	0,0131
Alamă navală	Soluție solidă	Elice navală	0,0609

Unde: F – ferită; P – perlita; A – austenita; M – martensita; B – bainita

fac parte din categoria aliajelor Fe-C (utilizate în realizarea pompelor și turbinelor, elicelor navale și componentelor aparaturii hidraulice de comandă, distribuție și reglare), alamelor și bronzurilor navale folosite la fabricarea elicelor navale.

În momentul actual, cu tot progresul realizat în domeniul științei și tehnologiei materialelor, modelării matematice a hidrodinamicii cavitaționale, creșterii preciziei aparatelor de măsură și control a distrugerilor realizate, nu se poate stabili ponderea exactă a caracteristicilor mecanice ale materialelor și a parametrilor funcționali, ai mașinilor industriale asupra gradului de distrugere cavitațională. De asemenea nu se poate oferi o lege după care acești factori acționează, în timp, asupra distrugerii cavitaționale a materialelor. Din acest motiv

relațiile sunt stabilite empiric pe baza multor rezultate experimentale. Așa cum am constatat din studiile efectuate, aceste relații au o arie de aplicabilitate foarte restrânsă. Ele dau totuși informații în cadrul aceleiași familii de materiale (exemplu oțelurile inoxidabile) [10, 11].

1.4 Metode de investigație pentru evidențierea instalării și dezvoltării cavitației

Metodele cu cele mai bune rezultate sunt:

- a) execuția diverselor palete ale aceluiași rotor din materiale diferite
- b) folosirea unor probe standard, confecționate din diferite materiale, fixate în zonele supuse unor intense distrugeri cavitaționale
- c) acoperirea zonelor supuse eroziunii cavitaționale cu metale ușor destructibile

Studiile făcute de cercetători au arătat că paletetele din oțel carbon erau distruse pe suprafețe mari cu adâncimi de până la 30mm.

Paletetele placate cu oțel inoxidabil prezentau distrugeri pe adâncimi de până la 15mm, iar paletetele confecționate din oțel inoxidabil martensitic nu prezentau distrugeri semnificative.

Rezultă deci că distrugerile paletelor depinde de materialul folosit.

Studiile și cercetările făcute de M. Popoviciu [93] pe turbina KVB 178-27 de la Porțile de Fier I arată că unul și același material are comportare diferită la cavitație funcție de intensitatea procesului, care variază cu locul unde se manifestă fenomenul pe paletă.

Prin metoda a treia evaluările eroziunii cavitaționale efectuate după fiecare regim de funcționare în funcție de urmele lăsate s-a arătat că distrugerile cavitaționale depind de parametri tehnico-funcționali ai turbinei: H – căderea, P – puterea, H_s – cota de instalare, Q – debitul, D – diametrul rotorului.

Studiile efectuate pe turbine Francis după diferiți timpi de exploatare, înălțimi geometrice de aspirație și puteri instalate arată că zonele cu cea mai mare probabilitate de distrugere sunt: spatele bordului de atac, înspre inelul rotorului și dinspre bordul de fugă și inelul rotorului. La turbinele Kaplan se remarcă plăgi cavitaționale dispuse în apropierea bordului de atac, acoperind o suprafață mare însă având o adâncime redusă. Pe paletetele rotorului apar simultan atât "cavitația de profil" cât și "cavitația de vârtej".

Evaluarea volumului de material erodat se realizează pe baza consumului de electrozi folosiți la lucrările de reparații, nivelul erorilor fiind mare: 200 – 300%.

Altă metoda este determinarea ariei de distrugere și adâncimii medii de pătrundere.

Pentru adâncimea medie de pătrundere e_m , Edel și Palaiev [77] propun următoarea relație de calcul:

$$e_m = A \cdot t^n \quad (30)$$

unde $A = (0,7 - 3)10^{-7}$ – coeficient ce caracterizează intensitatea eroziunii

$n = (1,6 - 2)$ – exponent ce caracterizează materialul

t – durata de exploatare în ore

Ordonarea și evaluarea rezistenței materialelor la eroziunea cavitațională se face după unul din criteriile [10, 11]:

1. panta curbelor de pierdere masică $m(t)$ sau volumică $v(t)$, $tg\alpha$, în zona de stabilizare ;
2. viteza de staționare a eroziunii (de stabilizare, finală de palier), v_s ;
3. viteza maximă a eroziunii v_{max} ;
4. rezistența normalizată la cavitație R_n ;
5. viteza adâncirii medii sau maxime de pătrundere a eroziunii, MDPR respectiv $MDPR_{max}$, sau inversul acestora, $1/MDPR$ respectiv $1/MDPR_{max}$.
6. timpul de incubație ;
7. durata necesară obținerii unei pierderi volumice sau masice date ;
8. durata necesară realizării unei anumite adâncimi de pătrundere.

Deoarece rezultatele experimentale sunt influențate de parametri tehnico – funcționali ai stațiunii, permițând un grad de subiectivitate, nici unul din parametri menționați nu este acceptat, ca unic, de cercetători.

Dintre acești parametri, timpul de incubație este folosit cu precădere la aprecierea materialelor testate în tunele hidrodinamice și aparate cu disc rotitor.

Duratele de realizare a unei pierderi (masice, volumice sau gravimetrice) date și a unei anumite adâncimi de pătrundere, practic, azi nu se mai utilizează, datorită consumurilor prea mari pentru materiale cu rezistența sporită, de tip oțeluri stelite și inoxidabile, la care aceste durate au valori de ordinul sutelor de ore, pentru atacurile din tuneluri cavitate și aparate cu disc rotitor de zeci de ore, pentru distrugerile produse în aparate vibratorii.[BORDEAȘU]

Normele ASTM [123] recomandă parametrii 1, 2, 3, și 4, iar Thiruvengadam [114] viteza de stabilizare a eroziunii. Pentru viteza de eroziune cavitațională maxima normele ASTM [123] recomandă acea valoare după care viteza devine descrescătoare. Se face această recomandare, deoarece valorile ridicate din primele minute ale atacului cavitațional (obținute cu precădere în aparatele vibratorii) sunt puternic afectate de praful abraziv și nivelul rugozității din suprafața atacată [10].

Majoritatea cercetătorilor utilizează, pentru ordonarea materialelor, după rezistența la distrugere cavitațională, parametrii 1 și 2.

1.5 Modelarea și simularea în laborator a degradării prin cavitație a materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice

1.5.1 Instalații de laborator

Se folosesc în principal trei tipuri de instalații de laborator în studiul eroziunii cavitaționale a materialelor:

1. tunele hidrodinamice cu camera de lucru strangulată;
2. aparate cu disc rotitor imersat în lichid;
3. aparate vibratorii.

Avantajul folosirii unor asemenea stațiuni îl constituie posibilitatea corelării fenomenelor hidrodinamice cu erodarea materialului.

1.5.1.1 Tunele hidrodinamice

Tunelele hidrodinamice sunt astfel realizate și concepute încât permit generarea unor fenomene cavitaționale similare celor din mașinile hidraulice [3], în principal cavitație de vârtej. Pereții camerelor de lucru sunt transparenti și permit vizualizarea, fotografierea, filmarea și înregistrarea evoluției procesului de distrugere cavitațională.

Avantajul folosirii unei astfel de stațiuni o constituie faptul că se pot determina distribuția de presiuni, din camera de lucru, pentru diferite stadii cavitaționale și construi curbele coeficientului de cavitație $\sigma=f(Re)$.

Dezavantajul instalației îl constituie timpul îndelungat necesar erodării cavitaționale a probelor (10÷300) ore, costuri economice ridicate.

1.5.1.2 Aparate cu disc rotitor imersat în lichid

În aceste instalații se simulează cel mai bine fenomenul de cavitație. [4]. Elementul de bază al acestor aparate îl constituie discul rotitor imersat în lichid, a cărui turație poate fi modificată în funcție de intensitatea fenomenului cavitațional dorit. În acest disc sunt realizate orificii, cu diferite geometrii, dispuse după spirale logaritmice, care servesc la generarea cavitației [4][10]. În spatele orificiilor sunt montate probele de formă cilindrică a căror suprafață este distrusă prin eroziune cavitațională. În general se dispun palete statorice pentru a nu antrena lichidul.

Vizualizarea procesului se face prin vizoare de sticlă sau pereți transparenti. Astfel este posibilă vizualizarea, filmarea și fotografierea fenomenului cavitațional. Pentru limitarea vibrațiilor determinate de dezechilibrarea rotorului, în urma erodării cavitaționale a probelor, sunt prevăzute limitatoare care intră automat în funcție când se depășește pragul admisibil.

Crearea unui model matematic al fenomenului cavitațional, constituie dezavantajul acestor aparate și derivă din complexitatea câmpului de viteze și presiuni din camera de lucru, care fac imposibilă crearea unui model matematic, la fel tot un dezavantaj îl constituie timpul de încercare foarte mare (20÷60 ore),mărindu-se pentru materiale rezistente de tipul oțelurilor inoxidabile.

1.5.1.3 Aparate vibratorii

Aparatele vibratoare, sunt sisteme acustice, respectiv ultraacustice, deschise, cu aplicații tehnologice active,

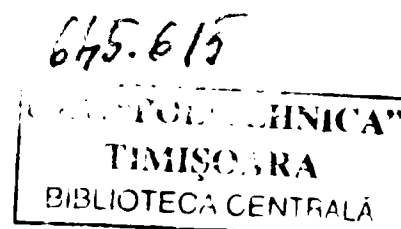
Ele folosesc energia sonoră, respectiv ultrasonoră, pentru producerea de modificări în structura mediului prin care se propagă [1, 2, 3, 4, 10, 11]

Aparatele vibratorii folosite în cercetarea eroziunii cavitaționale a materialelor sunt de două tipuri:

- magnetostrictive,
- piezoelectrice.

Aparate magnetostrictive folosesc traductoare feritice și tuburi de nichel

Pentru distrugerea materialului, prin cavitație, este necesară funcționarea în regim de rezonanță, cu unde longitudinale plane, la amplitudini de vibrație $A>8\mu\text{m}$



[1],]. La aceste amplitudini cea mai mare parte din energia acustică este absorbită de material, restul disipându-se sub formă de căldură în mediul înconjurător [1].

Proba supusă atacului cavitațional este plasată în maximul amplitudinii de vibrație [1], [40], [58], [110].

În teza elaborată de Conf. Dr. ing. Ilare Bordeășu este prezentat un aparat vibrator cu cristale piezoelectrice [11], și care prezintă anumite avantaje față de aparatul magnetostrictiv cu tub de nichel.

Principalele componente ale aparatelor vibratoare, și în general ale sistemelor cu ultrasunete, sunt [1, 31, 11]:

- Sursa de energie – constituită din generatoare electronice de frecvență;
- Transductoare ultrasonore – care transformă, cu un anumit randament energia electrică primită de la sursă în energie acustică;
- Concentratoare și amplificatoare de energie acustică – care concentrează energia acustică pe o arie mică pentru obținerea unei ultrasonice de intensitate ridicată;
- Elemente de transfer a energiei acustice și transformări de unde ;
- Elemente de adaptare și cuplaj acustic ;
- Sisteme de fixare mecanică și izolare acustică .

Blocul ultrasonic constituie elementul principal al sistemului ultrasonic compus din transductorul ultrasonic, concentrator - amplificator și elementele de cuplare, prin ale căror funcționări corelate se pot emite și intercepta vibrațiile a căror frecvență este situată în domeniul ultrasonic.

Elementul activ al aparatului (instalației) îl constituie transductorul electromecanic, care pe baza unui efect specific (electromagnetic, electrodinamic, magnetostrictiv, piezoelectric) convertește oscilațiile electrice aplicate de generatorul electronic în oscilații elastice. Aceste oscilații sunt transmise, concentrate și localizate, prin intermediul transformatorului acustic, în mediul de prelucrare.

Funcționarea instalației cu ultrasunete depinde de respectarea condițiilor tehnologice, impuse blocului ultrasonic și mai ales părții finale a acestuia (concentratorul – amplificator) și condițiilor acustice, impuse de crearea în întregul sistem oscilator a unui regim de vibrație care să asigure transmiterea energiei ultrasonore de la transductor la mediu (proba).

Condițiile tehnologice sunt legate de [1], [31]:

- precizia de calcul și confecționare,
- rezistența la uzură și oboseală,
- rigiditatea sistemului,
- stabilitatea în funcționare,
- calitatea îmbinării elementelor (strângere puternică și lipire perfectă),
- calitatea suprafețelor prelucrate (plane și lustruite) cu abateri strânse de formă și poziție.

Condițiile acustice ce trebuie îndeplinite, după [20], sunt:

- pierderi minime de energie în transductor și transformator,
- concentrare maximă a energiei ultrasonore,
- stabilitatea regimului de rezonanță a sistemului oscilator în timp,
- uniformitatea radiației energiei acustice pe toată aria de utilizare,
- adaptare optimă a blocului ultrasonic cu generatorul de oscilații electrice,
- fiabilitate sporită,

- posibilitatea controlului principalilor parametri de funcționare.

Creșterea duratei de funcționare neîntreruptă și pierderile minime de energie acustică se obțin când sistemul oscilator lucrează în regim de rezonanță și depinde în principal de:

- materialele din care sunt confecționate elementele blocului ultrasonic,
- calitatea și forma geometrică ale suprafețelor elementelor blocului ultrasonic,
- fiabilitatea componentelor electronice din generatorul electronic de ultrasunete.

Concentrarea energiei în focar (pe suprafața probei supusă atacului cavitațional) depinde de alegerea corespunzătoare a dimensiunilor de rezonanță și formei transformatorului acustic. Stabilitatea regimului de rezonanță, al sistemului oscilator, se asigură prin calculul corect și alegerea corespunzătoare a dimensiunilor de rezonanță a elementelor, buna izolare acustică, stabilitatea variației rezistenței sarcinii și funcționării generatorului electronic de ultrasunete [1, 10, 11, 31].

La aceste aparate distrugerea materialului depinde de nivelul parametrilor tehnic-funcționali: puterea electrică de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete, diametrul probei, frecvența și amplitudinea oscilațiilor, temperatura și natura lichidului de lucru. Eroziunea cavitațională are loc ca urmare a mișcării vibratorii pe verticală ce generează, periodic, un nor de bule cavitaționale prin a cărui surpare se nasc presiuni ridicate pe suprafața probei, producând rupe de material.[10, 11]

Condiția esențială, ca eroziunea să aibă loc, este ca norul să adere pe suprafața probei. Aceasta este determinată de tensiunea superficială la interfețele lichid – solid – vapori și interacțiunea mecanică dintre bule și asperitățile suprafeței probei.

La aparatele vibratorii cu tub de nichel nivelul amplitudinilor depinde de lungimea tubului, iar la cele cu transductor piezoceramic și feritic de forma concentratorului – amplificator .

Camerele de lucru sunt cu pereți transparenti și oferă aceleași facilități ca la tunelurile hidrodinamice și aparatele cu disc rotitor.

Deși procesul cavitațional este total diferit de cel din instalațiile industriale aparatele vibratorii sunt tot mai des folosite datorită următoarelor avantaje [1, 4, 10, 31]]

- durata de încercare foarte mică, maxim 2 – 4 ore,
- spațiul ocupat foarte redus,
- permit utilizarea oricărui tip de lichid,
- au cea mai mare intensitate de distrugere [4, 22].
- rezultatele obținute sunt acoperitoare pentru situațiile reale.

Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (I. Bordeășu [10, 11])

Descrierea și funcționarea aparatului

Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, prezentat în fig. [1.4] a fost proiectat și realizat de Conf. Dr. ing. Ilare Bordeășu pentru distrugerea materialelor solide prin cavitație.

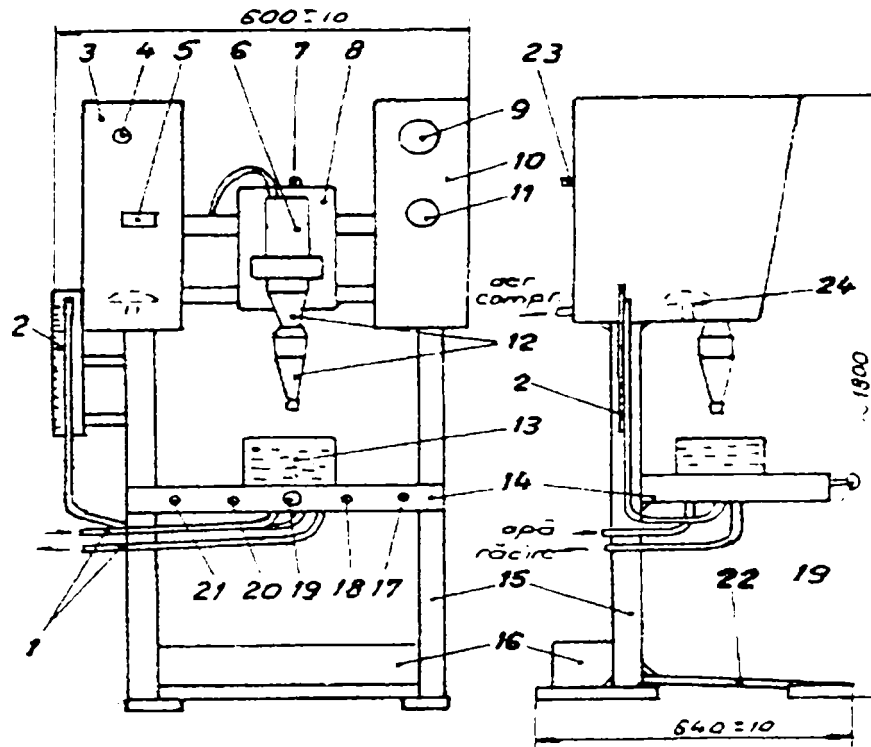


Fig. 1.4 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2

Părți componente:

- 1- conducte de răcire;
- 2- piezometru pentru controlul amplitudinii;
- 3- caseta pentru instalația electrică și electronică;
- 4- buton pentru cuplarea generatorului electronic de ultrasunete;
- 5- ampermetru;
- 6- transductor TGUS 500/20;
- 7- șurub pentru deplasarea blocului ultrasonic;
- 8- mecanism de ghidare;
- 9- manometru;
- 10-caseta pentru instalația pneumatică;
- 11-regulator de presiune;
- 12-transformator acustic;

- 13-vas pentru lichidul de încercare;
- 14-masa;
- 15-cadru suport;
- 16-transformator electric;
- 17-buton de cuplare aparat la rețea ;
- 18, 19, 20, 21- becuri semnalizări protecție;
- 22-talpă de echilibrare;
- 23- contactor electric;
- 24- ventilator.

Subansamblele componente:

- caseta generatorului electronic de ultrasunete;
- mecanismul de ghidare cu blocul ultrasonic;
- caseta subansamblului pneumatic de acționare a mecanismului de ghidare;
- transformatorul electric;
- pupitru de comandă;
- masa suport a vasului ce conține lichidul în care se fac testele de eroziune cavitațională.

Caracteristicile funcționale, tehnice și constructive ale aparatului sunt:

1. frecvența de rezonanță: $f=20\pm 0,2$ kHz;
2. amplitudinea vibrațiilor: $A=32\mu\text{m}$;
3. puterea electrică, de lucru, de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete și transductorului piezoceramic: $P_{el} = 274,4\text{W}$;
4. curentul electric de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete: $I=5,6\text{A}$;
5. puterea electrică absorbită de la rețea: $P_e = \text{max. } 800\text{VA}$;
6. tensiunea electrică de alimentare: $220_{-15\%}^{+10\%}$ Vca, la 50_{-2}^{+1} Hz;
7. diametrul probei: $D=14\text{mm}$;
8. dimensiunea filetului probei: M 12x1;
9. cursa maximă de poziționare în plan vertical a blocului ultrasonic: $C = 310 +5$ mm;
10. dimensiunile de gabarit (L1xI1xH1): 640x600x1800;
11. dimensiunile camerei de lucru (L2xI2xH2): 440x560x870;
12. dimensiunile vasului pentru lichid: $\varnothing 120 \times 90$;
13. volumul ocupat de lichidul de lucru: $V_{11} = 751,32$ ml;
14. cilindru pneumatic:
 - diametru piston: $D_p = 50$ mm
 - diametru tijă: $d_t = 25$ mm
 - cursă: 145 mm
15. presiunea aerului comprimat, maxima de lucru: $p = \text{max. } 6$ bar.

Principiul de funcționare al aparatului se bazează pe capacitatea cristalelor piezoceramice, din cadrul transductorului TGUS 500/20 (6), de a se deforma (contracta și dilata – generând unde staționare longitudinale plane) sub acțiunea câmpului electric alternativ produs de generatorul electronic de ultrasunete.

Deformațiile, respectiv undele longitudinale plane, sunt amplificate de transformatorul acustic (12), compus dintr-un concentrator și un amplificator acustic.

În punctul de amplificare maximă (capătul inferior al transformatorului acustic) este montată proba, ce urmează a fi solicitată cavitațional, imersată cu 3mm în lichidul de lucru. Datorită aderenței fluidului la suprafața probei, în timpul oscilațiilor, la urcare, pe această suprafață, apare norul de bule cavitațional. La coborâre acest nor se surpă generând unde de șoc, microjeturi și creșterea temperaturii pe suprafața probei. Prin acțiunea comună a celor trei factori are loc o distrugere rapidă a suprafeței frontale a probei, diferențiat de la un material la altul.

Verificarea nivelului amplitudinii se face cu ajutorul piezometrului vertical simplu (2), a cărui coloană se deplasează cu $\Delta h = 11 \div 12$ mm, corespunzător amplitudinii $A = 32 \mu\text{m}$. Această deplasare este determinată de undele sonice de presiune captate de pâlnia montată în vasul cu lichid (13), sub probă, racordată printr-un furtun la piezometru.

În timpul funcționării componentele din generatorul electronic de ultrasunete se pot încălzi datorită valorii ridicate a curentului. Acest fenomen poate schimba valorile optime de funcționare și protecție ale parametrilor tehnico – funcționali ($A = 32 \mu\text{m}$, $f = 20 \pm 0,2$ kHz, $I = 5,6$ A, $U = 49$ V). Eliminarea acestui fenomen se face prin răcire forțată cu aerul produs de un ventilator axial.

De asemenea, în timpul atacului cavitațional temperatura lichidului de lucru crește. Menținerea la temperatură constantă se face cu o serpentină de cupru racordată, printr-un robinet, la rețeaua de apă potabilă.

Parametrii reglabili și controlați sunt: curentul și tensiunea de alimentare a etajului final, al generatorului electronic de ultrasunete, amplitudinea și frecvența vibrațiilor, temperatura lichidului de lucru.

1.6 Obiective – Perspective

Cercetările efectuate de cercetători se pot grupa în două direcții:

- prima legată de cauza distrugerii materialelor cu aspect mai mult hidrodinamic în ceea ce privește apariția bulelor cavitaționale, crearea undelor de șoc și a microjeturilor,
- a doua legată de distrugerea materialelor, aici intrând și problemele legate de proprietățile fizico – mecanice, compoziția chimică și structura materialelor.

Cercetările efectuate în ambele direcții sunt numeroase, dar corelarea lor pentru a putea descrie cât mai bine procesul distructiv rămâne în continuare o problemă nerezolvată în totalitate, aceasta deoarece încă nu s-au putut da expresii analitice exacte care să facă corelația între parametrii ce caracterizează distrugerea cavitațională și parametrii ce țin de material.

- proprietățile fizico – mecanice,
- elemente chimice componente,
- structura și natura constituenților structurali,
- tehnologia de elaborare a semifabricatului,
- tratamentul termic aplicat etc;

Studiile și cercetările efectuate până acum au arătat că pentru obținerea

unor informații mai precise s-au impus efectuarea unor analize pe grupe de materiale (oțeluri carbon aliate și nealiate, oțeluri inoxidabile, aliaje neferoase etc) deoarece, așa cum rezultă și din literatura de specialitate, în fiecare grupă pot exista mărci cu comportări cavitaționale diferite funcție de parametrii de material menționați [10, 11].

Cercetările le-am îndreptat în următoarele direcții:

a) Cercetările teoretice și experimentale de laborator precum și cele făcute pe centralele hidroelectrice în exploatare m-au îndreptat în demersul meu spre folosirea în studiu la turnarea paletelor rotoarelor turbinelor a oțelurilor inoxidabile austenitice GXCrNi19-10 și mai ales a celor martensitice GX4CrNi13-4 (cu structură aciculară fină și uniformă) și care după un tratament termic special să capete o structură de martensită de revenire care prin finețea structurii și prin uniformitatea distribuției proprietăților fizico-mecanice în toată masa materialului să-i confere acestuia o bună rezistență la eroziune cavitațională.

b) Influența unor tratamente termice aplicate oțelurilor selectate asupra rezistenței la eroziune cavitațională. Aplicând acestor oțeluri diferite tratamente termice se va studia modificarea proprietăților fizico-mecanice precum și cele structurale ce apar, comparând performanțele în ceea ce privește eroziunea cavitațională la diverse tratamente termice aplicate pentru diferite mărci de oțeluri putând opta în final pentru tratamentul termic optim pentru o anumită marcă de oțel.

c) Cercetări privind recondiționarea prin sudare a componentelor mașinilor hidraulice degradate de cavitație.

d) Înlocuirea părții electronice a instalației actuale T1[Potencz] cu o versiune nouă, bazată pe dispozitive semiconductoare T3[Pădurean].

Acest lucru a devenit necesar deoarece vechiul sistem este depășit din punct de vedere tehnologic, fiind realizat pe baza de tuburi electronice, iar menținerea sa în stare bună de funcționare a devenit imposibilă din cauza lipsei pieselor de schimb.

În acest scop îmi propun în primă fază o abordare teoretică a noii instalații, precum și o realizare practică, la o scară redusă de putere, a unui generator ultrasonor pe baza de semiconductoare.

În acest fel va putea fi verificată fezabilitatea acestei noi concepții, se vor putea desprinde unele concluzii asupra performanțelor cât și asupra problemelor care pot apărea în cazul unei instalații la scară reală. Precizez că se păstrează pentru faza actuală, sistemul de bare rezonatoare din nichel pe frecvența de 7 KHz .

CAPITOLUL 2

CERCETĂRI ASUPRA OȚELURILOR INOXIDABILE TRATATE TERMIC UTILIZATE LA FABRICAREA ROTORILOR TURBINELOR HIDRAULICE

2.1 Considerații generale

Un efect negativ al cavitației îl reprezintă distrugerea materialelor solide. Realizarea unor mașini hidraulice care să funcționeze în afara cavitației este foarte scumpă. Exploatarea mașinilor hidraulice se va face în condiții de „cavitație industrială”, deci trebuie admis un anumit grad de distrugere prin eroziune cavitațională, din considerente economice, de preț de cost (materialele din care se fabrică rotoarele, cost centrală hidroelectrică ca investiție de construcție etc.)

Se admite că funcționarea mașinilor hidraulice are loc într-un stadiu cavitațional industrial în care caracteristicile energetice nu suferă scăderi însemnate, dar se înregistrează distrugerii ale pieselor ce funcționează în regim de cavitație, ceea ce necesită intervenții cu reparații la cavitație după câteva mii de ore de funcționare [2, 3,4].

Procesul distrugerii cavitaționale este foarte complex, implicând două aspecte diferite, dar care se condiționează reciproc:

- Unul este de natură fizico-mecanică specific solicitării și distrugerii materialelor prin oboseală, iar altul este de natură hidrodinamică specific fenomenului cavitațional. Faptul că cercetările și observațiile făcute pe mașinile hidraulice și elicele navale aflate în exploatare, arată că distrugerea prin eroziune cavitațională este rezultatul acțiunii mai multor factori, a căror influență, pondere și intercorelare nu au putut fi determinată încă în mod decisiv, arată că acest mecanism rămâne în continuare obiect de studiu pentru cercetătorii din diferite domenii.

Cavitația ca orice alt fenomen se face cunoscută prin efectele sale care sunt :

- Modificarea caracteristicilor hidrodinamice ale curentului
- Distrugerea materialelor solide Distrugerea materialelor solide prezintă aspecte nedorite din punct de vedere al funcționării mașinilor hidraulice la parametrii optimi. Cu toate că există foarte multe studii legate de rezistența materialelor la cavitație, nu s-au găsit încă materiale care să nu fie distruse prin eroziune cavitațională. Procesul distrugerii cavitaționale are loc pe spații și în timpi extrem de mici, dezvoltându-se zonal presiuni și temperaturi foarte mari cărora nu le rezistă nici un material.
- Zgomote și vibrații

Efectele cavitației nu pot fi înlăturate complet și de aceea se fac încercări multiple pentru atenuarea acestora și pentru protecția zonelor expuse acestui fenomen prin următoarele căi :

- proiectarea sau reproiectarea elementelor componente în scopul asigurării unei funcționări normale fără cavitație sau cu cavitație industrial admisibilă. Astfel, la foarte multe turbine, pompe, se fac reproiectări ale principalelor organe distruse.
- folosirea unor materiale de mare rezistență, la realizarea pieselor erodate cavitațional. Astfel paletelile rotoarelor turbinelor, rotoarele de pompe și camera turbinelor Kaplan și Bulb se execută din oțel înalt aliat pe bază de Cr și Ni, martensitic, austenitic sau austenito-feritic., *ale căror caracteristici vor fi îmbunătățite prin tratamente termice.*

Practica a dovedit că paletelile de turbină turnate din oțeluri inoxidabile au durata de viață cea mai mare, adică se comportă cel mai bine la eroziune cavitațională dacă prin tehnologia de elaborare se obține un semifabricat de o anumită compoziție chimică, proprietăți fizico-mecanice, finețe și omogenitate structurală, cu un anumit raport și structură a constituenților structurali, bine determinată.

Comportarea materialelor la cavitație nu poate fi descrisă folosindu-se dependente simple.

Aceasta datorită complexității solicitărilor cavitaționale și a complexității mecanismului prin care materialul răspunde acestei solicitări.

Voi enumera mai jos câțiva factori care duc la solicitarea cavitațională și care influențează comportarea materialului și implicit a rotoarelor de turbină și în timpul final a întregului ansamblu.

a) Ca prim factor precizez solicitarea mecanică intensă și rapidă prin microizbituri. Această solicitare este foarte variată, fiind funcție de o serie de factori fizici, care descriu apariția, dezvoltarea, transportul și în cele din urmă implozia bulei cavitaționale (bulă umplută cu vapori de apă, gaz, aer,) și hidrodinamica care descrie traseul acesteia și care o situează la un moment dat într-o anumită poziție față de corpul atacat. Trebuie precizat că fenomenul este cu atât mai greu de descris cu cât are loc pe suprafețe extrem de mici în timpi foarte mici, la presiuni și temperaturi foarte mari, dinamica fenomenului cavitațional plasându-se între rupura mecanică și explozie.

b) Ca factor secund, amintesc, în solicitarea cavitațională atacul chimic, atac impulsiv de apariția în zona de implozie a unor presiuni și temperaturi extreme, precum și de prezența în apă a oxigenului liber și a vaporilor de apă.

c) Un al treilea factor care-l potentează pe cel precedent, ar fi existența unor potențiale de natură electrică care accelerează atacul chimic.

d) În sfârșit amintesc șocul termic care prin apariția locală a unor temperaturi foarte mari provoacă topirea locală a materialului.

Evident modul de solicitare este deosebit de complex iar corespunzător acestui mod de solicitare, factorii care caracterizează materialul atacat sunt foarte numeroși: *-duratea, ductilitatea, proprietățile de autocălire în timpul solicitării, modificarea cu temperatura a diferitelor proprietăți mecanice, modulul de elasticitate, densitatea, limita la oboseală, energia de deformație la rupere, reziliența, conductibilitatea termică, punctul de topire, inerția chimică, aderența oxizilor la suprafață, structura cristalină, conductibilitatea electrică*

Din ce am prezentat mai sus rezultă că atât din punct de vedere al solicitării, dar mai cu seamă din punct de vedere al proprietății materialelor de care ar trebui ținut cont pentru diferite combinații în vederea unui studiu exhaustiv ar

rezulta o infinitate de variante, care din punct de vedere practic, ingineresc nu ne-ar ajuta.

Din această cauză distrugerea materialului nu comportă o explicație unică și simplă care să acopere toate aceste aspecte și de asemenea rezistența unui material la distrugere cavitațională nu poate fi dată printr-o singură caracteristică mecanică a materialului, nici chiar printr-o combinație simplă a mai multor caracteristici ale sale.

Studiile și cercetările de până acum au dat totuși indicații de ordin general asupra comportării la cavitație a diferitelor materiale:

-S-a ajuns la concluzia generală că toate materialele susceptibile de călire în timpul solicitării, au după atacul cavitațional o duritate mărită zonal.

-În unele cazuri se constată o deformare plastică a suprafeței care se termină prin ruptură, după ce s-a epuizat plasticitatea materialului.

-Procesul de călire prin solicitarea la microizbituri formează un strat suficient de dur pentru a rezista în continuare imploziilor, distrugerile următoare producându-se similar ca la oboseală. În literatură acestei solicitări i s-a mai dat denumirea de “**oboseală la cavitație**”.

2.2 Materiale folosite la fabricarea organelor active a mașinilor hidraulice

Pentru a avea o rezistență sporită la cavitație, materialele folosite la fabricarea elementelor mașinilor hidraulice trebuie să îndeplinească concomitent mai multe caracteristici: structurale, chimice, fizice, mecanice.

Din studiile efectuate publicate în literatura de specialitate rezultă că un material rezistent la cavitație se caracterizează conform celor indicate în **Fig. 2.1**. Trebuie găsit un compromis între duritatea mare și tenacitatea materialului situație care se poate rezolva prin modificări structurale realizate prin diverse variante de tratament termic.

În același timp variantele tehnologice de tratament termic vor trebui să asigure și o mărire a rezistenței la coroziune, oxidare, eroziune și la oboseală.

Pentru fiecare material folosit la fabricarea elementelor mașinilor hidraulice va trebui găsit tratamentul termic cel mai adecvat ca să se obțină o bună rezistență la atacul cavitațional.

Acesta constituie și unul din **OBIECTIVELE** tezei de doctorat: de a analiza influența diverselor variante tehnologice de tratament termic aplicat unor materiale care au rezistență mare la eroziune cavitațională.

Se observă clar tendința de a folosi la fabricarea elementelor active a mașinilor hidraulice oțeluri inoxidabile cu structură martensitică sau austenito-martensitică.

Prin studierea influenței tratamentelor termice asupra rezistenței la cavitație a cât mai multor materiale ar fi deosebit de utilă pentru a putea prevedea dinainte și tratamentele termice corespunzătoare pentru a obține caracteristicile mecanice cele mai bune, care să-i confere o rezistență la cavitație cât mai bună.

Practica și experimentele de laborator au arătat că alegerea materialului din care se fabrică rotoarele turbinelor hidraulice, din punct de vedere economic, tehnologic și constructiv trebuie să dovedească bună rezistență mecanică,

rezistență la uzură și oboseală precum și o rezistență bună la coroziune intercrystalină.

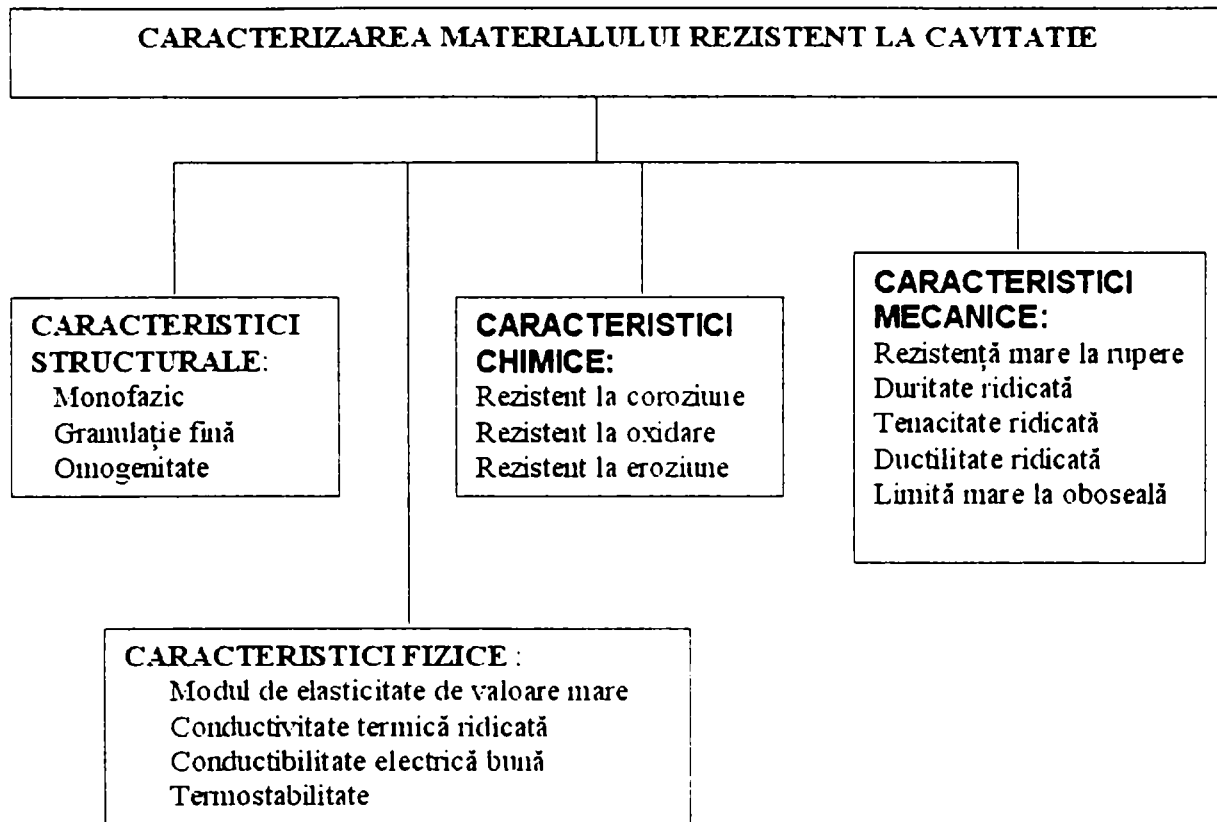


Fig.2.1 Caracteristicile materialului supus la cavitație

În fabricarea elementelor mașinilor hidraulice sunt folosite cu precădere materialele indicate în **tab. 2.1**.

Tabelul 2.1. Materiale utilizate la fabricarea mașinilor hidraulice

Nr. crt.	Marcă oțel	Elemente hidraulice fabricate	Structură
1	41MoCr11	Componente hidraulice de acționare (pistonașe, supape, sertare, etc.)	B+M
2	40Cr10	Componente hidraulice de acționare (pistonașe, supape, sertare, etc.)	B+M
3	T07CuMoMnNiCr165-Nb	Rotoare și palete de turbină hidraulică	40%M+40%A +20%F
4	T09CuMoMnNiCr185-Ti	Rotoare și palete de turbină hidraulică	60%A+10%M + 30%F
5	G-X5CrNi13.4	Rotoare și palete de turbină hidraulică	M
6	G-X5CrNiMo13.6.1	Rotoare și palete de turbină hidraulică	M

A –austenită, M-martensită, F-ferită, B- bainită

Din familiile de oțeluri inoxidabile martensitice și austenitice care pot fi utilizate în fabricarea mașinilor hidraulice și care prezintă o rezistență ridicată la cavitație sunt mărcile indicate în **tab. 2.2**, SR EN 10283/99

Tab.2.2 Compoziție chimică (analiza pe oțel lichid) (procente de masă)

Nr. crt.	Simbolizare		C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Cr	Mo	Ni	N	Cu	Nb	Stare Structură
	Alfanumerică	Numerică												
1	GX12Cr12	1.4011	0,15	1,00	1,00	0,035	0,025	11,5.. 13,5	max. 0,50	max. 1,00	-	-	-	MARTENSITICE
2	GX7CrNiMo12-1	1.4008	0,10	1,00	1,00	0,035	0,025	12,00.. 13,50	0,20.. 0,50	1,00.. 2,00	-	-	-	MARTENSITICE
3	GX4CrNi13-4	1.4317	0,06	1,00	1,00	0,035	0,025	12,00.. 13,50	max. 0,70	3,5.. 5,00	-	-	-	MARTENSITICE
4	GX4CrNiMo16-5-1	1.4405	0,06	0,80	1,00	0,035	0,025	15,00.. 17,00	0,70.. 1,50	4,0.. 6,0	-	-	-	MARTENSITICE
5	GX4CrNiMo16-5-2	1.4411	0,06	0,80	1,00	0,035	0,025	15,00.. 17,00	1,50.. 2,00	4,0.. 6,0	-	-	-	MARTENSITICE
6	GX5CrNiCu16-4	1.4525	0,07	0,80	1,00	0,035	0,025	15,00.. 17,00	max. 0,80	3,5.. 5,5	max. 0,05	2,5 4,0	max. 0,35	MARTENSITICE
7	GX5CrNi19-10	1.4308	0,07	1,50	1,50	0,04	0,03	18,00.. 20,00	-	8,00.. 11,00	-	-	-	AUSTENITICE
8	GX5CrNiNb19-11	1.4552	0,07	1,50	1,50	0,04	0,03	18,00.. 20,00	-	9,00.. 12,0	-	-	%C... 1,00	AUSTENITICE
9	GX5CrNiMo19-11-2	1.4408	0,07	1,50	1,500	0,04	0,03	18,00.. 20,00	2,00.. 2,50	9,00.. 12,00	-	-	-	AUSTENITICE
10	GX2CrNiMoNb19-11-2	1.4581	0,07	1,50	1,500	0,04	0,03	18,00.. 20,00	2,00.. 2,50	9,00.. 12,00	-	-	%C... 1,00	AUSTENITICE
11	GX5CrNiMo19-11-3	1.4412	0,07	1,50	1,500	0,04	0,03	18,00.. 20,00	3,00.. 3,50	10,0.. 13,0	-	-	-	AUSTENITICE
12	GX2CrNiMo28-20-2	1.4458	0,030	1,00	2,00	0,035	0,25	19,00.. 22,00	2,00.. 2,50	26,0.. 30,0	Max. 0,20	-	-	AUSTENITICE
13	GX4NiCrCuMo30-20-4	1.4527	0,06	1,50	1,50	0,04	0,03	19,00 ..22,00	2,00.. 3,00	27,50. 30,50	-	3,00.. 4,00	-	AUSTENITICE
14	GX2NiCrMoCu25-20-5	1.4584	0,025	1,00	2,00	0,035	0,020	19,00.. 21,00	4,00.. 5,00	24,00. 26,00	Max. 0,20	1,00.. 3,00	-	AUSTENITICE

Luând în considerare faptul că pentru aceste mărci de oțeluri (vezi **tab 2.2**) nu am găsit în literatura de specialitate cercetări asupra rezistenței lor la cavitație am stabilit ca **OBIECTIV** al tezei încercările la rezistență cavitațională a două mărci de oțeluri inoxidabile și anume: GX4CrNi13-4 și GX5CrNi19-10.

La aceste mărci de oțeluri am aplicat tratamente termice cu scopul de a le îmbunătăți rezistența cavitațională.

Conform SR EN 10283/99 tratamentele termice recomandate sunt indicate în **tab. 2.3** în care se dau indicații și asupra caracteristicilor mecanice la temperatura ambiantă.

Tabelul 2.3- Tratamente termice- Caracteristici mecanice

Marcă	Tratament termic		Caracteristici mecanice			
	Călire °C	Revenire °C	Rp _{0.2} MPa	Rm MPa	A5% min.	KV min-J
GX4CrNi13-4 1.4317	1000..	590..620	550	760	15	50
	1050	500..530	830	900	12	35
		660...680	500	700	16	50
GX5CrNi19-10 1.4308	CS 1050..1150	-	200	440	30	60

Notă 1 MPa = 1 N/mm²

În mod informativ SR EN 10283/99 recomandă proprietățile fizice indicate în **tab. 2.4**.

Tabelul 2.4-Proprietăți fizice

Marcă oțel	Masă volumică Kg/dm ³	Căldură specifică J/(kg.K) 20 °C	Conductivitate termică λ W/(m K)		Dilatare termică β 10 ⁻⁶ K ⁻¹ de la 20 °C la °C		
			50 °C	100 °C	100	300	500
GX4CrNi13-4 1.4317	7.7	460	26.	27	10.5	11	12
GX5CrNi19-10 1.4308	7.88	530	15.2	16,6	16.8	17.9	18.6

Dat fiind faptul că după exploatarea de durată a turbinelor hidraulice se intervine prin recondiționarea prin sudare a paletelor rotorice în zonele distruse prin cavitație SR EN 10283/99 face recomandări privind condițiile de sudare a mărcilor de oțeluri studiate indicate informativ în **tab. 2.5**.

Tabelul 2.5- Condiții de sudare

Marcă oțel	Temperatura de preîncălzire(**) °C	Temperatura maximă dintre tregeri °C	Tratament termic după sudare	
			Suduri minore	Suduri majore
GX4CrNi13-4 1.4317	20-200	- (*)	+T	+T
GX5CrNi19-10 1.4308	Fără preîncălzire	- (*)	+AT	+AT

NOTĂ:

(*) - Se vor stabili valorile în funcție de complexitatea organului de mașină supus sudării și cu acordul elaboratorului oțelului dat.

(**) - Valoarea temperaturii se alege în funcție de grosimea piesei turnate și de condițiile climatice ale momentului sudării.

+T - Se aplică revenirea în condițiile făcute la metalul de bază.

+AT - Călirea de punere în soluție (C.S.) cu răcire în apă cu parametri tehnologici folosiți la metalul de bază.

La piesele foarte mici și foarte subțiri se admite răcirea în aer.

2.3 Obiective urmărite în teza de doctorat

- Se urmărește în special prin încercări de laborator pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel, care se găsește în laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara, stabilirea rezistenței la cavitație prin determinarea vitezei de eroziune cavitațională și a masei de material erodat prin atac cavitațional asupra unor probe prelevate din oțelurile inoxidabile stabilite.

Analiza rezultatelor obținute prin încercările de laborator se va face pe baza curbelor caracteristice de cavitație, considerate de cei mai mulți cercetători ca fiind cele mai relevante pentru aprecierea degradării prin eroziune cavitaționale, respectiv, a rezistenței la cavitație, și anume:

$\Delta m_a(t)$ – variația masei de material erodat cu timpul de atac cavitațional;

$v(t)$ – variația vitezei de eroziune cavitațională cu timpul de atac cavitațional.

- Influența unor tratamente termice aplicate oțelurilor inoxidabile martensitice și austenitice: GX4CrNi13-4 și GX5CrNi19-10 asupra rezistenței lor la cavitație.
- Cercetări asupra recondiționării prin sudare a celor două mărci de oțeluri studiate, privind rezistența cavitațională a zonei influențate termic – ZIT.
- Conceperea, proiectul tehnic și modelul experimental al unei instalații de laborator pentru încercarea la cavitație utilizând în construcția generatorului de ultrasunete componente electronice moderne.

2.4 Tratamente termice aplicate oțelurilor inoxidabile selectate

2.4.1 Tratamente termice aplicate oțelului austenitic GX5CrNi19-10 (1.4308)

2.4.1.1 Călirea de punere în soluție

În cazul oțelurilor austenitice aliate cu Cr-Ni (19-10) călirea de punere în soluție are ca scop refacerea structurii, și i se mai spune călire structurală.

Este tratamentul termic cu aplicație largă și are ca scop principal mărirea rezistenței la coroziune a oțelurilor inoxidabile austenitice. Dacă în timpul prelucrării termice oțelul inoxidabil austenitic Cr-Ni, în speță în cazul de față: GX5CrNi19-10, are în structură o cantitate mare de carburi precipitate la limita grăunților, atunci călirea de punere în soluție, reduce cantitatea și mărește gradul de dispersie al acestora și mărește rezistența la coroziune intercrystalină, îmbunătățind și proprietățile mecanice. [115, 116]

Temperaturile de încălzire sunt cuprinse între 900 și 1 200 °C, frecvent fiind utilizate valorile de 1 000... 1 100 °C, care asigură și cele mai bune proprietăți mecanice acestor oțeluri [115, 116]

Durata de menținere la temperatura de încălzire depinde de natura oțelului și de dimensiunea pieselor. Orientativ, se recomandă durate de menținere 3 ... 5 min/mm din grosimea piesei [115, 116]

Răcirea pieselor se face cu viteză mare — folosind ca mediu apă —, fapt care evită precipitarea carburilor și permite obținerea austenitei cu grad mare de omogenizare.

Regimul tehnologic de punere în soluție:

Care precizează pentru tratamentul termic de călire de punere în soluție temperatura de încălzire- T_{inc} , timpul de menținere t_{men} , la această temperatură și mediul de răcire

- $T_{inc} = 1050$ °C
- $t_{men} = 30$ min
- răcire în apă

Durata de menținere a fost astfel calculată ca să avem o bună uniformizare și omogenizare structurală, iar răcirea în apă cu viteză mare nu permite precipitarea carburilor. Călirea de punere în soluție se face asupra unui semifabricat tip bară $\phi 15$ mm.

În modul acesta se obține la temperatura ambiantă austenita metastabilă cu grad mare de aliere.

Încercările pe oțelul austenitic G-X5CrNi19-10 s-au făcut pe probe prelevate cu $\Phi 15\text{mm}$ pe care s-au făcut următoarele determinări: compoziție chimică, încercări mecanice la temperatura ambiantă, analize structurale.

Rezultatele încercărilor sunt trecute în **tab. 2.6**.

Tabelul 2.6 Rezultatele încercărilor

Marcă oțel	Stare	Compoziție chimică [%]								Caracteristici mecanice la temperatură ambiantă 20 °C				
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A5% min	KV J	B
GX5CrNi 19-10 1.4308	CS	0.048	0.43	1.5	0.028	0.026	18.19	8.1		250	500	36	70	230
	1050 30min în apă	0.049	0.42	1.49	0.029	0.030	18.20	8.5	0.3			34		

Se observă clar pe baza analizei spectrale pentru determinarea compoziției chimice și a încercărilor la tracțiune făcută pe instalația de tracțiune de 100KN și prin încercări de încovoiere prin șoc că oțelul analizat corespunde cu marca GX5CrNi19-10 (SR EN 10283/99).

S-au efectuat analize structurale pe probe pregătite și atacate metalografic din oțelul analizat mai sus.

Se precizează că pregătirea metalografică s-a făcut conform: "**Normelor metalografice generale**" - **STAS 4203-74** privind "*Luarea și pregătirea probelor metalografice*" și **SR 5000-97**, privind "*Structuri și constituenți metalografici ale produselor feroase*".

"**Determinările metalografice**" s-au realizat conform **SR ISO 643-93** "*Privind determinarea micrografică a mărimii grăuntelui feritic, austenitic sau martensitic al oțelurilor*".

Reactivi conform CR 12361

Pentru oțeluri inoxidabile

Notare	Denumire	Compoziție	Pregătire suprafață	Precauții
B8	Soluție de acid clorhidric și acid azotic	39 ml apă 52 ml acid clorhidric 9ml acid azotic Valabilitate: nelimitată	Pastă de diamant 3 μm sau mai fină Temp. atac : temp. mediului Timp de atac: câteva secunde la câteva minute .	Precauții în utilizarea acizilor

S-a folosit pentru analiza metalografică un microscop optic dotat cu cameră foto. Imaginile structurale sunt prezentate în **Fig.2.2**



CS: 1050 °C /30 min/apă MO 500X

Fig.2.2 Oțel GX5CrNi19-10
Imagine structurală

Din analiza imaginilor structurale apare evident:

- structură austenitică în unii grăunți cu macle ,
- granulație G=6, conform normelor ASTM.

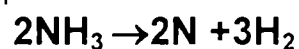
2.4.1.2 Niturarea oțelului inoxidabil GX5CrNi19-10

După confecționarea probelor ce urmează a fi încercate la cavitație s-au protejat părțile inactive din punct de vedere cavitațional (cum ar fi de ex. partea filetată a probei) rămânând a fi supusă nitrurării numai partea frontală, care va fi expusă atacului cavitațional.

Protejarea suprafețelor pieselor care nu se niturează s-a făcut cu anumite paste speciale de protecție folosite în mod curent, de exemplu pastă de protecție(vopsea) CONDRSAL Nr.523 Germania.

Niturarea este un proces de saturare cu azot a straturilor superficiale ale pieselor din oțel și fontă, în scopul măririi durității stratului superficial, crescând astfel rezistența la uzură, la oboseală și la coroziune.

Piese se încălzesc în cuptoare etanșe, ca mediu de nitrurare folosindu-se amoniacul, care prin disociere, pune în libertate azot activ :



Nitrurarea gazoasă s-a făcut în cuptorul special de nitrurare, din sectorul de tratamente termice, a SC UCMR Reșița SA.

Nitrurarea s-a aplicat pieselor cărora anterior li s-a aplicat tratamentul termic de punere în soluție conform cu ceea ce s-a tratat în subcap.2.4.1.1.

Pregătirea pieselor pentru nitrurare

Piesele pregătite pentru nitrurare se șterg cu cârpa de murdărie, se spală (degresează) cu benzină ușoară, witte-spirit, diluant, acetonă pericloretilenă sau tricloretilenă, în așa fel, ca să nu rămână pe piesă nici o urmă de ulei sau grăsime, apoi se șterg până la uscarea completă cu cârpe curate. Nu se admite după spălare uscarea la aer a pieselor, deoarece în acest fel poate rămâne o peliculă fină de ulei care poate provoca defecte de azotare (nedifuzionare locală a azotului în metal).

După spălare și uscare, piesele se așează pe tăvi curate fără a fi atinse cu mâna (se va lucra cu mănuși de cauciuc) și se leagă cu sârmă pentru a fi suspendate sau așezate în cuptor.

În timpul manipulării se interzice, atingerea pieselor cu mâinile goale, pentru a nu le contamina.

Încărcarea cuptorului

- Piesele se așează în cuptor în poziție verticală suspendate cu ajutorul unor sârme.

- Suprafețele pieselor care trebuie să fie nitrurate, nu trebuie să vină în atingere nici cu dispozitivele, nici cu alte piese.

- Piesele trebuie să fie așezate în cuptor distanțate, astfel încât să permită circulația liberă a gazelor printre ele.

- Alături de piesele din cuptor se introduc și probele martor în număr de 3 buc, (1 probă în partea de sus a cuptorului, 1 probă în partea de jos a cuptorului și 1 probă la mijlocul cuptorului),

Parametrii tehnologici ai tratamentului termic de nitrurare

După încărcare, cuptorul se închide, se fac toate legăturile pentru admisia și evacuarea amoniacului și se verifică funcționarea aparatelor de control.

Se conectează încălzirea și se încălzește cu max.50° C/h până la temp.170° C (fără amoniac) , după care se introduce amoniacul (debit = 400-600 l/h) apoi se încălzește cu max. 50° C/h și cu același debit de amoniac, până la treapta I de nitrurare (500° C).

Nitrurarea gazoasă s-a făcut în două trepte

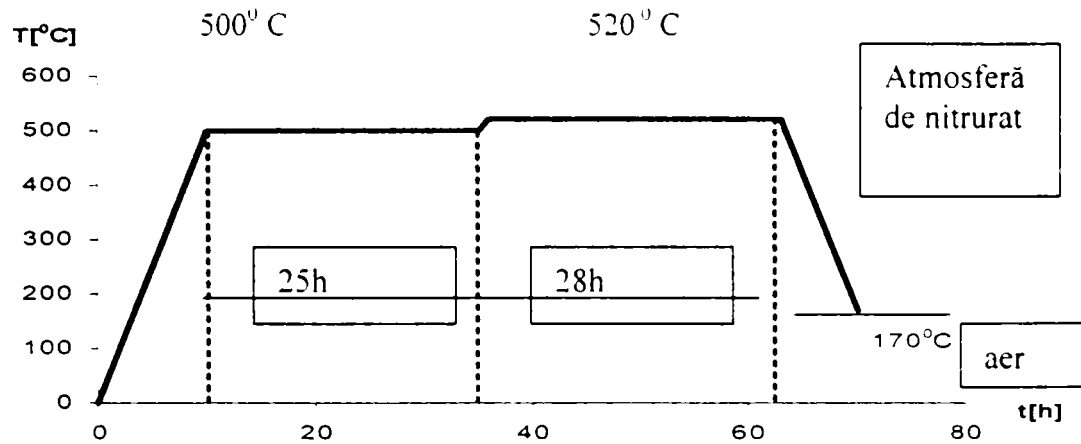
- *treapta I-500° C*
- *treapta II-520° C,*

după următorul regim (Fig2.3) :

- *încălzire cu 50° C/h până la 500° C*
- *menținere 25h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h) urcare cu 10° C la 520° C*

- menținere 28 h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h)
- răcire în cuptor închis cu 50°C/h în curent de amoniac (debit de amoniac 1400-1600 l/h), până la 170°C după care se oprește amoniacul, se deschide cuptorul și se continuă răcirea pieselor în aer.

Gazele care ies din cuptor se evacuează printr-un circuit de apă.



Treapta I 500°C $\alpha_{\text{NH}_3}=25-30\%$; menținere 25 h
 Treapta I 520°C $\alpha_{\text{NH}_3}=25-30\%$; menținere 28 h

Fig.2.3.Ciclograma niturării

2.4.1.3 Sablarea și niturarea oțelului GX5CrNi19-10

Probele care urmează a fi sablate și nitrurate sunt în prealabil supuse tratamentului termic de călire de punere în soluție conform cu ceea ce s-a tratat în subcapitolul 2.4.1.1.

Urmează apoi tratamentul de durificare superficială prin sablare pe instalația SAB-012 (fig. 2.4), din atelierul de tratamente termice din SC.UCM Reșița SA., piesele fiind așezate pe masa de sablare în poziție verticală, protejându-se toate suprafețele, mai puțin suprafața frontală a probei care va fi supusă sablării cu nisip la un unghi de atac de 45°

Tratamentul termic de nitrurare care urmează se va face conform subcapitolului 2.4.1.2.

Prin furtunul de sablare abrazivul este ghidat către duză. O dată cu eliberarea manetei de comandă procesul de sablare va fi oprit, iar rezervorul se depresurizează.

Instalare și punere în funcțiune

Se verifică legarea furtunului de sablare și a duzei la instalație, se deschide ventilul de aer al instalației, se deschide ventilul de dozare al instalației, se deschide admisia de aer de la compresor, se închide ventilul de comandă de la distanță, se ține maneta apăsată câteva minute până când conul va închide instalația și aceasta se va afla sub presiune, iar aerul va ieși prin duza de sablare, se ajustează șurubul de la separatorul de condens astfel încât să fie evacuat un jet continuu sub presiune, se depresurizează instalația prin eliberarea manetei de comandă sau prin deschiderea ventilului comenzii de la distanță.

Exploatare

- 1- se încarcă materialul abraziv în instalație:
 - se închide ventilul de dozare al materialului
 - se deschide ventilul de aer
 - se toarnă abrazivul prin sită în instalație
- 2 sablarea :
 - se închide ventilul comenzii de la distanță
 - se îndreaptă duza de sablare spre piesă și se apasă maneta de comandă
 - se ajustează aerul prin ventilul de aer (7)
 - se deschide ventilul de dozare abraziv până la un amestec opțional aer+ abraziv
 - se sablează până aproape de golirea instalației

Regimul de sablare: presiunea de lucru $p = 4-6 \text{ bar}$; unghiul de atac al suprafeței: $\beta = 45^\circ$; timpul de atac $t_s = 75 \text{ sec.}$; granulația nisipului $G = 50\mu\text{m}$.

2.4.1.4 Simularea sudării zonelor degradate prin cavitație a oțelului inoxidabil GX5CrNi 19-10

Necesitatea aplicării sudării elementelor hidraulice erodate cavitațional

Distrugerea prin cavitație a materialelor reparate prin sudare are loc la granița dintre materialul de bază și materialul depus prin sudare, deci de deosebită importanță este a se cerceta comportarea la cavitație în zona influențată termic-ZIT, de depunerea prin sudare a metalului de adaos în zonele distruse cavitațional.

Realizarea unor mașini hidraulice care să funcționeze în afara cavitației este foarte scumpă.

Funcționarea mașinilor hidraulice are loc în anumite regimuri, în care cavitația se manifestă, cu consecințele negative pe care le induce, dar în care căderea curbelor caracteristice energetice, în special randamentul și puterea hidroagregatelor nu este semnificativă.

Aceasta duce în cele din urmă la degradarea, în special a părților active ale mașinilor hidraulice cum ar fi rotoarele turbinelor hidraulice, ca o consecință a efectelor negative ale fenomenului de cavitație apărând ca o necesitate reparațiile curente RC2 sau după, (10-20) mii ore de funcționare a reparației capitale RK a pieselor degradate cavitațional, reparație care se realizează prin **procedee tehnologice de sudare**.

Tehnologia de reparare prin sudare a zonelor erodate cuprinde în general următoarele etape [79] :

- operații pregătitoare,
- îndepărtarea materialului distrus,
- pregătirea zonei erodate,
- depunerea stratului rezistent la cavitație,
- restabilirea geometriei piesei.

O atenție sporită trebuie acordată ventilației deoarece reparațiile cuprind operații de polizare și sudură, cu degajare de gaze nocive : oxizi de mangan, azot și carbon.

Atmosfera umedă în care are loc reparația impune folosirea unor aeroterme speciale plasate sub rotor. Aerul poluat este aspirat în atmosferă.

Pregătirea suprafeței pentru reparații constă în curățirea plăgii până se ajunge la metal curat. Îndepărtarea materialului uzat se face prin *polizare*. Cavernele mai adânci se curăță folosind *dispozitive pneumatice*. Uneori se aplică *tăierea* cu arc electric cu electrozi din cărbune [79]. După tăiere suprafața se polizează până la metalul curat.

La zonele erodate de adâncimi mici (0,5-1) mm recondiționarea nu se mai face prin sudură ci numai prin *șlefuire*, aceasta putând totuși implica creșterea intensității cavitației prin modificarea geometriei profilului hidrodinamic și deci a geometriei paletelor în zona respectivă. [79].

Trebuie precizat că în toate cazurile curățirea prin polizare în metalul de bază trebuie să înlăture nu numai asperitățile rezultate prin erodare cavitațională ci și eventualele fisuri care ar putea exista în metalul de bază în zona respectivă.

Zonele curățite trebuie să prezinte treceri și racordări line

Reparațiile prin sudură a rotoarelor turbinelor hidraulice

Reparațiile prin sudură se efectuează cu curent continuu de polaritate inversă.

Controlul operației de sudare constă în verificarea electrozilor utilizați, regimul de sudare și succesiunea depunerii cordoanelor. Pentru depuneri importante, sudarea poate conduce la deformații. Pentru a evita asemenea procedee, dificil de executat pe paletă, se recomandă scurtarea termenelor de reparație – uneori din acest motiv se execută reparații de cavitație la RC1. S-au mai adoptat și procedee cum ar fi: tăierea paletelor și sudarea unui adaos, confecționat special, sau pentru reducerea volumului de sudură s-a practicat captușirea plăgii cu plăci din oțel inoxidabil austenito-feritic [79]. Plăcile, cu dimensiuni de 30×500mm erau prinse de materialul de bază prin sudură. Datorită presiunilor pulsatorii care apar la cavitație legătura între placă și sudură se fisurează, iar sub căptușeală pătrunde apă, chiar placa se poate fisura.[79].

Nerespectarea regimurilor de sudare (curenți cu amperaj prea mare) sau neuscarea electrozilor înainte de utilizare duce la calități slabe ale materialului depus și în acesta pot să apară fisuri microscopice sau aglomerări de carburi. Aceste zone reprezintă puncte de amorsă a eroziunii cavitațională [79].

Rezultă clar că de o deosebită importanță în exploatarea turbinelor este modul cum se comportă între două reparații paletelor încărcate cu sudură în zona influențată termic-ZIT în procesul de sudare.

Se va proceda conform WPS nr. I.P.-01 la operația de depunere prin sudare, după care se va debita și confecționa proba ce urmează a fi încercată la cavitație, **chiar din zona influențată termic-ZIT.**

Pe o bară semifabricat $\Phi 25\text{mm}$ se va face încărcarea cu sudură conform WPS Nr.I.P. 01, se va strunji până la $\Phi 16\text{mm}$. Zona influențată termic se va evidenția cu reactivul NITAL-CR 12361


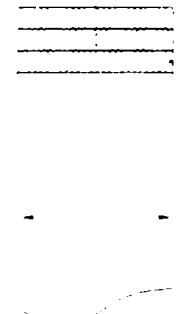
Se va debita în zona de graniță, metal de bază-material depus și se va confecționa proba care urmează a fi încercată la cavitație.

Reactiv Conform -CR 12361/1999

Reactivi pentru oțeluri inoxidabile

Notare	Denumire	Compoziție	Pregătire suprafață	Precauții
A1	NITAL	95-99 ml alcool 1-5 ml acid azotic Valabilitate: nelimitată	Granulație 600 Pastă de diamant $3\mu\text{m}$ macro-5% Micro-2% Temp. atac : temp mediului Timp de atac: câteva secunde control vizual	Precauții în utilizarea acizilor

SPECIFICAȚIA PROCEDURII DE ÎNCĂRCARE PRIN SUDARE
WPS Nr.I.P.-01

Procedeul de sudare		111-electric manual cu electrozi înveliți		Tipul îmbinării			
Poziția de sudare		PA orizontal		Depuneri multistrat prin sudare pe suprafața frontală (s=5 cm ²)			
MATERIAL DE BAZĂ		MB		METAL DE PUS-electrod			
Denumire	Oțel rotund Φ 25 mm GX5CrNi19-10		Marca	Selectarc 18.8 Mn			
Norma	W.1.4308		Norma	EN 1600: E 18.8 Mn R73			
Grupa	09		Dimensiuni [mm]	Φ 3,2			
Grosime	Diametru [mm]	25		Uscare	T [°C] /t[h] 250/2		
Temp.de preîncălzire °C	80-120						
Temp. între straturi °C	\leq 150						
SCHEMA DE PREGĂTIRE A ÎMBINĂRII				SUCCESIUNEA OPERAȚIILOR DE SUDARE			
							
Rând	Procedeu de sudare	Dimensiunea metalului de adaos [mm]	Intensitatea curentului [A]	Tensiune [V]	Tip curent/ polaritate	Viteza de sudare [cm/min]	Energie termică introdusă [J/cm ²]
1,2, 3	111	Φ 3,2	90-100	23-25	CC ⁺	10-12	10350-15000

Tehnica de sudare: Pregătirea suprafeței de încărcat prin prelucrări mecanice
Curățirea între straturi prin polizare

METAL DE BAZĂ

GX5CrNi 19-10;
Oțel rotund $\Phi 25$ mm

Tabelul 2.7 Compoziția chimică %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mn	Ni	Cu
0,048- 0,049	0,42- 0,43	1,50- 1,49	0,028- 0,029	0,026- 0,030	18,19- 18,20	1,50- 1,49	8,10- 8,50	0,34- 0,35

Tabelul 2.8 Caracteristici mecanice

Rm [MPa]	R _{p0,2} [MPa]	A5 [%]	Z [%]	B
500	250	34-36	70-72	230-237

METAL DEPUȘ -Electrod

Electrozi - -Marca -: Selectarc 18.8 Mn.
-Norma -: EN 1600: E 18.8 Mn R73.

Compoziția chimică a metalului depus %

Tabelul 2.9

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,10	5,0	0,8	18,0	8,5

Caracteristici mecanice a metalului depus

Tabelul 2.10

Rm [Mpa]	R _{p0,2} [Mpa]	A5 [%]	HB	KV[J]
600-730	min 400	min 30	180	Min 70 la +20 ⁰ C

2.4.2. Tratamente termice aplicate oțelului martensitic GX4CrNi 13-4(1.4317)

2.4.2.1. Călire și revenirea oțelului martensitic

În funcție de parametrii călirii și revenirii aplicate oțelurilor inoxidabile martensitice se obțin diverse transformări structurale, care le vor afecta proprietățile mecanice.

Astfel parametrii tehnologici de călire în special temperatura de austenizare au o influență puternică asupra durtății oțelului. Se va alege la fel o valoare optimă pentru temperatura de revenire evitând intervalul în care oțelul martensitic are o mare sensibilitate la formarea carburilor și deci și fragilitatea oțelului. Din [15], pag.93 rezultă că $T_{rev} = 650^{\circ}C$ este cea mai favorabilă temperatură pentru toate proprietățile mecanice. Revenirea oțelurilor inoxidabile martensitice prezintă interes deosebit iar dacă ea se face în condiții optime va rezulta cea mai bună combinație posibilă între duritate, reziliență și structura cea mai favorabilă pentru rezistența la coroziune, martensita de revenire. [115, 116]

Temperatura de austenizare se alege în funcție de compoziția chimică a oțelului și are o importanță deosebită pentru obținerea unei căliri corespunzătoare [115, 116]

Viteza de răcire se alege luând în considerare compoziția chimică a oțelului și faptul că trebuie obținută o structură martensitică la temperatura ambiantă.

Conform [115, 116] și SR EN 10 283 / 99 tratamentele termice recomandate sunt indicate în tab. 2.11

Tabelul 2.11 Tratamente termice recomandate

Marcă	Tratament termic		Caracteristici mecanice			
	Călire $^{\circ}C$	Revenire $^{\circ}C$	$R_{p0.2}$ MPa	R_m MPa	A5% min	KV J
GX4CrNi13-4 1.4317	1000..	590..620	550	760	15	50
	1050	500..530	830	900	12	35
		660...680	500	700	16	50

În mod informativ SR EN 10283/99 recomandă proprietățile fizice indicate în tab. 2.12.

Tabelul 2.12. Proprietăți fizice

Marcă oțel	Masă volumică Kg/dm^3	Căldură specifică $J/(kg.K)$	Conductivitate termică λ $W/(mK)$			Dilatare termică $\beta 10^{-6} K^{-1}$ de la $20^{\circ}C$ la		
			$20^{\circ}C$	$50^{\circ}C$	$100^{\circ}C$	100	300	500
GX4CrNi13-4 1.4317	7,7	460	26.	27	10,5	11	12	

Dat fiind faptul că după exploatarea de durată a turbinelor hidraulice se intervine prin recondiționarea prin sudare a paletelor rotorice în zonele distruse

prin cavitație SR EN 10283/99 face recomandări privind condițiile de sudare a mărcilor de oțeluri studiate indicate informativ în **tab. 2.13**.

Tabelul 2.13 Condiții de sudare

Marcă oțel	Temperatura de preîncălzire(**) °C	Temperatura maximă dintre tregeri °C	Tratament termic după sudare	
			Suduri minore	Suduri majore
GX4CrNi13-4 1.4317	20-200	- (*)	+T	+T

NOTĂ:

(*) - Se vor stabili valorile în funcție de complexitatea organului de mașină supus sudării și cu acordul elaboratorului oțelului dat.

(**) - Valoarea temperaturii se alege în funcție de grosimea piesei turnate și de condițiile climatice ale momentului sudării.

+T - Se aplică revenirea în condițiile făcute la metalul de bază.

La piesele foarte mici și foarte subțiri se admite răcirea în aer.

Regimul tehnologic al tratamentului termic de călire + revenire

Așa cum rezultă din normele SR EN 10283/99 **Tab.2.11**, vor rezulta următorii parametri tehnologici temperaturile de călire și de revenire $T_{c\grave{a}l}$, T_{rev} , timpul de menținere, t_{men} .

Călire $T_{c\grave{a}l} = 1050^{\circ}C$
 $t_{men} = 1$ oră
 mediu –apă

Revenire $T_{rev} = 650^{\circ}C$
 $t_{men} = 3$ ore
 mediu -aer

Dacă revenirea oțelurilor inoxidabile martensitice are loc în intervalul 430-570 °C sau pentru oțelurile cu conținut mic sau mediu în carbon în intervalul temperaturilor 370-540 °C, apare fragilitatea de revenire-scade tenacitatea și se înrăutățește mult rezistența la coroziune a oțelurilor [115, 116].

Revenirea în acest interval de temperaturi favorizează separarea carburilor de crom, fapt care explică scăderea rezistenței la coroziune.

Încercările pe oțelul martensitic GX4CrNi13-4 s-au făcut pe probe paralelipipedice 30x30x60 făcându-se următoarele determinări: compoziție chimică, încercări mecanice la temperatura ambiantă și analize structurale.

Rezultatele încercărilor sunt trecute în **Tab.2.14**.

Tabelul 2.14 Rezultatele încercărilor

Marcă oțel	Stare	Compoziție chimică [%]								Caracteristici mecanice la temperatura ambiantă 20 °C				
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	R _{p0,2} MPa	R _m MPa	A5%	KV J	HB
GX4CrNi 13-4 1.4317	C+R	0,02	0,47	0,56	0,010	0,06	13,1	4,4	0,5	623	80 0	20	50	27 0
		0,018	0,52	0,61		0,050	12,94	5 4,4	5 4					

Se observă clar pe baza analizei spectrale pentru determinarea compoziției chimice și a încercărilor la tracțiune făcută pe instalația de tracțiune 100KN și prin încercări de încovoiere prin șoc că oțelul analizat corespunde cu marca GX4CrNi13-4 (SR EN 10283/99).

S-au efectuat analize structurale pe probe pregătite și atacate metalografic din oțelul analizat mai sus.

Se precizează că pregătirea metalografică s-a făcut conform :” **Normelor metalografice generale**”. **STAS 4203-74** privind “Luarea și pregătirea probelor metalografice” și **SR 5000-97**, privind “Structuri și constituenți metalografici ale produselor feroase”.

“**Determinările metalografice**” conform **SR ISO 643-93** “Privind determinarea micrografică a mărimii grăuntelui feritic, austenitic sau martensitic al oțelurilor”.

Reactivi conform CR 12361

Pentru oțeluri inoxidabile

Notare	Denumire	Compoziție	Pregătire suprafață	Precauții
B8	Soluție de acid clorhidric și acid azotic	39 ml apă 52 ml acid clorhidric 9ml acid azotic Valabilitate: nelimitată	Pastă de diamant 3μm sau mai fină Temp. atac : temp mediului Timp de atac: câteva secunde la câteva minute .	Precauții în utilizarea acizilor

S-a folosit pentru analiza metalografică un microscop optic dotat cu cameră foto. Imaginile structurale sunt prezentate în **Fig.2.5**



MO 500X

Oțel GX4CrNi13-4

Fig.2.5 Imagine structurală

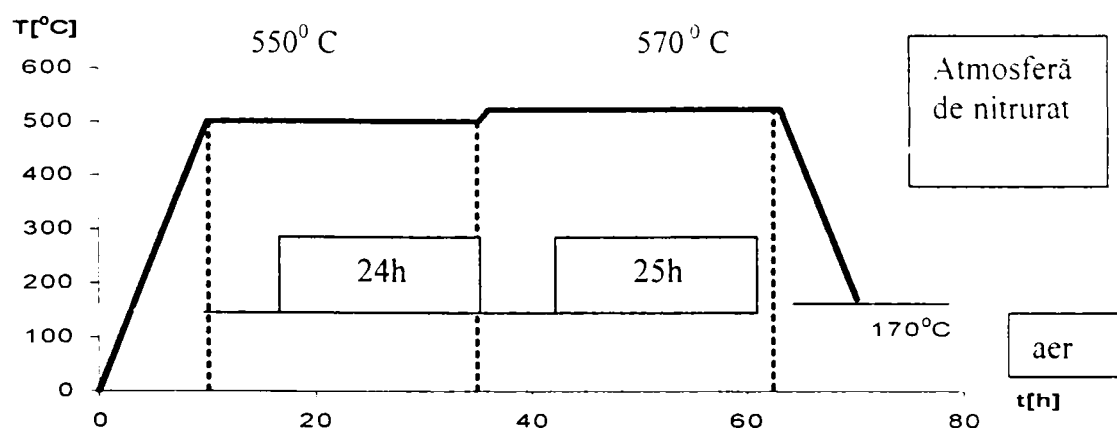
Analizând la microscopul optic imaginile structurale rezultă :

- indicele de granulație $G = 5$, conform normelor ASTM.
- ca structură : martensită cu carburi fine uniform distribuite .

2.4.2.2. Nitrurarea oțelurilor inoxidabile GX4CrNi13-4.

Nitrurarea oțelurilor inoxidabile GX4CrNi13-4, din punct de vedere al pregătirii probelor, al încărcării cuptorului și a celorlalte operațiuni auxiliare se face ca în cazul oțelului austenitic GX5CrNi19-10 descrisă în subcapitolul 2.4.1.2.

În cazul acestui oțel diferă parametrii tehnologici ai tratamentului termic de nitrurare și deci și ciclograma nitrurării. (fig.2.6.)



Treapta I 550°C $\alpha_{\text{NH}_3}=25-30\%$; menținere 24 h
 Treapta II 570°C $\alpha_{\text{NH}_3}=25-30\%$; menținere 25 h

Fig.2.6.Ciclograma nitrurării

2.4.2.3. Sablarea și nitrurarea oțelurilor GX4CrNi13-4

Tratamentul de durificare superficială prin sablare s-a făcut pe instalația (fig.2.4.) prezentată în subcapitolul 2.4.1.3.

Sablarea s-a făcut în atelierul de Tratamente Termice după tratamentul de călire și revenire descris în subcapitolul 2.4.2.1. iar nitrurarea efectuându-se conform procedurii și ciclogramei (vezi fig. 2.6).

2.4.2.4. Simularea sudării zonelor degradate prin cavitație a oțelurilor inoxidabile GX4CrNi13-4

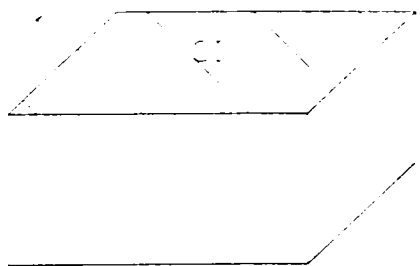
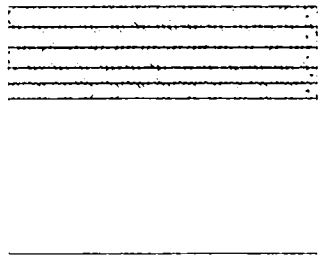
Necesitatea și oportunitatea aplicării sudării elementelor hidraulice erodate cavitațional, tehnologia de reparare prin sudare cu etapele parcurse de la operațiile pregătitoare până la restabilirea geometriei paletelor din punct de vedere hidrodinamic s-au prezentat în subcapitolul 2.4.1.4.

S-a arătat că prezintă importanță în exploatarea turbinelor, zona de graniță dintre metalul de bază al paletelor rotorice și metalul folosit la sudare. între două reparații.

Conform cu "Specificația procedurii de încărcare prin sudare" WPS nr. I.P.-02, se vor depune pe oțelul inoxidabil GX4CrNi13-4, de tip bară paralelipipedică 30×30×60 mm, două straturi de sudură: unul tampon și altul anticavitațional.

Se evidențiază zona influențată termic –ZIT, cu reactivul NITAL făcându-se debitarea chiar în această zonă, apoi confecționându-se proba ce urmează a fi încercată la cavitație.

SPECIFICAȚIA PROCEDURII DE ÎNCĂRCARE PRIN SUDARE
WPS Nr.I.P.-02

Procedeul de sudare		111-electric manual cu electrozi înveliți		Tipul îmbinării			
Poziția de sudare		PA orizontal		Depuneri multistrat prin sudare pe suprafața frontală (s=18cm ²)			
MATERIAL DE BAZĂ		MB		METAL DE PUS-ELECTROZI			
Denumire	GX4CrNi13-4		Marca	1) Selectarc 18.8 Mn pentru straturile tampon 1,2 2) UT 730 pentru straturile următoare (3-5) de încărcare anticavitațională			
Norma	W 1.4317		Norma	1) EN 1600: E 18.8 Mn R73 2) DIN 8555; E7-UM-250-KPR			
Grupa	09		Dimensiuni [mm]	1) Φ 3,2 pentru straturile tampon 2) Φ 4,0 pentru straturile de încărcare anticavitațională			
Placă	30x30x60 mm		Uscare T[°C] /t[h]	1) 250/2 2) 300/2			
Temp.de preîncălzire °C	80-120						
Temp. între straturi °C	≤150						
SCHEMA DE PREGĂTIRE A ÎMBINĂRII			SUCCESIUNEA OPERAȚIILOR DE SUDARE				
							
Rând	Procedeu de sudare	Dimensiunea metalului de adaos [mm]	Intensitatea curentului [A]	Tensiune [V]	Tip curent/ polaritate	Viteza de sudare [cm/min]	Energie termică introdusă [J/cm²]
1-2	111	Φ 3,2	90-100	23-25	CC ⁺	10-12	10350-15000
3-5	111	Φ 4	120-130	24-26	CC ⁺	12-15	11520- 16900

Tehnica de sudare:

Pregătirea suprafeței de încărcat prin prelucrări mecanice
Curățirea între straturi prin polizare

METAL DE BAZĂ
GX4CrNi 13- 4
 Placă 30×30×60 mm

Compoziția chimică %

Tabelul 2.15

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al
0,018- 0,01	0,47- 0,52	1,56- 1,61	0,01	0,005- 0,006	12,94- 13,1	0,54- 0,55	4,4- 4,45	0,33- 0,039

Caracteristici mecanice

Tabelul 2.16

Rm [Mpa]	R _{p0.2} [Mpa]	A5 [%]	Z [%]	HB	KV[J]
798-801	615-623	20-21	63-64	229-237	124 132 141

METAL DEPUȘ-Electrozi

A) Pentru stratul tampon

Electrozi: Marca : Selectarc 18.8 Mn
 Norma : EN 1600: E 18.8 Mn R73;

Compoziția chimică ale stratului tampon %

Tabelul 2.17.

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,10	5,0	0,8	18,0	8,5

Caracteristici mecanice ale stratului tampon %

Tabelul 2.18.

Rm [MPa]	R _{p0.2} [MPa]	A5 [%]	HB	KV[J]
600-730	min 400	min 30	180	Min 70 la +20 ⁰ C

B) Pentru încărcarea anticavitațională

Electrozi : Marca : UTP 730
 Norma : DIN 8555; E7-UM-250-KPR

Compoziția chimică a metalului depus. Pentru încărcarea anticavitațională %

Tabelul 2.19

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Co	Fe
0,20	9,0	2,0	16,0	0,5	0,5	13	restul

Duritatea stratului depus HB= 225-275

CONCLUZII PARȚIALE

Comportarea în exploatare a rotoarelor de turbină hidraulică este determinată de trei factori: calitatea materialului din care sunt turnate (prin proprietăți fizico-chimice, mecanice, compoziție chimică, structură), precizia de execuție a paletelor rotoarelor precum și de tratamentele termice aplicate.

Unul din OBIECTIVELE tezei de doctorat, este acela de a analiza influența diverselor variante de tratament termic aplicat unor materiale care au rezistență mare la eroziune cavitațională.

Fată de celelalte operații tehnologice (turnare, aşchiere, deformare plastică etc.), tratamentele termice urmăresc modificarea structurii materialului, care induce proprietăți fizico-mecanice sau tehnologice, fără a modifica forma și dimensiunile.

La baza tratamentelor termice stau transformările de structură în stare solidă ca urmare a modificării stării energetice a sistemului.

Am ținut cont de interdependența evidentă: **tratament termic-structură-proprietăți**.

Complexitatea solicitărilor la care sunt supuse materialele din care sunt fabricate rotoarele turbinelor hidraulice în timpul exploatării, impune ca acestea să aibă anumite structuri care să le confere cele mai bune proprietăți în vederea măririi rezistenței la eroziune cavitațională (vezi Fig. 2.1).

Exploatarea și studiile efectuate în C.H.E. în funcțiune, precum și încercările și studiile de laborator au arătat că rotoarele turbinelor hidraulice a căror palete sunt turnate din oțeluri inoxidabile prezintă cea mai mare fiabilitate în exploatare, comportându-se cel mai bine la atacul cavitațional, dacă prin tehnologia de elaborare, prelucrare și tratament termic se obține o paletă cu o anumită finețe și omogenitate structurală, cu un anumit raport și structură a constituenților structurali, compoziție chimică și proprietăți fizico-mecanice bine determinate.

Pentru oțelurile inoxidabile, tratamentele termice prezintă o importanță deosebită, în special pentru a le conferi o mai bună rezistență la coroziune și pentru a le îmbunătăți proprietățile mecanice și fizice [2, 15].

Parametrii tehnologici ai tratamentului termic au respectat recomandările [115, 116] pentru a asigura transformările structurale necesare, pentru a diminua tensiunile interne și pentru a reface granulația materialului.

Studiile făcute de diverși cercetători [2, 3, 10, 11, 61, 62], precum și recomandările [115, 116], m-au determinat ca în studiul pe care l-am efectuat să folosesc două mărci de oțeluri inoxidabile:

- oțelul inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10 și
- oțelul inoxidabil martensitic GX4CrNi13-4.

Tratamentele termice aplicate celor două mărci de oțeluri au fost:

-asupra oțelului inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10:

- tratamentul termic de călire de punere în soluție la o temperatură de încălzire $T_{inc.} = 1050^{\circ}C$, la un timp de menținere $t_{men} = 30$ min. și răcire în apă cu viteză mare pentru a evita precipitarea carburilor, realizându-se în același timp o bună uniformizare și omogenizare structurală.
- tratamentul termic de nitrurare în atmosferă gazoasă a cărei ciclogramă (Fig.2.3) am prezentat-o în subcapitolul 2.4.1.2, anterior făcându-se tratamentul termic de călire de punere în soluție.
- tratamentul de sablare și nitrurare prezentate în subcapitolul 2.4.1.3. anterior făcându-se tratamentul termic de călire de punere în soluție.
- încărcarea prin sudare anterior făcându-se tratamentul termic de călire de punere în soluție.

-asupra oțelului inoxidabil martensitic GX4CrNi13-4:

- tratamentul termic de călire la $T_{c\grave{a}l} = 1050^{\circ}C$, menținere $t = 1$ oră, răcire în apă, urmată de revenire la temperatura $T_{rev} = 650^{\circ}C$, menținere $t_{men} = 3$ ore, în aer.
- tratamentul termic de nitrurare în atmosferă gazoasă, conform ciclogramei din Fig. 2.6, subcapitolul 2.4.2.2, după ce oțelul a fost călit și revenit în prealabil.
- tratamentul de sablare și nitrurare prezentate în subcapitolul 2.4.2.3. , după ce oțelul a fost călit și revenit .
- încărcarea prin sudare anterior făcându-se tratamentul termic de călire și revenire

Asupra mărcilor de oțel cărora le-am aplicat tratamentele termice am efectuat analize metalografice structurale, cu un microscop optic dotat cu cameră foto pe probe pregătite [126] și atacate metalografic [126, 127, 128], rezultând din determinările micrografice o mărime corespunzătoare a grăunților austenitici și martensitici și o bună finețe și omogenitate structurală.

Prin reducerea cantității de carburi precipitate la limita dintre grăunți și prin mărirea gradului de dispersie al acestora crește și rezistența la coroziune intercristalină.

Acest lucru l-am observat și prin examinarea vizuală (direct la microscop sau prin fotografiere) a probelor erodate, rezultând că prin finețea structurii și omogenitatea granulației, oțelurile în discuție **rezistă bine atacului cavitațional, distrugerea făcându-se lent, uniform, progresiv, fără mari cratere; cu pierderi mici de masă erodată.**

Tratamentele termice aplicate celor două mărci de oțeluri le-am făcut pe probele ce urmează a fi încercate în laborator la cavitație.

Datorită faptului că efectele negative datorate cavitației, cum ar fi degradarea paletelor rotoarelor (modificarea geometriei profilelor hidrodinamice cu

consecințe asupra performanțelor energetice a turbinei, sau posibilitatea apariției unor fisuri pe paletă), nu pot fi înlăturate total, apare ca o necesitate repararea zonelor erodate prin proceduri speciale de sudare, apoi aducerea suprafeței profilate a paletelor la starea inițială cerută de proiectant.

Degradarea cavitațională are loc la granița dintre materialul de bază și materialul depus prin sudare.

Am studiat rezistența la cavitație în zona influențată termic-ZIT, de depunerea prin sudare a metalului de adaos în zonele distruse.

Pentru cele două mărci de oțel alese am efectuat depuneri prin sudare conform normelor standardizate WPS Nr. IP-01 ȘI WPS Nr. IP-02.

Am debitat semifabricatul în zona de graniță, metal de bază-material depus prin sudare.

Am confecționat probele pe care le-am încercat în laborator chiar din zona influențată termic-ZIT.

Adoptând procedeul de sudură prezentat, pentru repararea paletelor, în zona de influență termică-ZIT, **pericolul distrugerii cavitaționale este nesemnificativ, concluzie rezultată din analiza curbelor $v(t)$ și $m_a(t)$.**

CAPITOLUL 3

CERCETĂRI EXPERIMENTALE DE LABORATOR ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 TRATATE TERMIC

3.1 ÎNCERCĂRI DE LABORATOR PRIVIND DISTRUGEREA CAVITAȚIONALĂ

3.1.1 Metodica de lucru

Realizarea unor materiale foarte rezistente la eroziune cavitațională și ieftine a necesitat studiul lor în laborator și analiza sistematică a comportării lor la cavitație.

Utilizarea instalațiilor de laborator în încercările privind distrugerea cavitațională a materialelor prezintă o serie de avantaje [2, 3, 4, 10, 11] :

- Posibilitatea realizării unor regimuri de lucru de intensități diferite din punct de vedere cavitațional,
- Crearea unor regimuri cavitaționale care pot fi menținute și controlate în funcție de scopuri,
- Timpul de încercare este foarte mic față de distrugerea cavitațională reală în mașinile hidraulice,
- Posibilitatea variației parametrilor de lucru a încercărilor, cum ar fi temperatura presiunea lichidului de lucru, puterea instalați etc.
- Determinarea cantității de material erodat și studiul suprafețelor distruse este ușor de realizat, probele putând fi ușor de manevrat,
- Probele se pot monta în camere de lucru, care permit vizualizarea fenomenelor, filmarea și fotografierea.

Analiza comportării cavitaționale a materialelor se face pe baza curbelor caracteristice, considerate de majoritatea cercetătorilor ca fiind cele mai concludente pentru aprecierea degradării cavitaționale, precum și pe baza fotografiilor obținute la microscopul optic sau electronic.

3.1.2 Obiective urmărite prin studiul eroziunii cavitaționale în laborator

Obiectivele posibile de urmărit prin cercetările de eroziune cavitațională, realizate în laborator sunt următoarele [10, 11] :

1. determinarea unor materiale cu rezistența, la eroziune cavitațională, foarte mare, astfel încât să asigure, pieselor ce funcționează în fluid cavitant, o durată de exploatare cât mai mare,
2. stabilirea unui material etalon, cu bună rezistență la eroziune cavitațională, pentru fiecare stațiune, la care cercetătorii să se poată raporta când se compară rezistența la eroziune cavitațională a altor materiale încercate,
3. posibilitatea stabilirii influenței asupra degradării prin cavitație de către factori cum ar fi:
 - proprietățile fizico-mecanice,
 - elementele chimice componente,
 - tipul structurii și natura constituenților structurali,
 - **tratamentul aplicat**,
 - tehnologia de elaborare (turnare, laminare, forjare, matrițare, sudare), a materialului,
 - parametrii tehnico-funcționale ai stațiunii de încercare,
 - natura și temperatura lichidului de încercare,
4. stabilirea unor relații de legătură între rezultatele experimentale, obținute în stațiuni de laborator de același tip, respectiv între cele obținute în laborator și cele obținute pe instalațiile industriale,
5. stabilirea unor criterii de similitudine în eroziunea cavitațională,
6. stabilirea parametrului ce reflectă cel mai bine rezistența materialului la eroziune cavitațională.

3.2 INSTALAȚII DE LABORATOR UTILIZATE LA ÎNCERCAREA DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ

3.2.1 Regimuri de încercare. Aparatură.

În conformitate cu **normele ASTM** [123], încercarea s-a făcut pe trei probe, în apă distilată, la temperatura $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$.

Atacul cavitațional a fost realizat în aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel [T1] din cadrul laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara, caracterizat de următorii parametrii funcționali:

-generator de frecvență variabilă:

- frecvență de ieșire reglabilă: -4000-8000Hz
- tensiune de ieșire: -70V
- puterea de ieșire: -1KVA

-sursă de curent continuu:

- tensiune: $U=24\text{V}$.
- intensitate curent: $I=5\text{A}$
- amplitudinea vibrațiilor: $A = 47\mu\text{m}$;
- frecvența de oscilație: $f = 7000\text{Hz} \pm 3\%$
- presiunea la suprafața lichidului: $p = p_{at}$;
- puterea aparatului: $P = 500\text{W}$;
- lungimea tubului de nichel: $l=305\text{mm}$;
- diametrul probei: $d = 14\text{mm}$;
- imersia probei: $h = 3\text{mm}$.

3.2.2 Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 (I. Potencz [58])

3.2.2.1 Principiu de funcționare. Părți componente

Magnetostricțiunea este proprietatea unor materiale de a se contracta și dilata când sunt plasate într-un câmp magnetic de intensitate ridicată [1]. Dintre materialele cu magnetostricțiune ridicată se remarcă nichelul pur și anumite tipuri de ferite [1, 141]. Pe baza acestor proprietăți s-a construit, de către C.P.I. ing. I. Potencz aparatul magnetostrictiv cu tub nichel T1, fig. 3.1 din Laboratorul de Mașini Hidraulice al Universității Politehnica din Timișoara, destinat studiului distrugerii cavitaționale a materialelor.

3.2.2.2 Descrierea instalației

Schema de principiu a instalației experimentale este prezentată în figura 3.1 generatorul de frecvență cu o putere maximă la ieșire de 500 W a curentului alternativ produs, permite schimbarea frecvenței acestuia între 6.000-10.000 Hz prin modificarea frecvenței proprii a circuitului oscilant L-C și a tensiunii de ieșire, prin modificarea tensiunii anodice de alimentare a pentodei de putere, cu ajutorul unui autotransformator.

Vibratorul magnetostrictiv este constituit dintr-un tub de nichel (1) fixat cu suportul (4) în câmpul magnetic pulsator produs de bobinele parcurse de curentul alternativ (6), combinat cu cel produs în jugul magnetic (7) de bobinele parcurse de curentul continuu.

La capătul tubului de nichel este fixată proba supusă încercării la cavitație (3) imersată în lichidul de încercare din vasul (8). Spirala de răcire (11) din vasul de lucru servește la menținerea constantă a temperaturii lichidului de încercare.

Cu sistemul de măsură format din pâlnia (9) și tubul (10) se controlează **amplitudinea oscilațiilor probei**, denivelarea Δh produsă de undele de șoc fiind proporțională cu valoarea acesteia. Numărul de oscilații pe care le execută proba în perioada de încercare este înregistrat de un numărător cu 10 cifre, care servește la determinarea frecvenței de oscilație a probei. Un redresor cu tensiune reglabilă între 0-24 V și curent maxim de 5 A servește la alimentarea bobinelor (7)

Se știe că sub acțiunea unui câmp magnetic, nichelul se contractă, indiferent de sensul câmpului. În fig. 3.2 este data curba de magnetostricțiune a nichelului. În cazul când tubul de nichel ar fi plasat într-un câmp magnetic alternativ cu frecvența f , ar oscila deci cu frecvența $2f$, din aceasta cauza se suprapune peste câmpul magnetic alternativ unul continuu (B_0 fig. 3.3.) obținând un câmp rezultat pulsatoriu de amplitudine dublă (dacă $B_0 = B_{max}$) deci și o contracție dublă de $2\Delta l$ a tubului de nichel cu o frecvență egală cu cea a curentului alternativ care produce câmpul oscilant (f). Prin aceasta se reduce și puterea necesară a generatorului 1 pentru producerea unui anumit efect de distrugere în timp impus.

Frecvența proprie de oscilație a tubului de nichel depinde de lungimea lui și viteza sunetului în acest material și poate fi determinate aproximativ din relația:

$$f = \frac{v}{2l} \qquad v \cong 4785 \text{ m/s}$$

B_0 depinde însă în mare măsură de greutatea probei și a capului de prindere al probei, fixat la capătul inferior a tubului de nichel. O importanță deosebită are sistemul de fixare a tubului care trebuie să fie plasat în nodul de oscilație a sistemului "**tub(1) + piesa de prindere(2) + proba (3)**". Pentru obținerea unor amplitudini mari de oscilații ale probei, deci a unui randament ridicat a instalației este necesar ca frecvența câmpului alternativ să fie egală cu frecvența de rezonanță mecanică a ansamblului "tub de nichel + piesa de prindere + proba".

Aceasta se obține prin acordarea generatorului 1 la frecvența de oscilație proprie a tubului de nichel. Deasemenea se impune și compensarea inductivităților mari ale bobinelor (6) prin capacitatea C4 obținând tot un circuit oscilant acordat pe aceeași frecvență.

Mentținerea oscilațiilor la aceeași valoare se obține prin reglarea fină a tensiunii de ieșire a generatorului de frecvență cu autotransformatorul, modificând prin aceasta intensitatea curentului alternativ deci și intensitatea curentului magnetic pulsatoriu.

Prin racordarea frecvenței curentului de alimentare a bobinelor cu frecvența de oscilație mecanică proprie a tubului de nichel, se obțin, datorită fenomenului de rezonanță mecanică, oscilații mari ale probei, care ajung la amplitudinea de $94\mu\text{m}$ [58].

Undele sonice de presiune, datorate mișcării vibratorii a probei, sunt captate de pâlnia (9) și ridică coloana de lichid din piezometru (10) cu denivelarea Δh proporțională cu amplitudinea oscilațiilor (pentru $A=94\mu\text{m}$, $\Delta h=20\text{mm}$).

Cavitația se produce pe suprafața probei scufundate în lichid din cauza mișcării ale acesteia. Mișcărilor oscilante ale probei produc pe suprafața probei variații oscilante ale presiunii ce duc la formarea bulelor cavitaționale în mișcarea ascendentă și la surparea acestora în mișcarea descendentă. Datorită frecvenței ridicate de formare/surpare, distrugerea de material pe probă este **deosebit de intensă** având astfel posibilitatea de a încerca un număr mult mai mare de probe într-un interval de timp dat, comparativ cu oricare altă metodă cunoscută și prin aceasta are o eficiență foarte ridicată.

Proba este fixată de tubul de nichel printr-o piesă de prindere (2) înșurubată în tub și fixată prin lipitură tare, fig.3.4. Piesa de prindere permite fixarea rigidă a probei fără deteriorarea tubului de nichel.

Din cauza câmpului magnetic pulsatoriu intens în tub se induc curenți Foucault care duc la o încălzire puternică a acestuia. Cum peste o anumită temperatură ($\approx 400\text{ C}$) nichelul pierde proprietatea de magnetostricțiune se impune răcirea intensă a tubului de nichel. Răcirea este efectuată prin jeturi de apă proiectate pe peretele interior al tubului la capătul de sus și absorbția ei printr-o țevă, din capătul inferior cu ajutorul unei pompe de vid cu jet de apă.

S-a adoptat această soluție ca cea mai eficientă după alte încercări de răcire cu aer comprimat respective prin practicarea unei tăieturi de-lungul generatoarei tubului.

Răcirea cu aer nu a fost suficient de intensă iar la tubul tăiat pe generatoare a apărut o scădere puternică a rezistenței mecanice care a impus schimbarea lui după aproximativ 10-12 ore din cauza fisurării sale.

Tubul de nichel folosit în instalația experimentală are o lungime de 305 mm diametrul exterior 14 mm și diametrul interior 12mm.

Proba cu dimensiunile date în fig.3.4, 3.7 după prelevare din materialul dat a fost prelucrată la dimensiunile indicate, șlefuită cu hârtie metalografică, pe suprafața supusă distrugerii prin cavitație și lustruită cu suspensie abrazivă de alumina.

Acest mod de prelucrare a suprafeței este necesară deoarece starea de prelucrare a acesteia influențează asupra măsurătorilor în sensul că pierderile de greutate cresc cu creșterea rugozității suprafeței.

Încercările efectuate de alți autori au arătat că compoziția și temperaturile mediului de încercare sunt parametrii importanți al regimului de încercare. Ca

compoziție s-a ales ca mediu apa distilată fiind mediul utilizat cel mai des și de alți autori. Această alegere s-a bazat și pe următorul considerent: cercetările și reprezentările fenomenului de distrugere prin cavitație au pus în evidență rolul primordial al acțiunii mecanice în procesul de distrugere. Ca atare în cazul unor încercări comparative, trebuie luată în considerare în primul rând acțiunea principală și eliminatele alte acțiuni secundare. Acest deziderat se realizează prin folosirea apei distilate.

În cazul instalației folosite pentru menținerea constantă a temperaturii mediului de încercare în vasul (8) s-a introdus o serpentină din cupru prin care circulă apa de răcire. Controlarea temperaturii s-a efectuat cu un termometru înainte și după fiecare perioadă de încercare. Prin aplicarea acestui sistem de răcire în tot cursul experimentărilor temperatura mediului de încercat a fost menținută la $20 \pm 1^\circ C$.

O problemă dificilă la determinarea parametrilor de funcționare a instalației o constituie măsurarea amplitudinii oscilațiilor produse prin contractarea tubului de nichel cu frecvența de 7200 ± 100 Hz. **Amplitudinea oscilației** este un parametru de bază al metodei de încercare. Alegerea mărimii amplitudinii este determinată de:

a).necesitatea obținerii unui grad de distrugere suficient de avansat după care să se poată judeca comportarea materialului la cavitație.

b).necesitatea asigurării unei durabilități suficient de mari a tubului de nichel, durabilitate care scade cu creșterea amplitudinii oscilațiilor.

În urma cercetărilor efectuate de alți autori s-a constatat ca cel mai mare interes îl prezintă regimurile cu amplitudinea de $75-94 \mu m$. În instalații mai noi se adoptă amplitudini și mai mari.

Măsurarea amplitudinii s-a efectuat cu montajul arătat în fig. 3.6, folosind un microscop micrometric M- M și o sursă de lumină suficient de puternică

Măsurătorile făcute cu acest montaj au arătat ca în cazul regimului de lucru stabilit de denivelare Δh la piezometrul indicator amplitudinea oscilației este de $94 \mu m$.

O altă metodă de măsurare a amplitudinii se realizează cu un sistem electric de măsurare (12), realizat dintr-o bobină și un voltmetru cu rezistența de intrare mare (12) fig. 3.6. [11]. Menținerea constantă a temperaturii lichidului din vas se realizează cu o serpentină din cupru prin care circulă apa de răcire de la rețea.

Un alt parametru a regimului de încercare este adâncimea de scufundare a probei în apă. Datele din literatură arată că această mărime poate fi aleasă între 2-20 mm însă se precizează că prin creșterea adâncimii de scufundare se micșorează pierderea în greutate a probei supuse încercării. Cei mai mulți cercetători adoptă o adâncime de scufundare în jur de 4-5 mm. La încercările făcute s-a ales adâncimea de scufundare de 3 mm, care permite distrugerea intensivă a probei.

Timpul de încercare cronometrat a fost de 165 min. împărțit în 10 perioade de câte 15 minute, una de 5 minute și una de 10 minute.

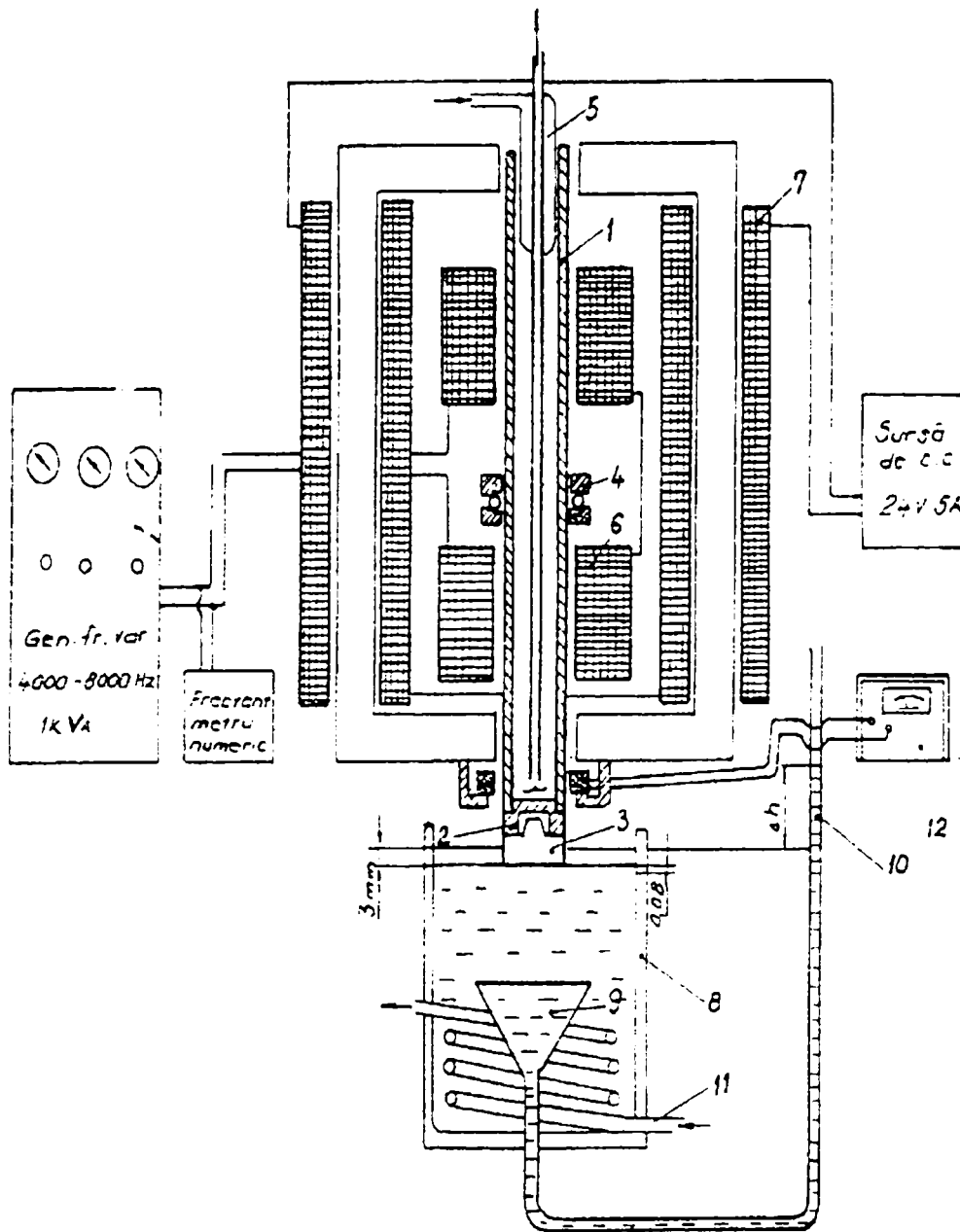


Fig. 3.1

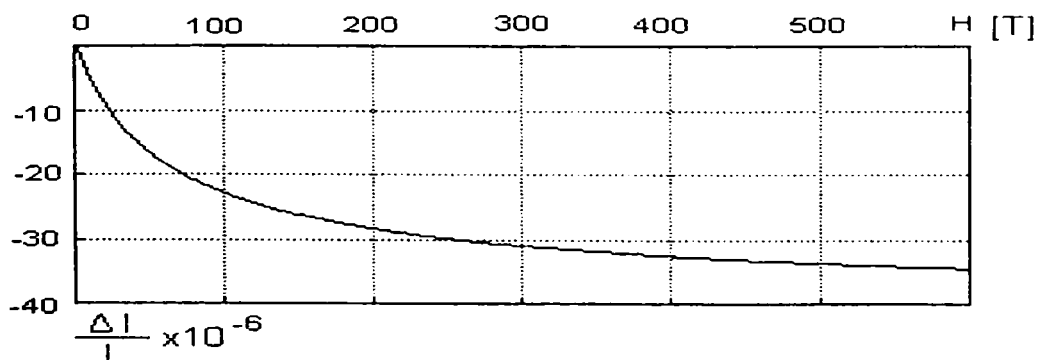


Fig. 3.2

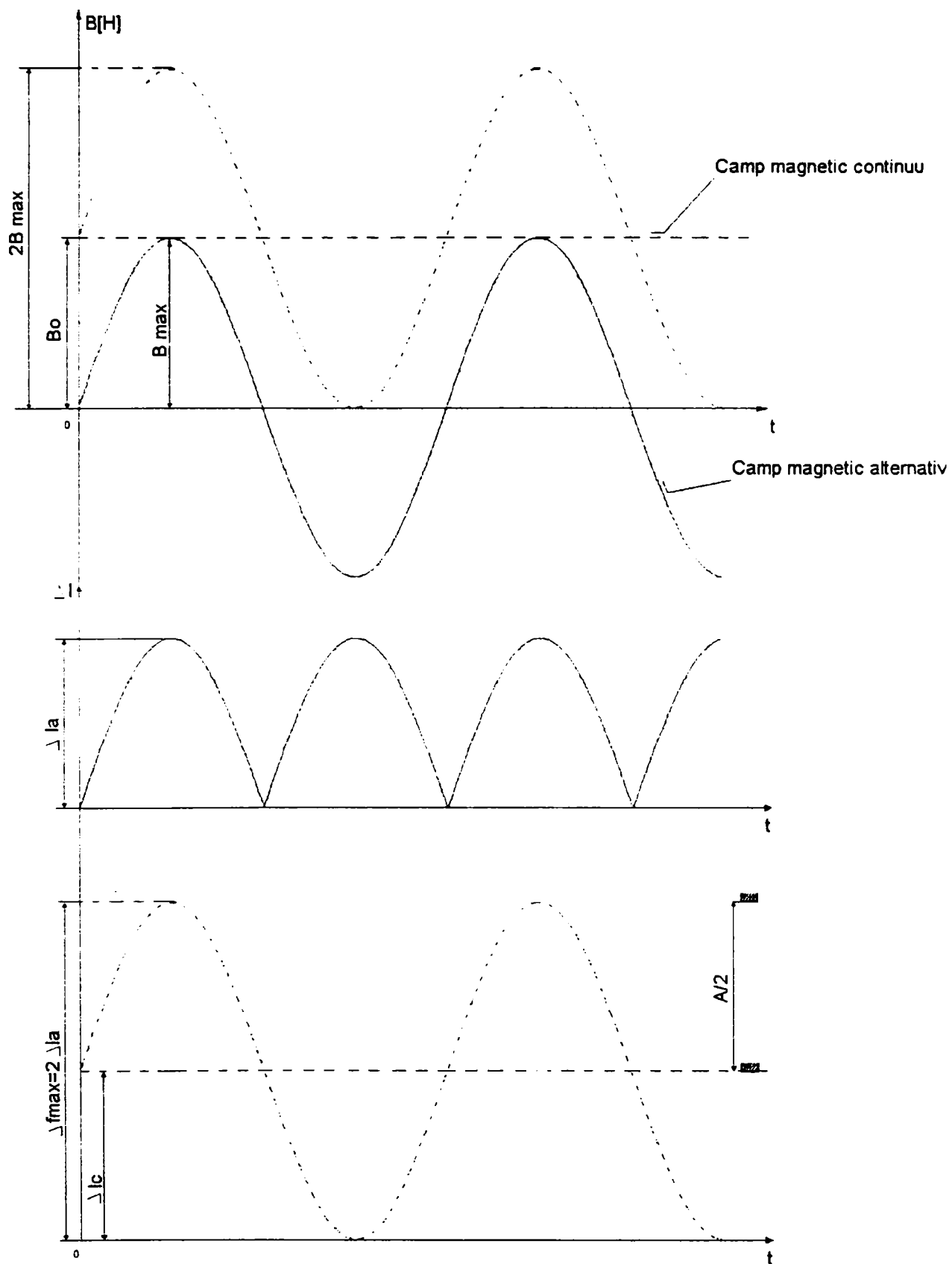


Fig. 3.3

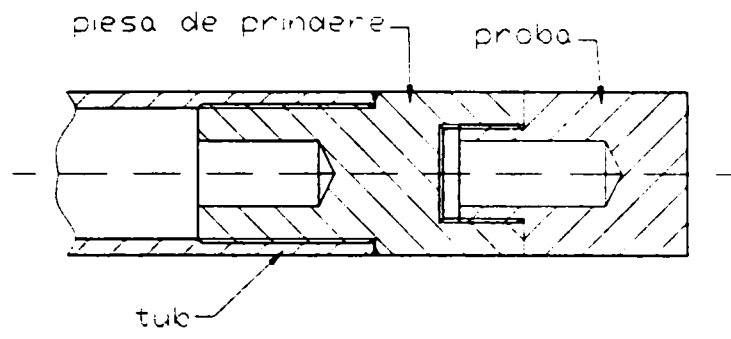


Fig. 3.4

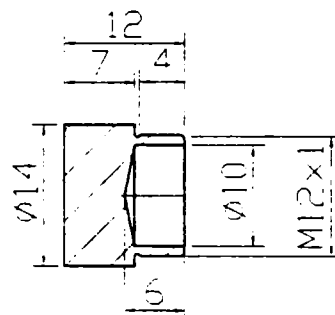


Fig. 3.5

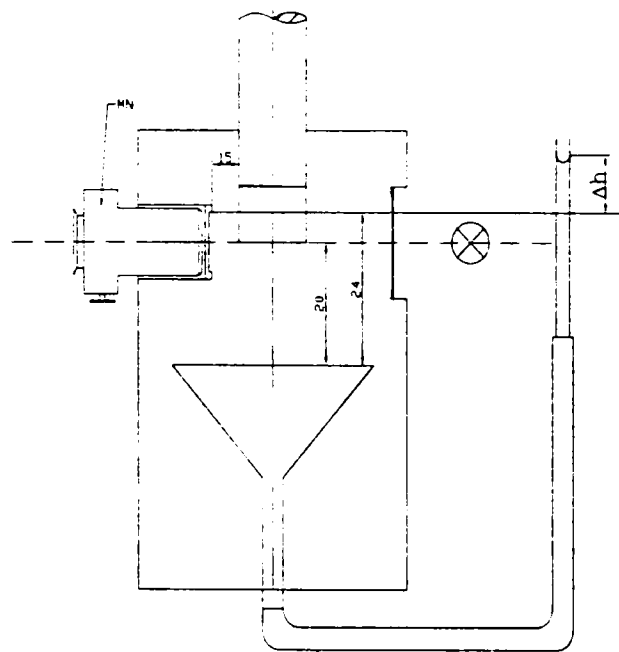


Fig. 3.6

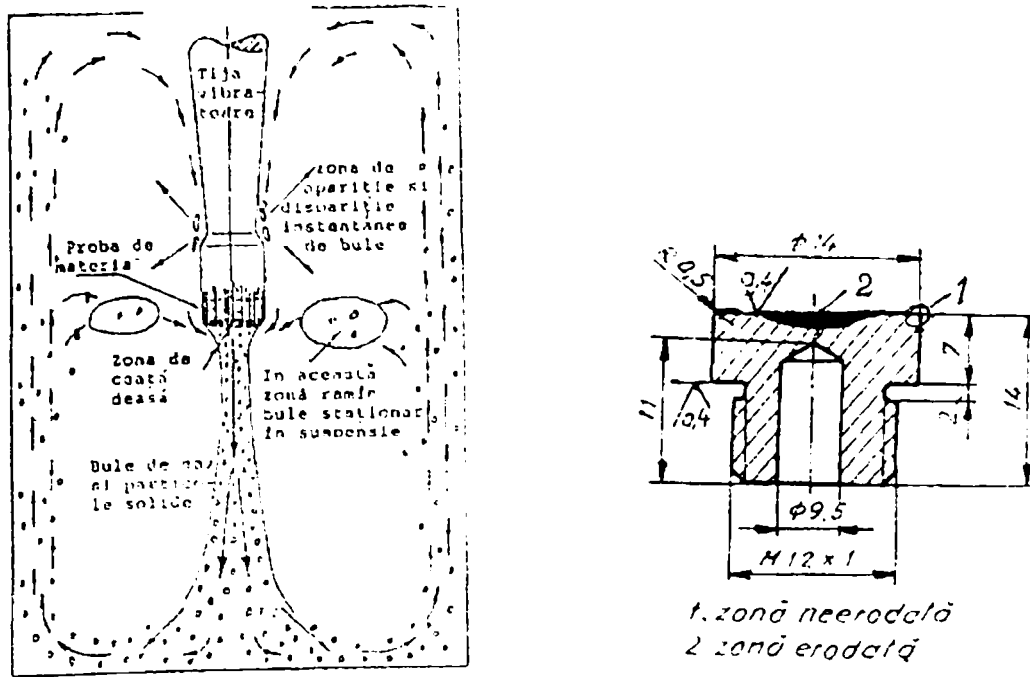


Fig. 3.7

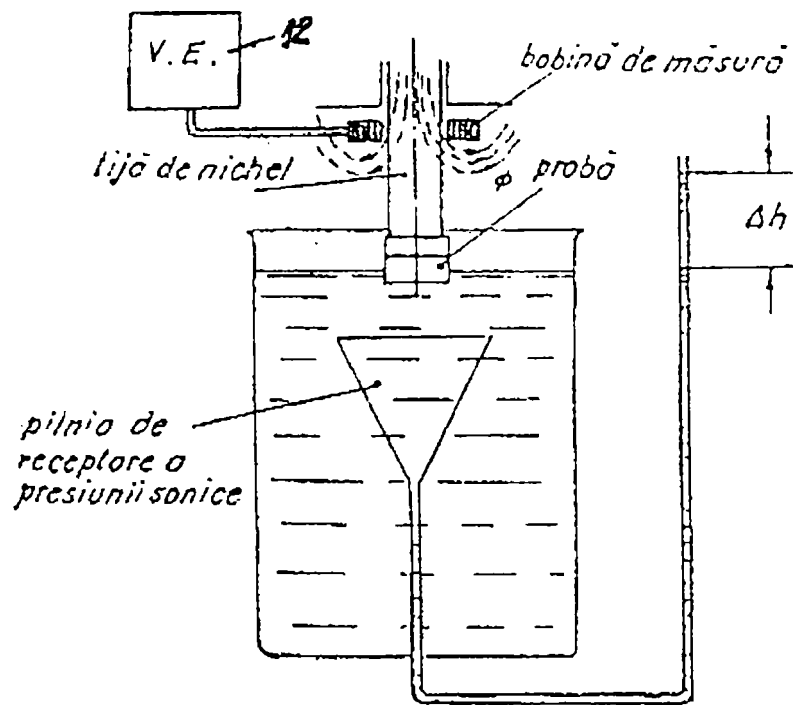


Fig. 3.8

3.3. CERCETĂRI ASUPRA REZISTENȚEI CAVITAȚIONALE A OȚELURILOR INOXIDABILE GX5CrNi 19-10 ȘI GX4CrNi 13-14 TRATATE ÎN DIFERITE VARIANTE TEHNOLOGICE

Conform celor specificate în Cap.2.4 probele încercate la cavitație cu aparatura din laborator precizată au fost fabricate din 2 calități de oțeluri inoxidabile și supuse unor regimuri de tratare termică: oțelul austenitic GX5CrNi 19-10 - Tabelul 3.1. și oțelul martensitic GX4CrNi 13-14-Tabelul 3.2.

Tabelul 3.1- oțelul austenitic GX5CrNi 19-10

Marcaj probe	Variante tehnologice de procesare termica	
A1 -P1 A1 -P2 A1- P3	CS	Călire de punere în soluție (1050 °C/30 min/apă)
A2 -P1 A2-P2 A2- P3	N	Călire de punere în soluție (1050 °C/30 min/apă) Nitrurarea gazoasă se face în două trepte <ul style="list-style-type: none"> • treapta I-500⁰ C • treapta II-520⁰ C, după următorul regim : <ul style="list-style-type: none"> • -încălzire cu 50⁰ C/h până la 500⁰ C • menținere 25h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h) urcare cu 10⁰ C la 520⁰ C • menținere 28 h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h) • răcire în cuptor închis cu 50⁰ C/h în curent de amoniac (debit de amoniac 1400-1600 l/h), până la 170⁰C după care se oprește amoniacul, se deschide cuptorul și se continuă răcirea pieselor în aer.
A3 -P1 A3-P2 A3- P3	S+N	Călire de punere în soluție (1050 °C/30 min/apă) Sablarea s-a făcut cu instalația din fig.2.4. Cap.2 folosind ca mediu nisip cu o granulația G= 50 μm , presiunea p =4-6 bar, unghiul de atac β= 45 ⁰ , timpul de atac t=1min și 20 sec. Nitrurare gazoasă conform specificației anterioare
A4 -P1 A4-P2 A4-P3	S	Încărcarea prin sudare s-a făcut conform specificației precizată în Cap.2 ; s-a folosit electrod Ø3,2 mm Selectarc 18.8 Mn cu energie termică 10350-15000 J/cm ² , în curent continuu. Proba de încercare din Ø 25 mm a fost încărcată cu 3 straturi de sudură anticavitațională în zona de cercetare din ZIT-ul sudurii. Proba a fost prelevată din zona sudurii, urmărind în special ca la suprafața ei să apară zona influențată termic.

Tabel 3.2- oțelul martensitic GX4CrNi 13-14

Marcaj probe		Variante tehnologice de procesare termica
M 1-P1 M 1-P2 M 1- P3	C+R	Călire (1050 °C/1 oră/apă) Revenire (650 °C/ 3 ore /aer)
M 2-P1 M 2-P2 M 2- P3	N	Călire (1050 °C/1 oră/apă) Revenire (650 °C/ 3 ore /aer) Nitrurarea gazoasă se face în două trepte <ul style="list-style-type: none"> • treapta I-550⁰ C • treapta II-570⁰ C, după următorul regim : <ul style="list-style-type: none"> • -încălzire cu 50⁰ C/h până la 550⁰ C • menținere 24h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h) urcare cu 10⁰ C la 570⁰ C • menținere 25 h după egalizare (debit de amoniac 1400-1600 l/h) • răcire în cuptor închis cu 50⁰ C/h în curent de amoniac (debit de amoniac 1400-1600 l/h), până la 170⁰C după care se oprește amoniacul, se deschide cuptorul și se continuă răcirea pieselor în aer.
M 3-P1 M 3-P2 M 3- P3	S+N	Călire (1050 °C/1 oră/apă) Revenire (650 °C/ 3 ore /aer) Sablarea s-a făcut cu instalația din fig.2.4. Cap.2 folosind ca mediu nisip cu o granulația G= 50 μm , presiunea p =4-6 bar, unghiul de atac β= 45°, timpul de atac t=1min și 20 sec. Nitrurare gazoasă conform specificației anterioare
M 4-P1 M 4-P2 M 4- P3	S	Încărcarea prin sudare s-a făcut conform specificației precizată în cap.2, Fig. 3; încărcându-se cu două straturi tampon - cu electrod Ø 3,2 mm Selectarc 18.8 Mn și trei straturi anticavitaționale electrozi Ø 4 mm UTP 730 cu energie termică 11520-16900 J/cm ² , în curent continuu. Proba încercată la cavitație a fost prelevată din zona sudurii urmărind în special ca la suprafața ei să apară zona influențată termic.

3.4. REZULTATE EXPERIMENTALE ALE ÎNCERCĂRILOR DE LABORATOR APARATURĂ. REGIM DE ÎNCERCARE

Atacul cavitațional distructiv a fost realizat în aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel [T1] din cadrul laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara.

Aparat magnetostrictiv cu bară de nichel

Mediu de încercare apă distilată

Amplitudine de control 94 μ m

Frecvența medie 7000Hz \pm 3%

Temperatura de lucru 20 \pm 1 $^{\circ}$ C

3.4.1 ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚEL INOXIDABIL GX5CrNi19-10 TRATAT TERMIC PRIN CĂLIRE DE PUNERE ÎN SOLUȚIE

În conformitate cu **normele ASTM** [123], încercarea s-a făcut pe trei probe, în apă distilată la temperatura T = 20 \pm 1 $^{\circ}$ C.

Durata totală a atacului cavitațional este 165minute, împărțită în 12 perioade: câte una de 5 și 10 minute și 10 de câte 15 minute.

La începutul și sfârșitul fiecărei perioade probele au fost spălate succesiv în apă potabilă sub presiune de la robinet, apă distilată, alcool, acetonă, uscate cu curent de aer cald și cântărite cu balanța analitică cu șase cifre caracteristice.

Rezultate experimentale

Pe baza pierderilor masice Δm_a s-au determinat vitezele de eroziune cavitațională aferente fiecărei perioade de atac cavitațional Δt , cu relația:

$$v = \frac{\Delta m_a}{\Delta t} \text{ [g/min]}$$

Pe baza datelor experimentale prezentate în **tabelele 3.3, 3.4, 3.5, 3.6** se construiesc curbele caracteristice ale eroziunii cavitaționale considerate a fi cele mai reprezentative **Fig. 3.9, 3.10, 3.11, 3.12.** :

- variația vitezei de eroziune cavitațională cu timpul de atac cavitațional v(t).
- variația masei de material erodat cu timpul de atac cavitațional $m_a(t)$.

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabelul 3.3 Proba 1-CS

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,1	2,1
15	0,61	5,1
30	2,05	10,5
45	3,58	14,43
60	5,74	15,3
75	8,03	16
90	10,43	16
105	12,83	16
120	15,23	16
135	17,63	16
150	20,03	16
165	22,43	16

Tabelul 3.2 Proba 2-CS

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,14	2,8
15	0,62	4,4
30	2,4	8,9
45	4,14	11,6
60	6,03	12,6
75	8,1	13,8
90	10,27	14,5
105	12,44	14,5
120	14,61	14,5
135	16,77	14,5
150	18,94	14,5
165	21,11	14,5

Tabelul 3.5 Proba 3-CS

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,02	0,5
15	0,17	1,5
30	0,25	3,8
45	1,12	5,8
60	2,26	7,6
75	3,52	8,4
90	4,96	9,6
105	6,46	10
120	7,96	10
135	9,46	10
150	10,96	10
165	12,46	10

Pe baza valorilor din tabelele 3.3, 3.4, 3.5, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.9, 3.10.

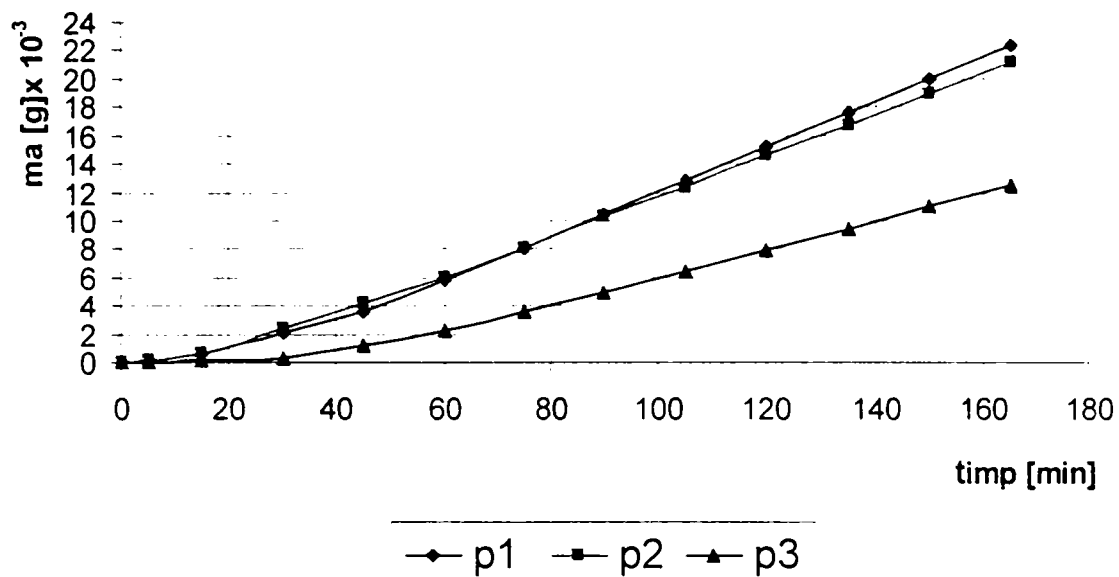


FIG 3.9

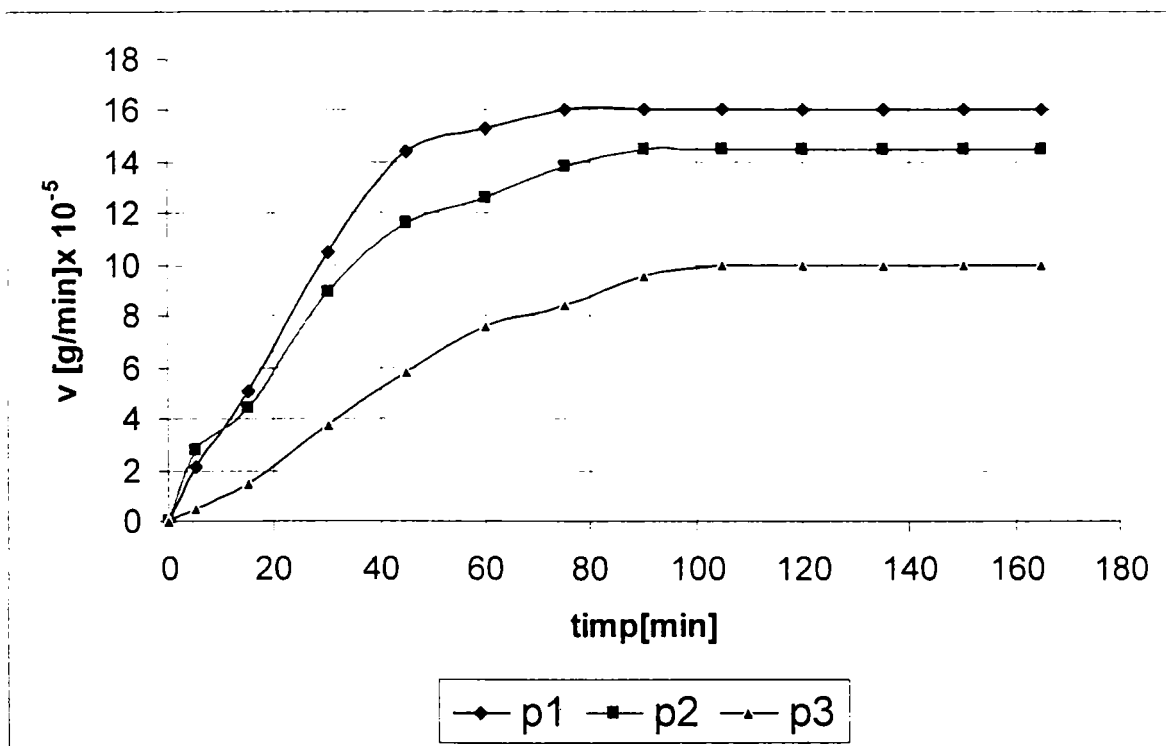


FIG.3.10

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în **tabelul 3.6** și **Fig. 3.11, 3.12**.

Tabelul 3.6
Media celor trei probe

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,09	1,8
10	0,23	2,89
30	1,53	6,55
45	2,83	8,73
60	4,42	10,61
75	6,23	12,11
90	8,16	12,88
105	10,18	13,5
120	12,2	13,5
135	14,22	13,5
150	16,24	13,5
165	18,26	13,5

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în **Fig. 3.11, 3.12**.

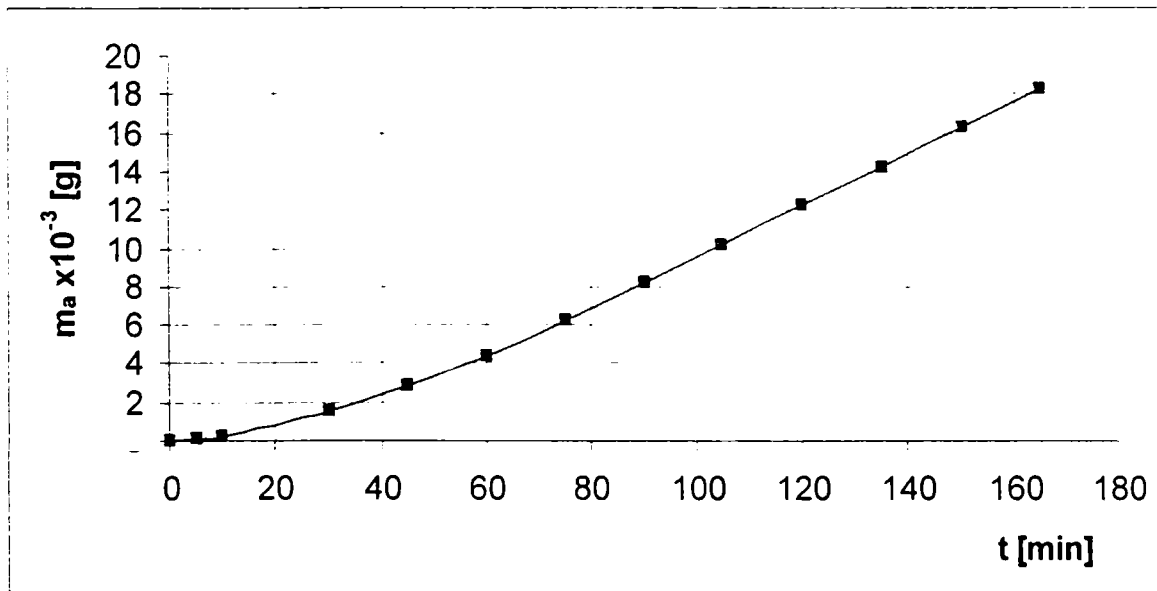


Fig. 3.11

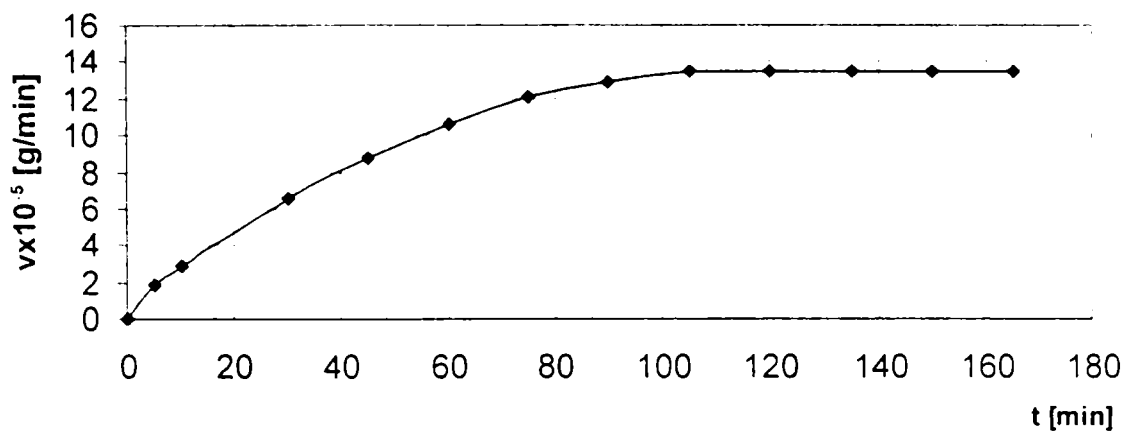


Fig. 3.12

Pe baza datelor din tabelul 3.6 și Fig. 3.11, 3.12 rezultă că oțel austenitic GX5CrNi19-10 supus tratamentului de călire de punere în soluție are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 13,5 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 18,26 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.2 ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚEL INOXIDABIL GX5CRNI19-10 TRATAT TERMIC PRIN CĂLIRE DE PUNERE ÎN SOLUȚIE ȘI NITRURARE GAZOASĂ

Regimurile de încercare folosite au fost identice cu cele ale probelor tratate termic prin călire de punere în soluție[3.4.1]

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.7 Proba1-N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,10	2,05
15	0,63	5,35
30	1,54	6,08
45	2,77	8,20
60	4,07	8,70
75	5,55	9,92
90	7,05	10,00
105	8,55	10,05
120	10,05	10,06
135	11,56	10,08
150	13,07	10,08
165	14,6	10,2

TABEL 3.8 Proba 2-N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,11	2,2
15	0,52	4,19
30	2,45	7,29
45	3,78	8,92
60	5,27	9,95
75	6,90	10,87
90	8,55	11,03
105	10,2	11,06
120	11,85	11,06
135	13,50	11,03
150	15,50	11,20
165	16,80	11,20

Tabel 3.9 Proba 3-N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,16	0,1
15	0,37	2,1
30	0,95	3,9
45	1,65	4,7
60	2,52	5,82
75	3,45	6,21
90	4,41	6,45
105	5,37	6,46
120	6,33	6,41
135	7,29	6,42
150	8,25	6,46
165	9,21	6,48

Pe baza valorilor din tabelele 3.7, 3.8, 3.9, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.13, 3.14.

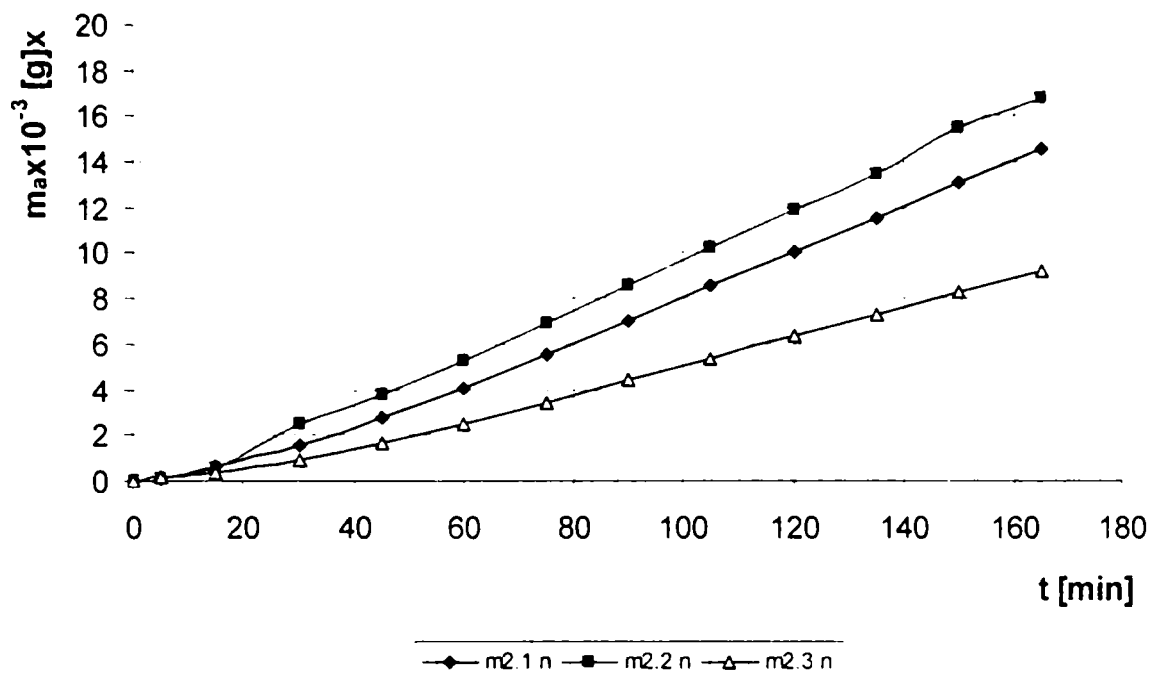


Fig. 3.13

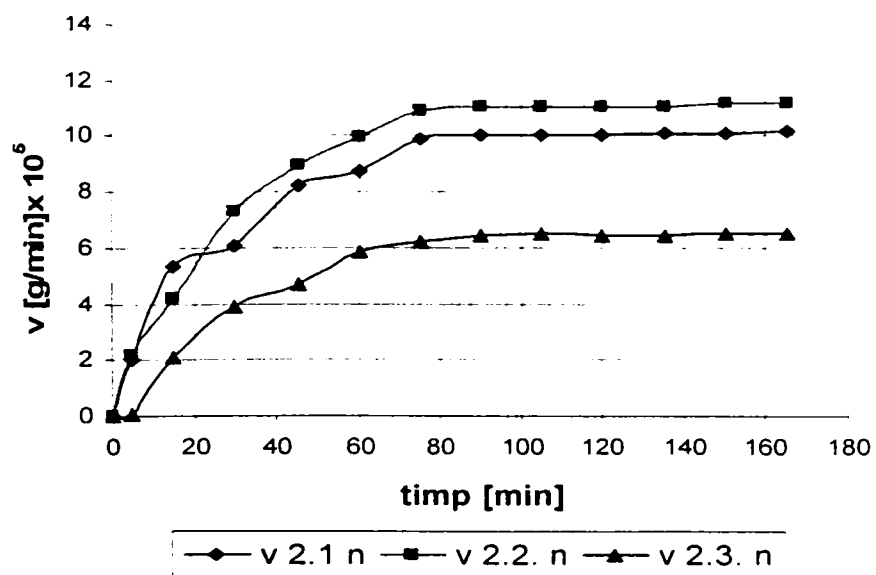


Fig. 3.14

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.10 și Fig. 3.15, 3.16.

TABEL 3.10
Media celor trei probe

Timp [min]	$m_a \times 10^{-3}$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0		0
5	0,065	1,3
15	0,29	2,31
30	1,11	5,5
45	2,18	7,18
60	3,41	8,25
75	4,73	8,8
90	6,09	9,11
105	7,47	9,2
120	8,85	9,2
135	10,23	9,2
150	11,61	9,2
165	12,99	9,2

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.15, 3.16.

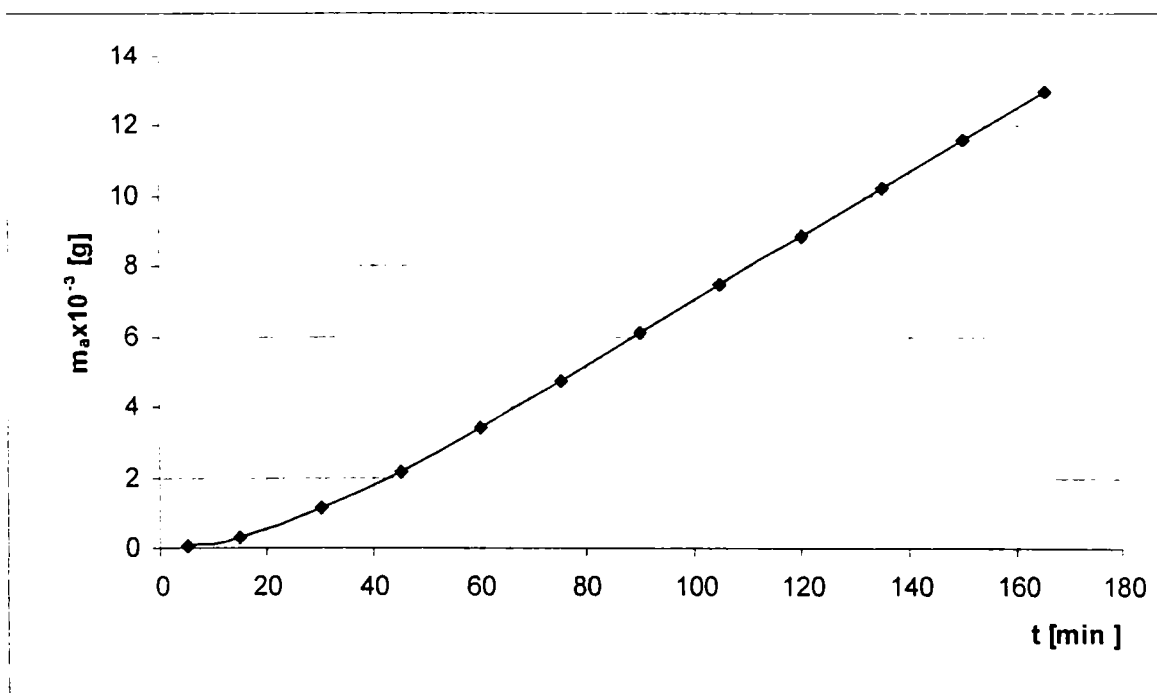


Fig. 3.15

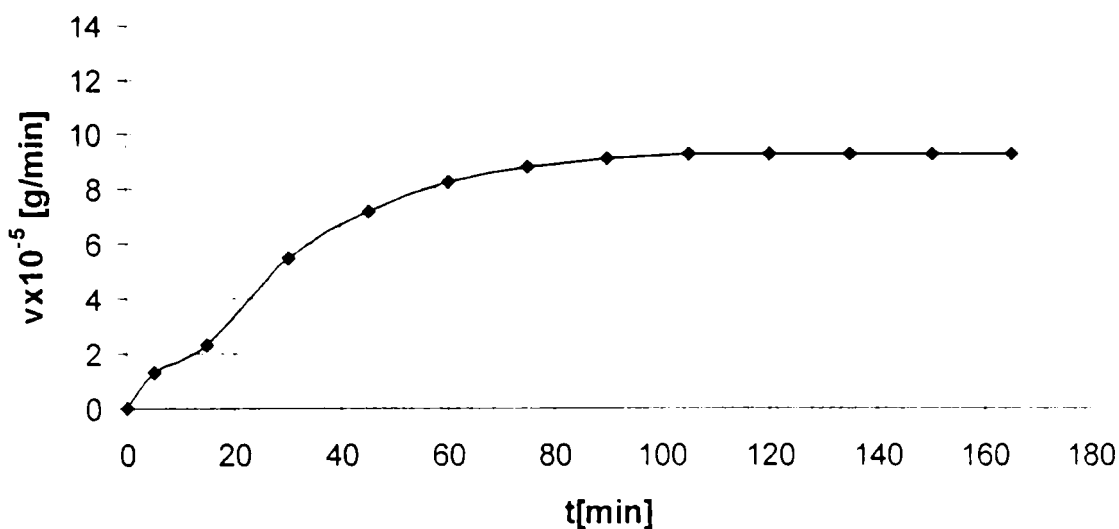


Fig. 3.16

Pe baza datelor din tabelul 3.6 și Fig. 3.11, 3.12 rezultă că oțel austenitic GX5CrNi19-10 supus tratamentului de călire de punere în soluție și nitrurare are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 9,20 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 12,99 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.3 ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚEL INOXIDABIL GX5CRNI19-10 TRATAT TERMIC PRIN CĂLIRE DE PUNERE ÎN SOLUȚIE SABLARE ȘI NITRURARE GAZOASĂ

Regimurile de încercare folosite au fost identice cu cele ale probelor tratate termic prin călire de punere în soluție [3.4.1]

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.11 Proba 1 S+N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,08	3,20
15	0,38	6,80
30	1,04	9,60
45	1,94	11,40
60	2,93	11,60
75	3,98	12,00
90	5,03	12,00
105	6,08	12,00
120	7,13	12,00
135	8,18	12,00
150	9,23	12,00
165	10,28	12,00

Tabel 3.12 Proba 2 S+N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,02	2,00
15	0,19	3,80
30	0,75	7,20
45	1,44	9,00
60	2,19	9,60
75	3,01	10,10
90	3,83	10,10
105	4,66	10,10
120	5,48	10,10
135	6,31	10,10
150	7,13	10,10
165	7,96	10,10

Tabel 3.13 Proba 3 S+N

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,01	0,50
15	0,70	0,8
30	0,22	1,00
45	0,43	1,90
60	0,73	2,00
75	1,11	2,20
90	1,48	2,20
105	1,86	2,20
120	2,22	2,20
135	2,61	2,20
150	2,98	2,20
165	3,36	2,20

Pe baza valorilor din tabelele 3.11, 3.12, 3.13, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.17, 3.18.

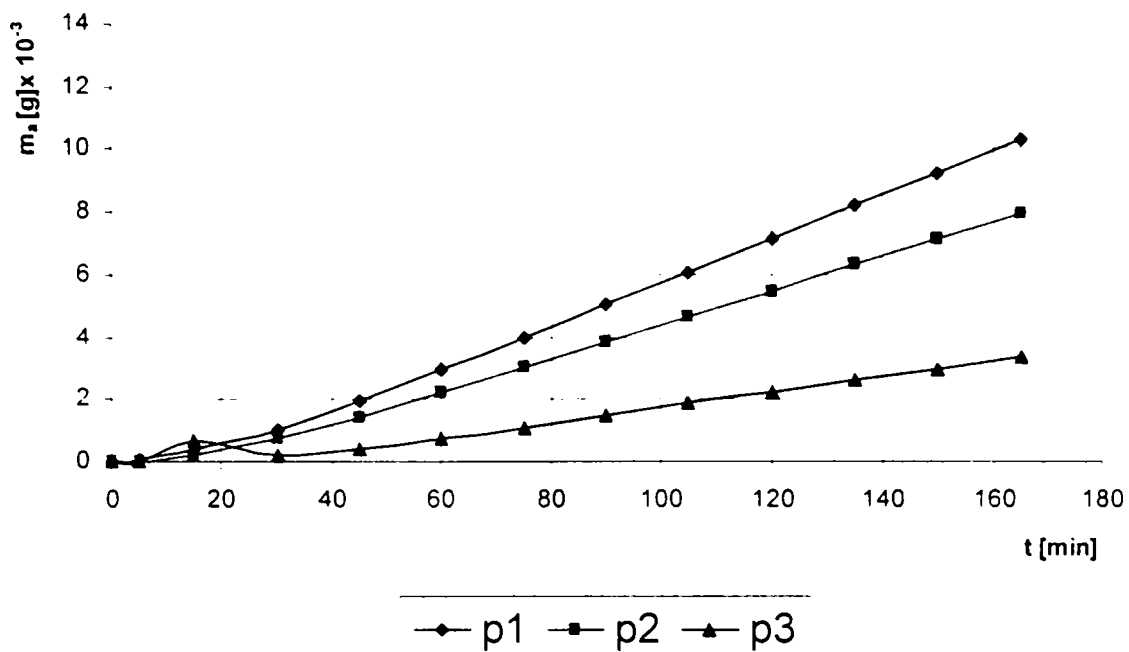


Fig. 3.17

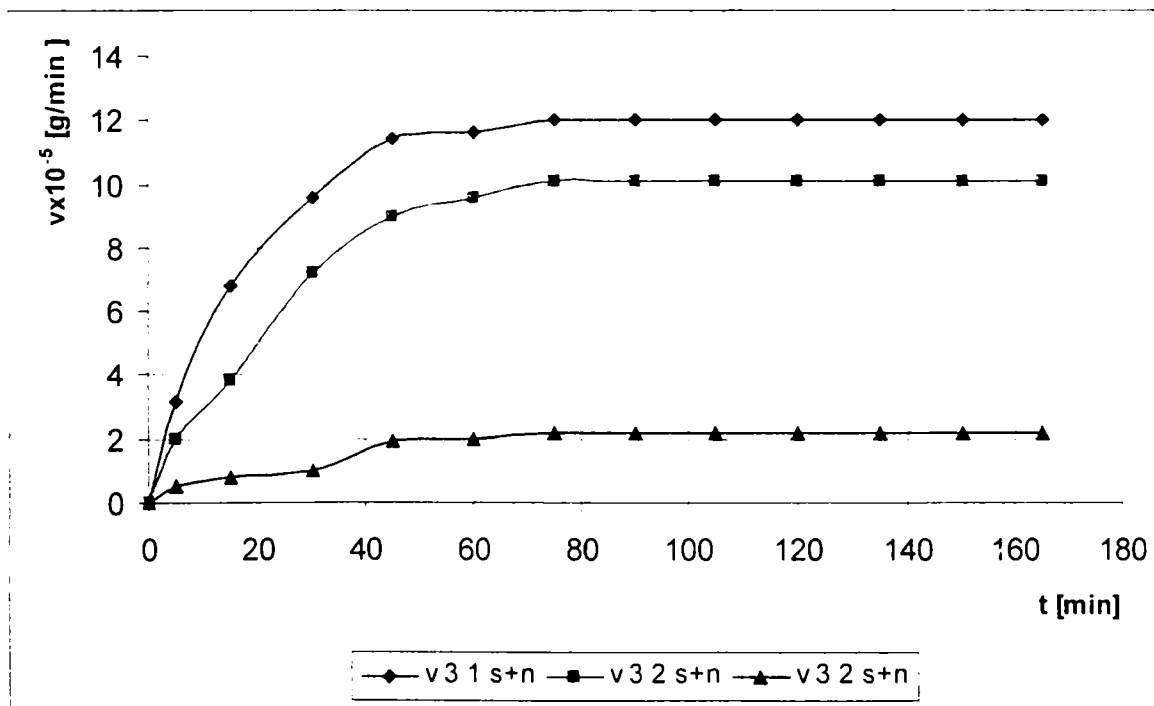


Fig. 3.18

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.14 și Fig. 3.19, 3.20.

TABEL 3.14
Media celor trei probe

Timp [min]	$m_a \times 10^3$ [g]	$v \times 10^5$ [g/min]
0	0	0
5	0,06	1,20
15	0,26	2,06
30	1,31	5,24
45	2,33	6,78
60	3,34	7,75
75	4,50	7,97
90	5,69	8,10
105	6,90	8,10
120	8,11	8,10
135	9,32	8,10
150	10,53	8,10
165	11,74	8,10

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.19, 3.20.

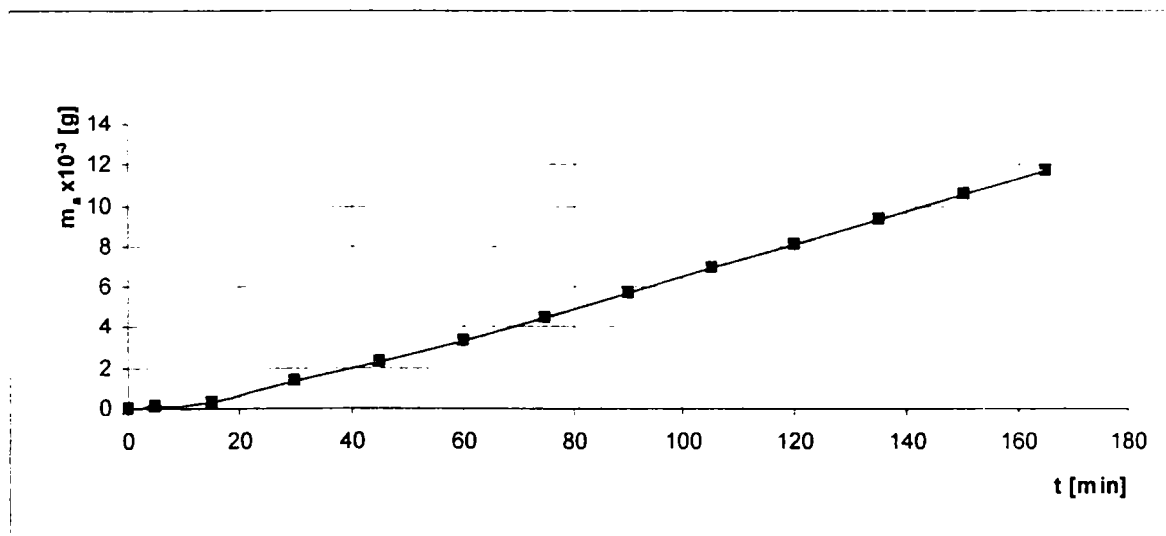


Fig. 3.19

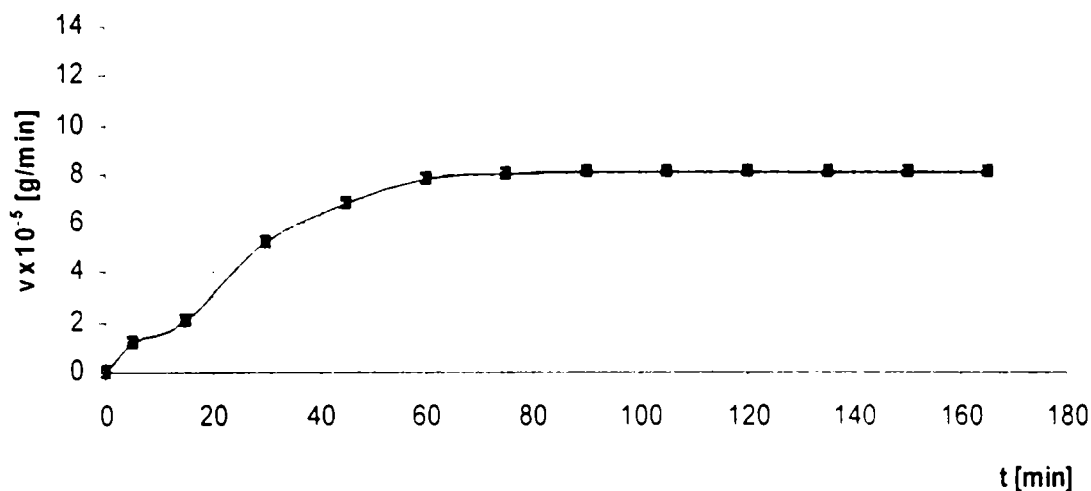


Fig. 3.20

Pe baza datelor din tabelul 3.14 și Fig. 3.19, 3.20 rezultă că oțel austenitic GX5CrNi19-10 supus tratamentului de călire de punere în soluție, sablat și nitrurat are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 8,10 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 11,74 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.4 ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚEL INOXIDABIL GX5CRNI19-10 ÎNCĂRCAT PRIN SUDARE

Regimurile de încercare folosite au fost identice cu cele ale probelor tratate termic prin călire de punere în soluție [3.4.1]

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.15 Proba 1-S

Timp [min]	Masa x 10 ³ [g]	Viteza x10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,08	1,60
15	0,38	3,00
30	1,04	4,40
45	1,94	6,00
60	2,93	6,60
75	3,98	7,00
90	5,03	7,00
105	6,08	7,00
120	7,13	7,00
135	8,18	7,00
150	9,23	7,00
165	10,28	7,00

Tabel 3.16 Proba2-S

Timp [min]	Masa x 10 ³ [g]	Viteza x10 ⁵ [g/min]
0	0	0,50
5	0,02	1,70
15	0,19	3,70
30	0,75	4,60
45	1,44	5,00
60	2,19	5,50
75	3,01	5,50
90	3,83	5,50
105	4,66	5,50
120	5,48	5,50
135	6,31	5,50
150	7,13	5,50
165	7,96	5,50

Tabel 3. 17 Proba 3-S

Timp [min]	Masa x 10 ³ [g]	Viteza x10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,01	0,30
15	0,07	0,60
30	0,22	1,00
45	0,43	1,40
60	0,73	2,00
75	1,11	2,50
90	1,48	2,50
105	1,86	2,50
120	2,23	2,50
135	2,61	2,50
150	2,98	2,50
165	3,36	2,50

Pe baza valorilor din tabelele 3.15, 3.16, 3.17, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.21, 3.22.

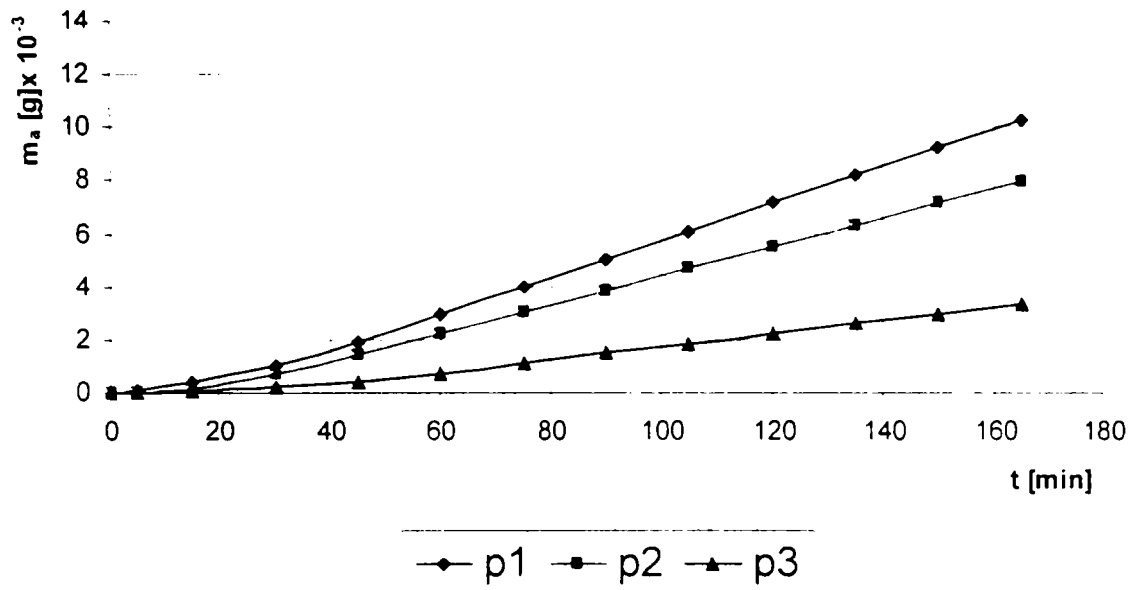


Fig. 3.21

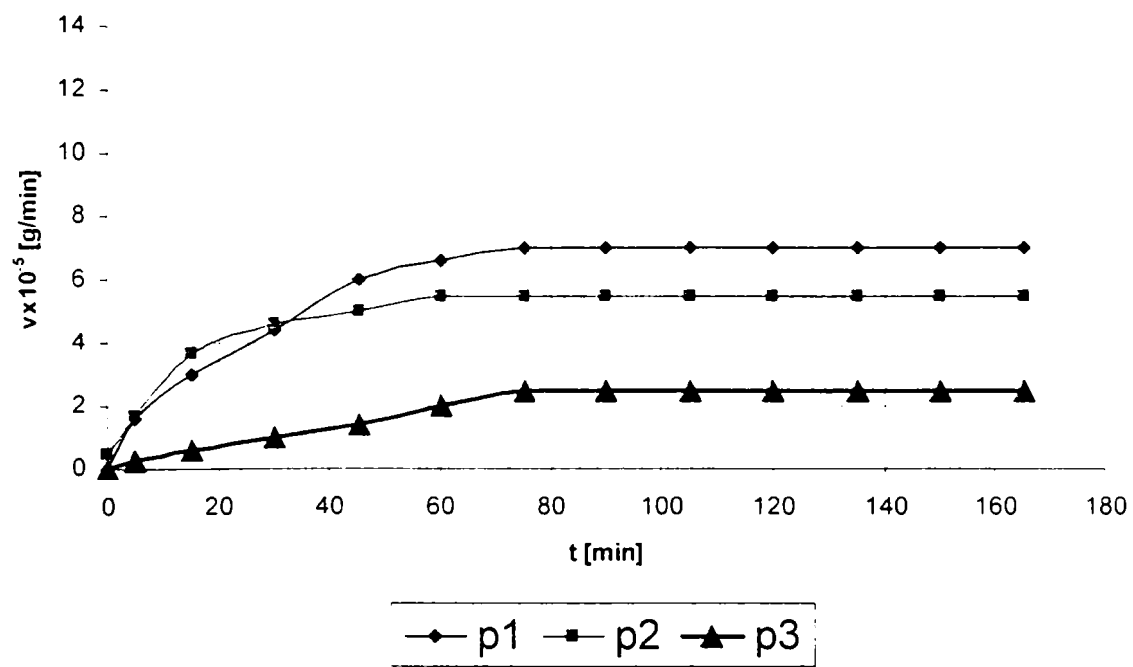


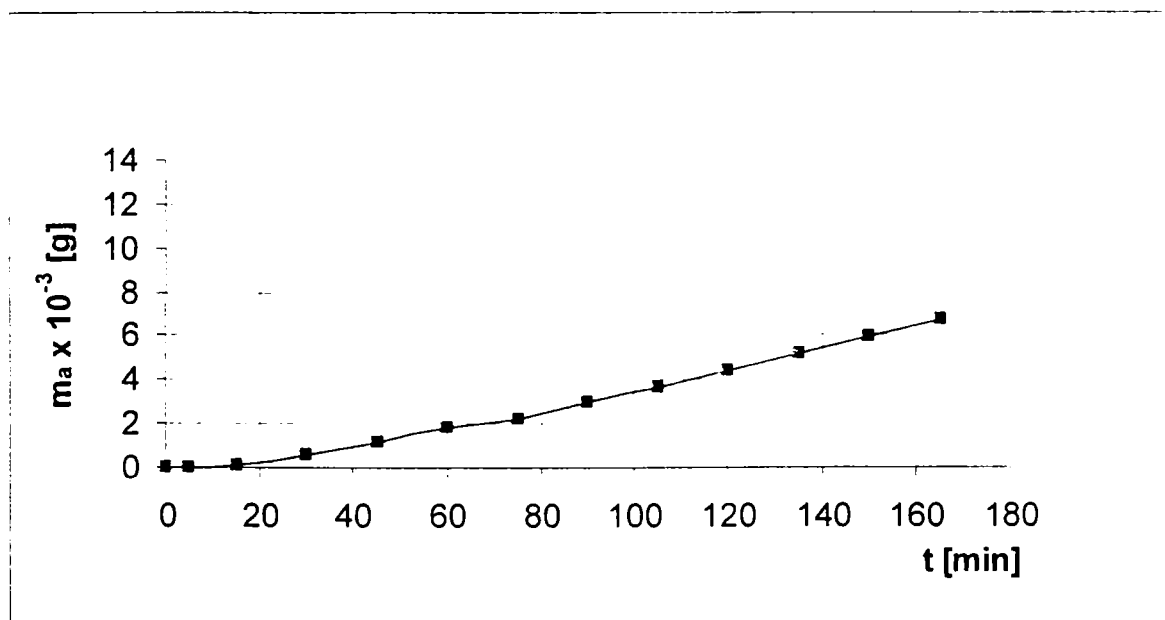
Fig. 3.22

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.18 și Fig. 3.23, 3.24.

Tabel 3.18 Media celor trei probe

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Viteza $\times 10^5$ [g/min]
0	0.0	0
5	0.024	0.48
15	0.123	0.99
30	0.543	2.80
45	1.113	3.80
60	1.81	4.67
75	2.18	5.01
90	2.93	5.12
105	3.68	5.00
120	4.45	5.12
135	5.20	5.00
150	5.95	5.00
165	6.70	5.00

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.23, 3.24.

**Fig. 3.23**

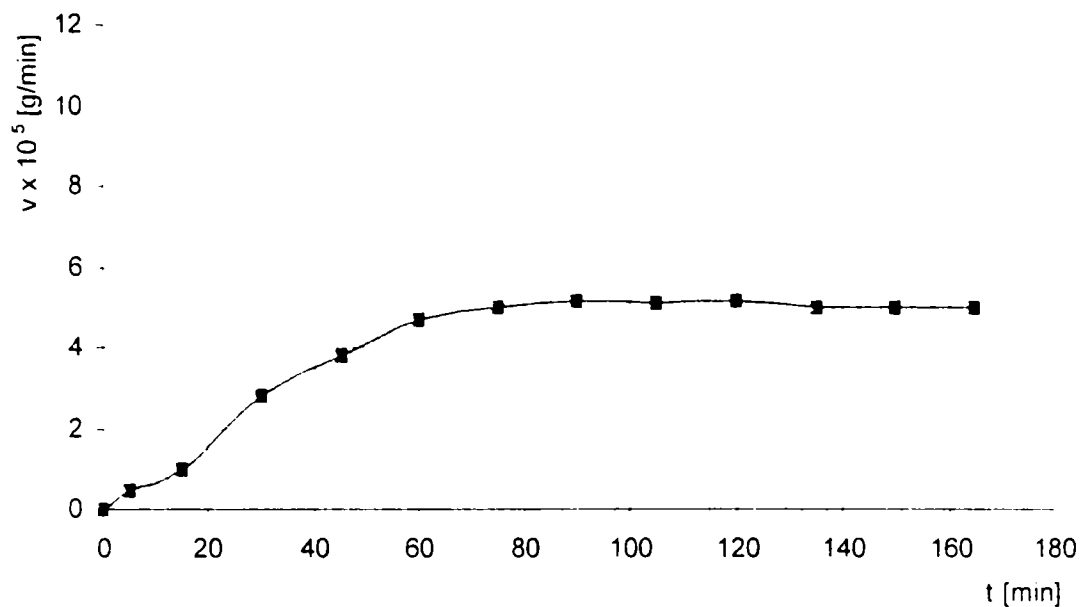


Fig. 3.24

Pe baza datelor din tabelul 3.18 și Fig. 3.23, 3.24 rezultă că oțel austenitic GX5CrNi19-10 supus tratamentului de călire de punere în soluție și încărcat prin sudare are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 5,00 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 6.70 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.5. ÎNCERCARI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚELUL GX4CrNi13-4 TRATAT TERMIC PRIN CĂLIRE ȘI REVENIRE

Regimurile de încercare și aparatura au fost identice cu cele prezentate în subcap., 3.4.1.

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.19 Proba 1 C+R

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,17	3,4
15	0,84	6,7
30	2,46	10,8
45	4,44	13,2
60	2,35	14,9
75	4,63	16
90	7,03	16
105	9,43	16
120	11,83	16
135	14,23	16
150	16,63	16
165	19,03	16

Tabel 3. 20 Proba 2 C+R

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,02	0,4
15	0,1	1,6
30	0,34	5,0
45	1,09	8,2
60	2,32	10,4
75	4,04	11,5
90	5,76	11,5
105	7,48	11,5
120	9,21	11,5
135	10,9	11,5
150	12,62	11,5
165	14,36	11,5

Tabel 3.21 Proba 3 C+R

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,04	0,8
15	0,14	2,2
30	0,59	5,5
45	1,46	8,7
60	2,93	9,8
75	4,43	10
90	5,93	10
105	7,43	10
120	8,93	10
135	10,43	10
150	11,98	10
165	13,48	10

Pe baza valorilor din tabelele 3.19, 3.20, 3.21, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.25, 3.26.

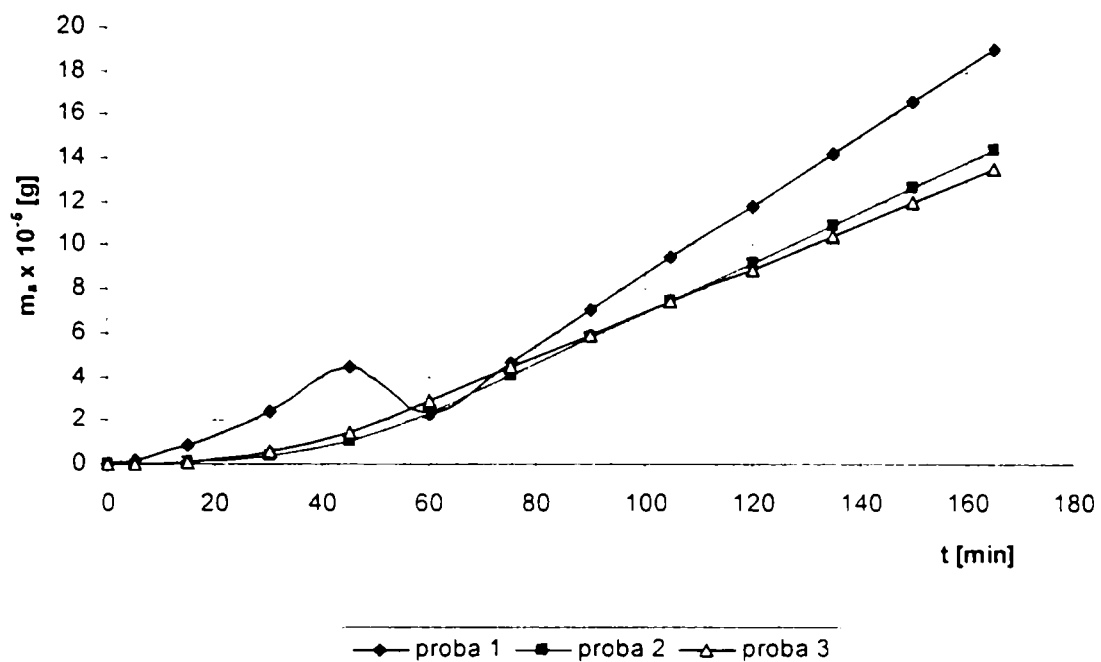


Fig. 3.25

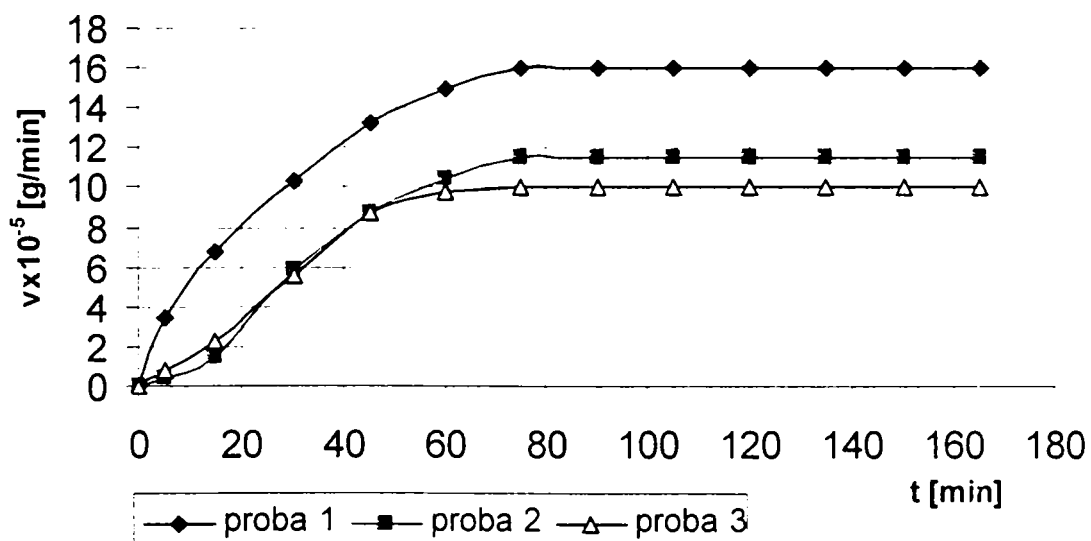


Fig. 3.26

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.22 și Fig. 3.27, 3.28.

Tabel 3.22
Media celor trei probe

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0,00	0,00	0,00
5,00	0,07	1,58
15,00	0,37	3,00
30,00	1,42	7,00
45,00	2,86	9,64
60,00	4,55	11,72
75,00	6,41	12,40
90,00	8,28	12,50
105,00	10,15	12,50
120,00	12,02	12,50
135,00	13,89	12,50
150,00	15,76	12,50
165,00	17,63	12,50

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.27, 3.28.

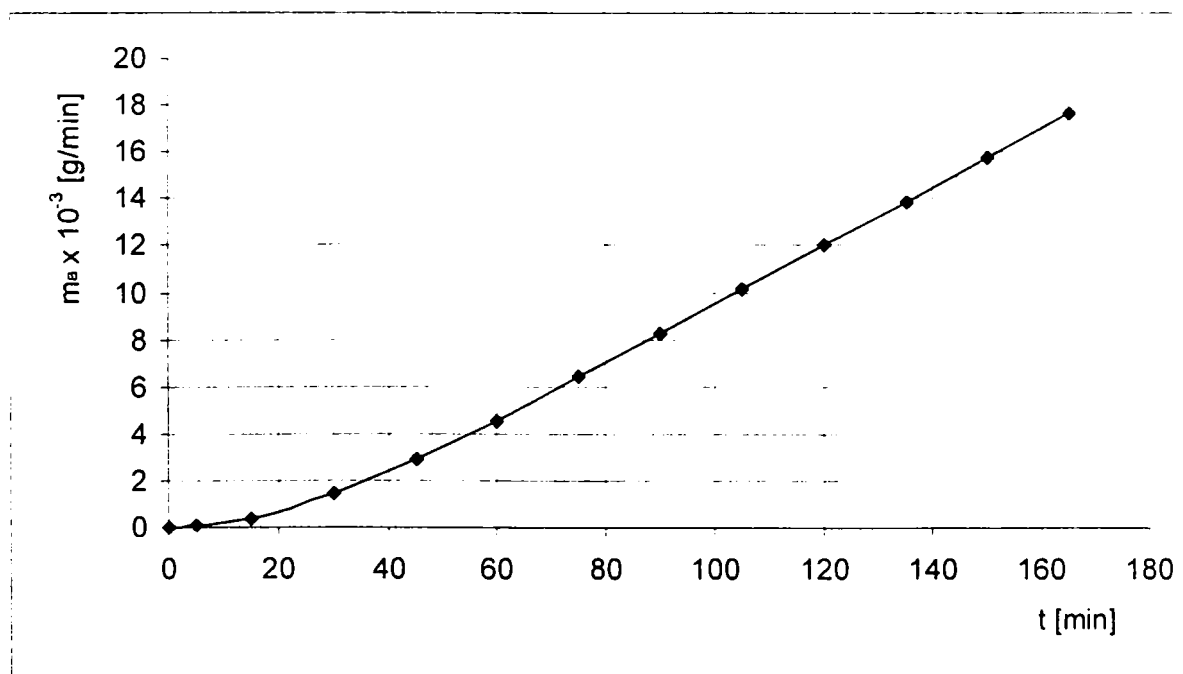


Fig. 3.27

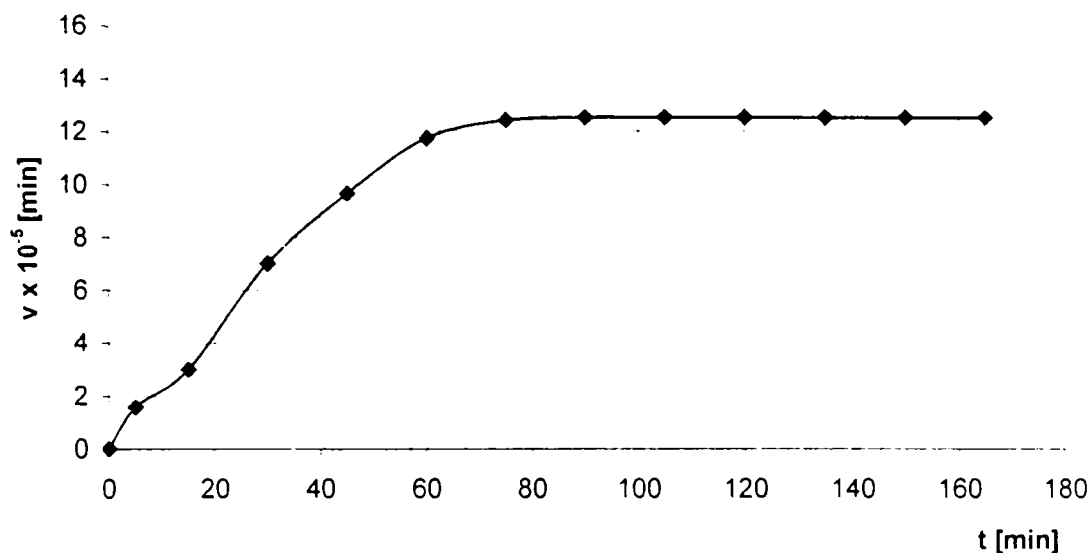


Fig. 3.28

Pe baza datelor din tabelul 3.22 și Fig. 3.27, 3.28 rezultă că oțel austenitic GX4CrNi13-4 supus tratamentului de călire și revenire are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 12,50 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 17,63 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.6. ÎNCERCARI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚELUL GX4CrNi13-4 TRATAT TERMIC PRIN NITRURARE

Regimurile de încercare și aparatura au fost identice cu cele prezentate în subcap., 3.4.1.

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.23 Proba 1-N

Timp [min]	masa 10^3 [g]	Viteza 10^5 [g/min]
0	0	0
5	0,20	5,60
15	1,80	9,00
30	2,86	11,8
45	4,92	13,8
60	7,03	14,00
75	9,13	14,00
90	11,23	14,00
105	13,33	14,00
120	15,43	14,00
135	17,53	14,00
150	19,63	14,00
165	21,73	14,00

Tabel 3.24 Proba 2-N

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,14	2,80
15	0,70	5,60
30	2,02	8,80
45	3,52	10,00
60	5,17	11,00
75	6,97	12,00
90	8,77	12,00
105	10,57	12,00
120	12,37	12,00
135	14,17	12,00
150	15,97	12,00
165	17,77	12,00

Tabel 3.25 Proba 3-N

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,02	1,00
15	0,12	1,80
30	0,39	3,00
45	0,84	3,80
60	1,41	4,30
75	2,05	4,30
90	2,69	4,30
105	3,33	4,30
120	3,97	4,30
135	4,61	4,30
150	5,25	4,30
165	5,89	4,30

Pe baza valorilor din tabelele 3.23, 3.24, 3.25, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.29, 3.30.

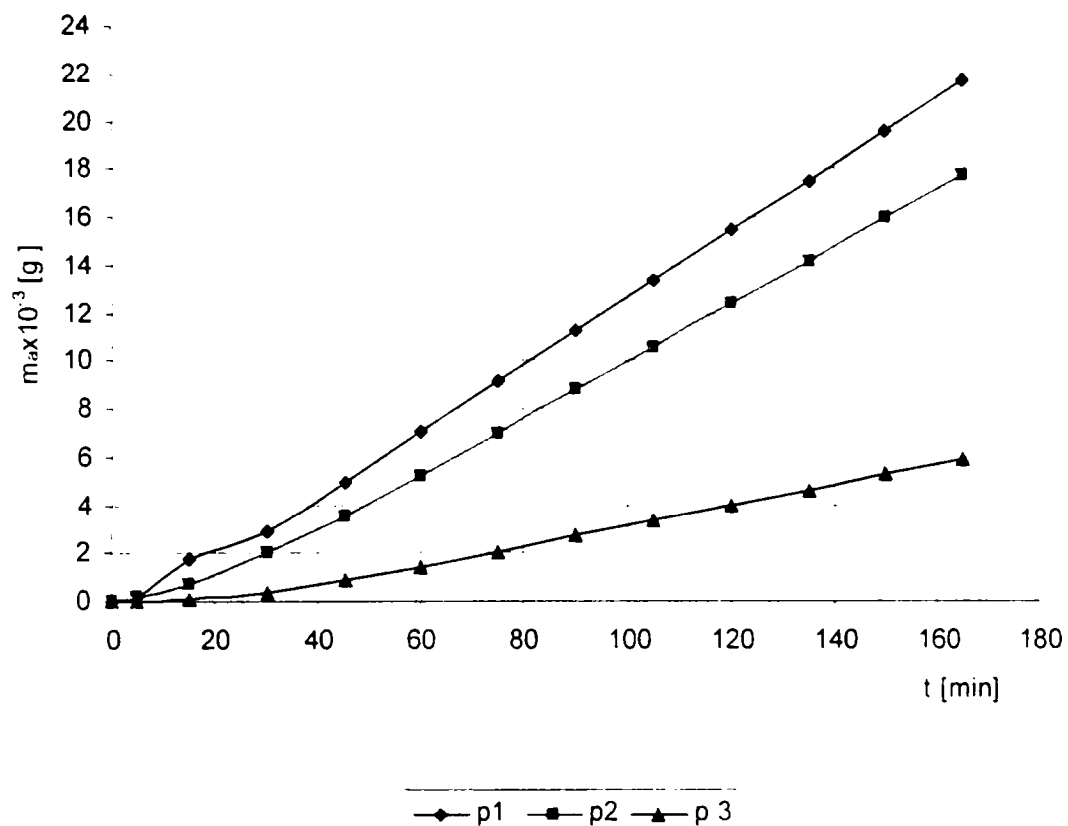


Fig. 3.29

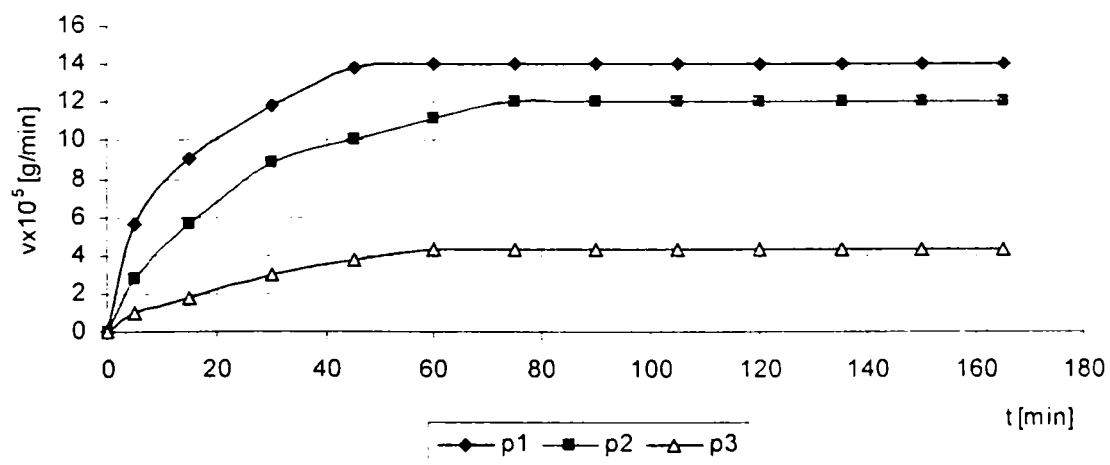


Fig. 3.30

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.26 și Fig. 3.31, 3.32.

Media celor trei probe

Tabel 3.26

Timp [min]	masax10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0,00	0,00	0,00
5,00	0,07	1,50
15,00	0,37	3,00
30,00	1,42	7,00
45,00	2,77	9,00
60,00	4,24	9,82
75,00	5,75	10,10
90,00	7,26	10,10
105,00	8,77	10,10
120,00	10,28	10,10
135,00	11,79	10,10
150,00	13,30	10,10
165,00	14,81	10,10

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.31, 3.32.

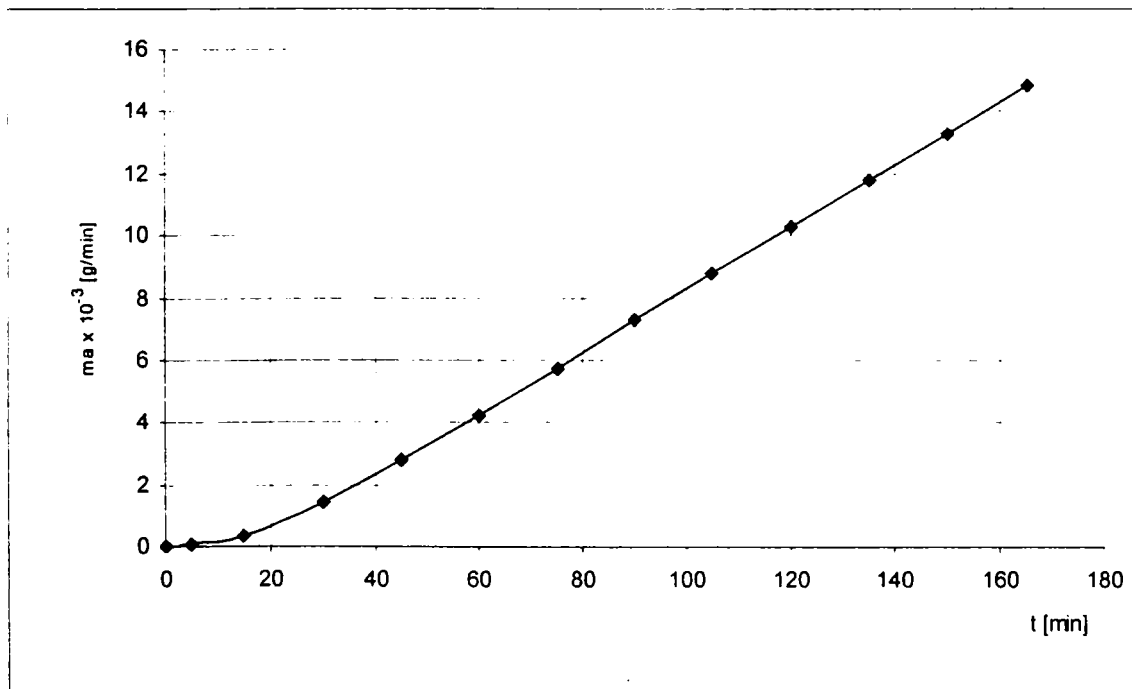


Fig. 3.31

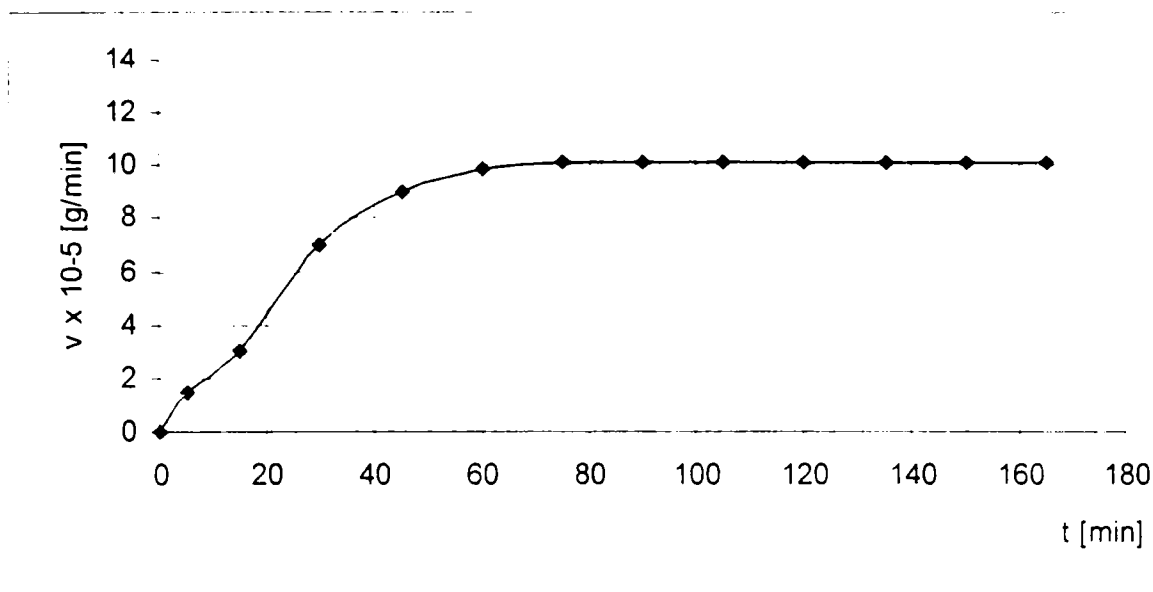


Fig. 3.32

Pe baza datelor din tabelul 3.22 și Fig. 3.27, 3.28 rezultă că oțel austenitic GX4CrNi13-4 supus tratamentului de călire revenire și nitrurare are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 10,10 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 14,81 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.7. ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚELUL GX4CrNi13-4 TRATAT TERMIC PRIN SABLARE ȘI NITRURARE

Regimurile de încercare și aparatura au fost identice cu cele prezentate în subcap., 3.4.1.

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.27 Proba 1 S+N

Timp [min]	Masa x10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,25	5,00
15	1,24	9,90
30	2,77	11,10
45	4,54	11,70
60	6,34	12,00
75	8,14	12,00
90	9,94	12,00
105	11,74	12,00
120	13,54	12,00
135	15,54	12,00
150	17,14	12,00
165	18,94	12,00

Tabel 3.28 Proba 2 S+N

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Vitezax 10^5 [g/min]
0	0	0
5	0,15	3,00
15	0,73	5,80
30	1,93	8,00
45	3,20	9,00
60	4,78	9,60
75	6,28	10,300
90	7,78	10,00
105	9,28	10,00
120	10,78	10,00
135	12,28	10,00
150	13,78	10,00
165	15,28	10,00

Tabel 3.29 Proba 3 S+N

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Vitezax 10^5 [g/min]
0	0	0
5	0,025	0,50
15	0,12	1,00
30	0,30	1,20
45	0,57	1,80
60	0,87	2,00
75	1,17	2,00
90	1,47	2,00
105	1,77	2,00
120	2,07	2,00
135	2,37	2,00
150	2,67	2,00
165	2,97	2,00

Pe baza valorilor din tabelele 3.27, 3.28, 3.29, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.33, 3.34.

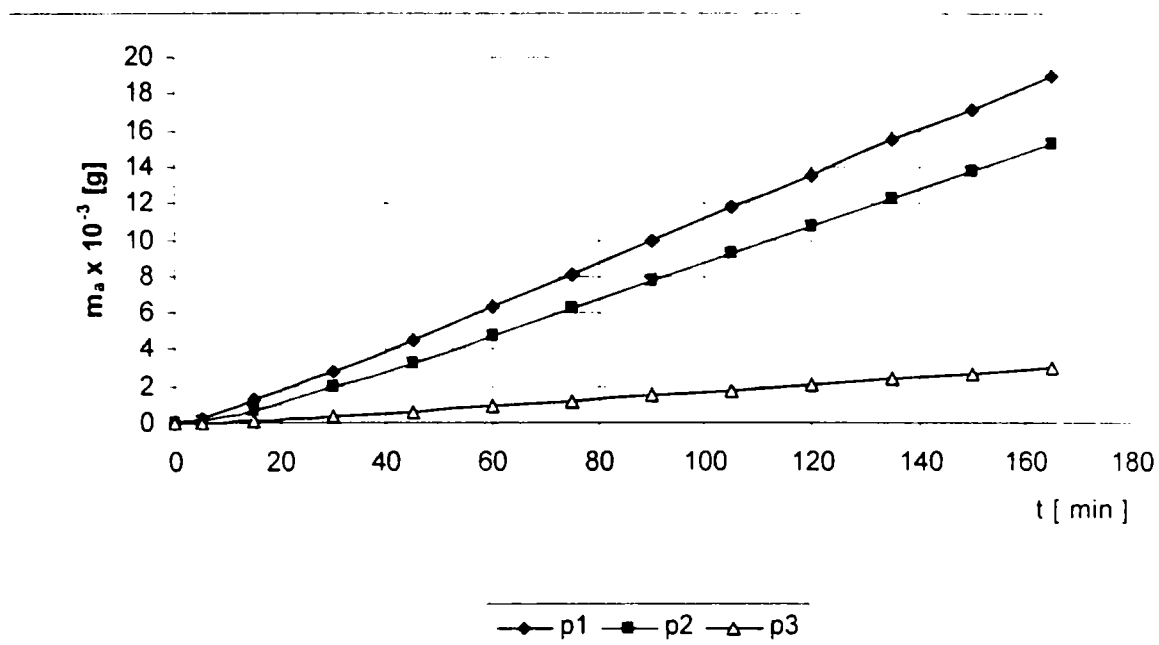


Fig. 3.33

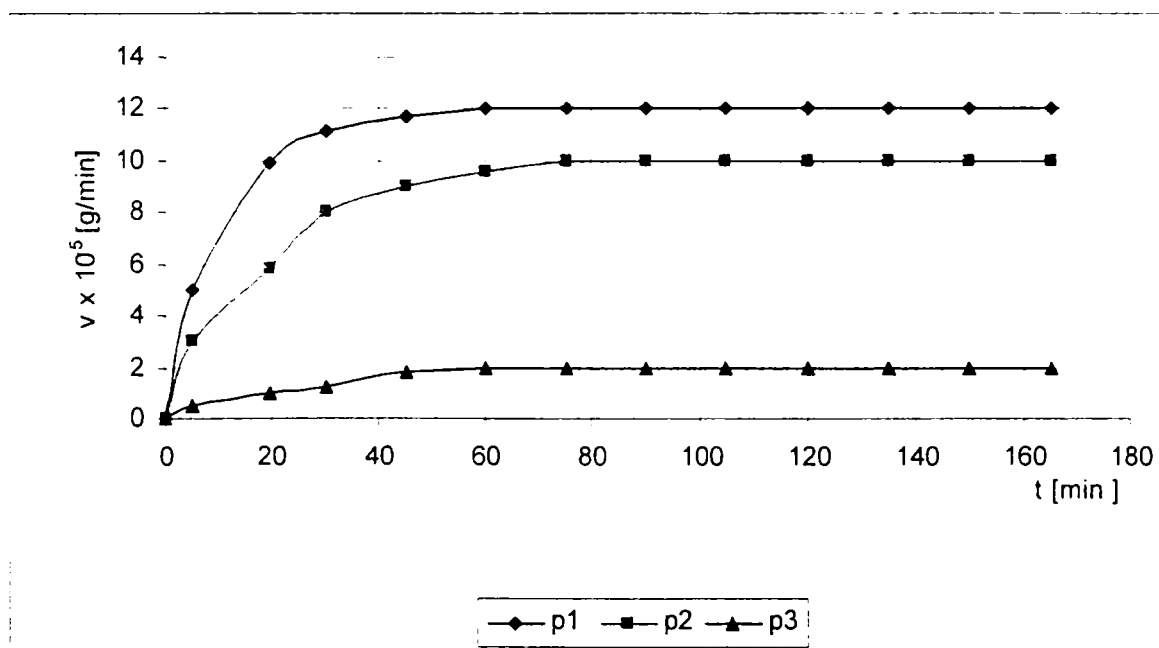


Fig. 3.34

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.30 și Fig. 3.35, 3.36.

Tabel 3.30 Media celor trei probe

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Viteză $\times 10^5$ [g/min]
0	0,00	0,00
5	0,06	1,26
15	0,34	2,82
30	1,22	5,86
45	2,34	7,50
60	3,46	8,00
75	4,66	8,00
90	5,86	8,00
105	7,06	8,00
120	8,80	8,00
135	10,00	8,00
150	11,20	8,00
165	12,40	8,00

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.35, 3.36.

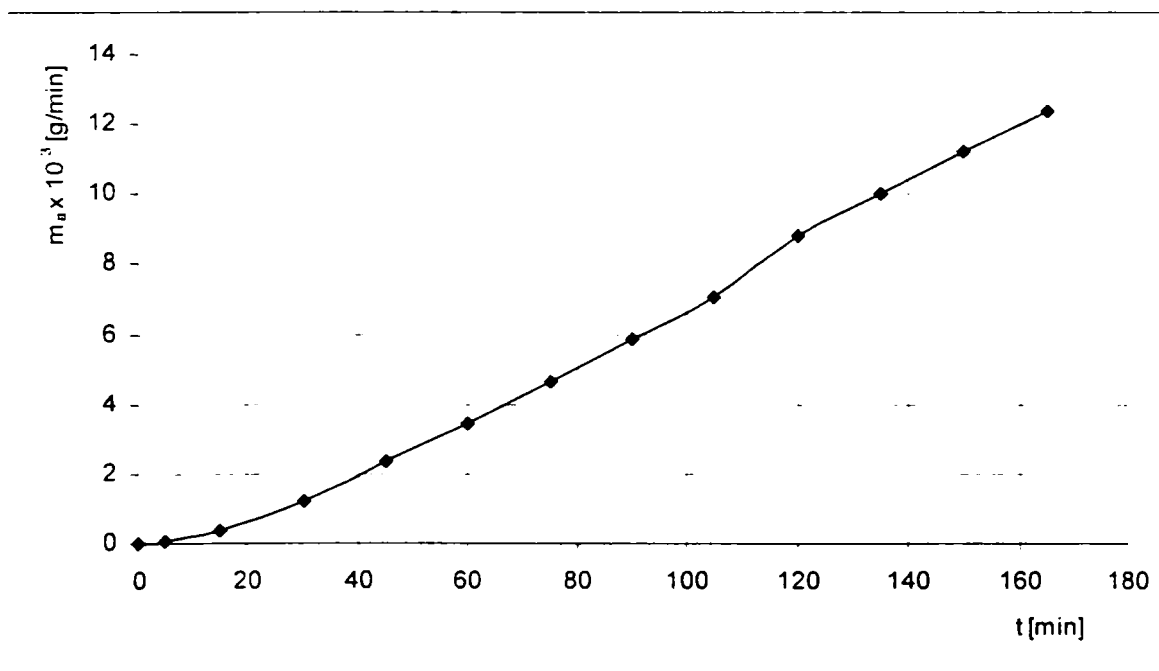


Fig. 3.35

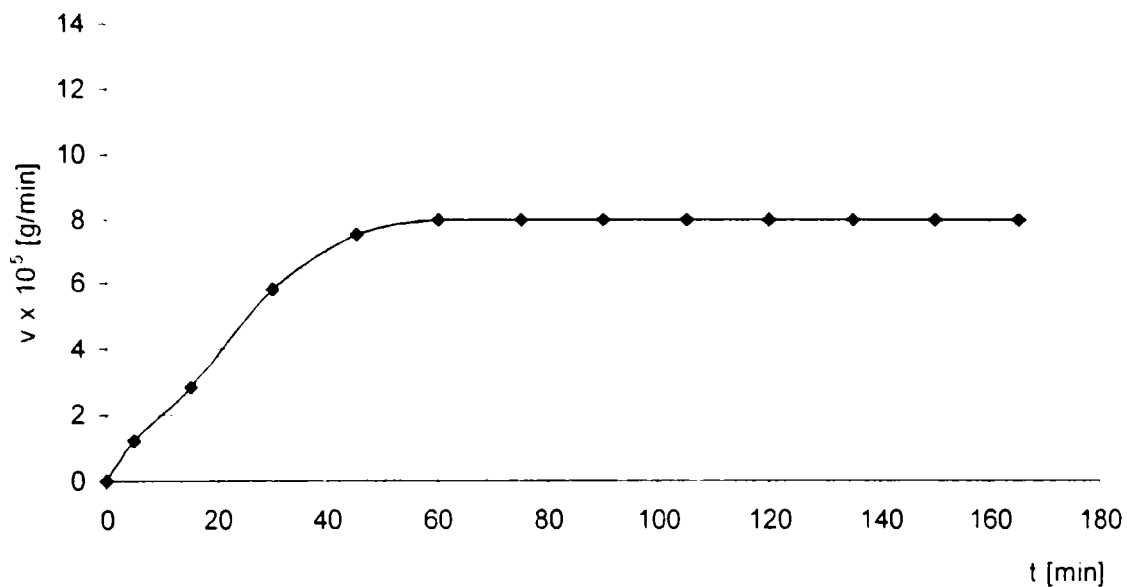


Fig. 3.36

Pe baza datelor din tabelul 3.30 și Fig. 3.35, 3.36 rezultă că oțel martensitic GX4CrNi13-4 supus tratamentului de călire revenire sablare și nitrurare are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 8,00 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 12,401 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

3.4.8. ÎNCERCĂRI LA CAVITAȚIE PE PROBE DIN OȚELUL GX4CrNi13-4 ÎNCĂRCAT PRIN SUDURĂ

Regimurile de încercare și aparatura au fost identice cu cele prezentate în subcap., 3.4.1.

Măsurători privind masa erodată și viteza de eroziune cavitațională pe trei probe

Tabel 3.31 Proba 1-S

Timp [min]	Masa x10 ³ [g]	Vitezax10 ⁵ [g/min]
0	0	0
5	0,24	4,80
20	1,06	8,20
30	2,74	11,20
45	4,72	13,60
60	6,76	13,60
75	8,80	13,60
90	10,84	13,60
105	12,88	13,60
120	14,92	13,60
135	16,96	13,60
150	19,00	13,60
165	21,04	13,60

Tabel 3.32 Proba 2-S

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Vitezax 10^5 [g/min]
0	0	0
5	0,05	1,00
20	0,27	2,20
30	0,88	4,10
45	1,63	5,00
60	2,38	5,00
75	3,13	5,00
90	3,88	5,00
105	4,63	5,00
120	5,38	5,00
135	6,13	5,00
150	6,88	5,00
165	7,63	5,00

Tabel 3.33 Proba 3-S

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Vitezax 10^5 [g/min]
0	0	0
5	0,02	0,50
20	0,14	1,20
30	0,50	2,40
45	0,95	3,00
60	1,40	3,00
75	1,85	3,00
90	2,30	3,00
105	2,75	3,00
120	3,20	3,00
135	3,65	3,00
150	4,10	3,00
165	4,55	3,00

Pe baza valorilor din tabelele 3.31, 3.32, 3.3, s-au trasat dependențele $m_a(t)$ și $v(t)$, Fig. 3.37, 3.38.

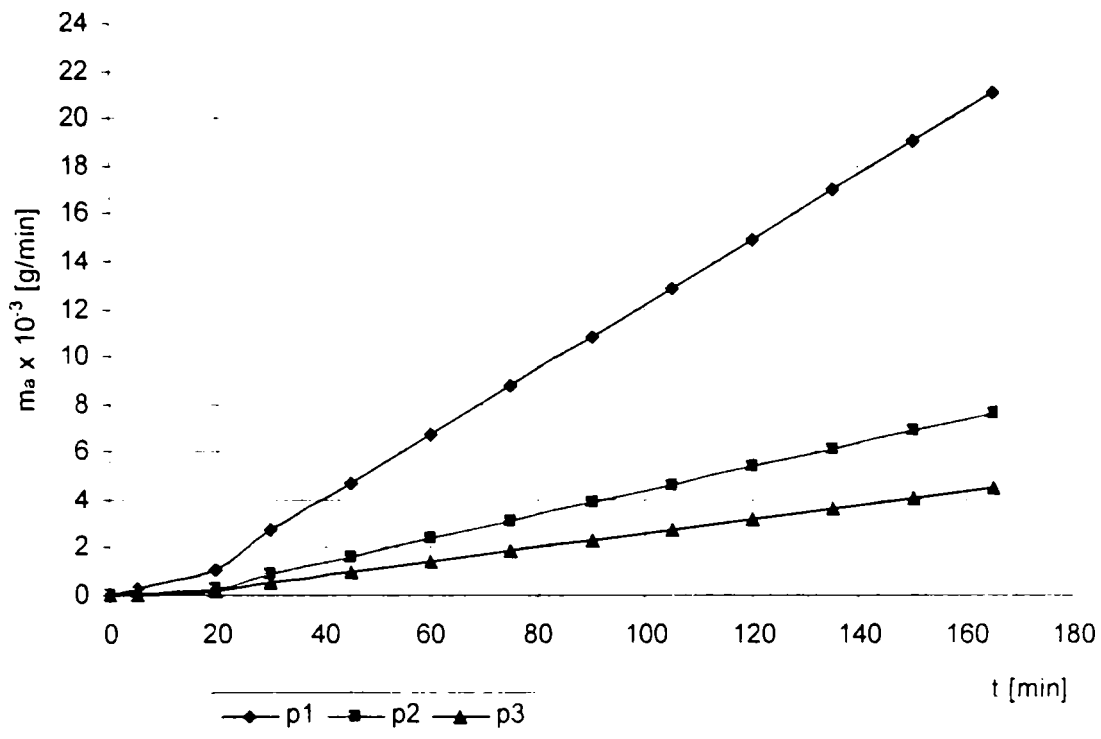


Fig. 3.37

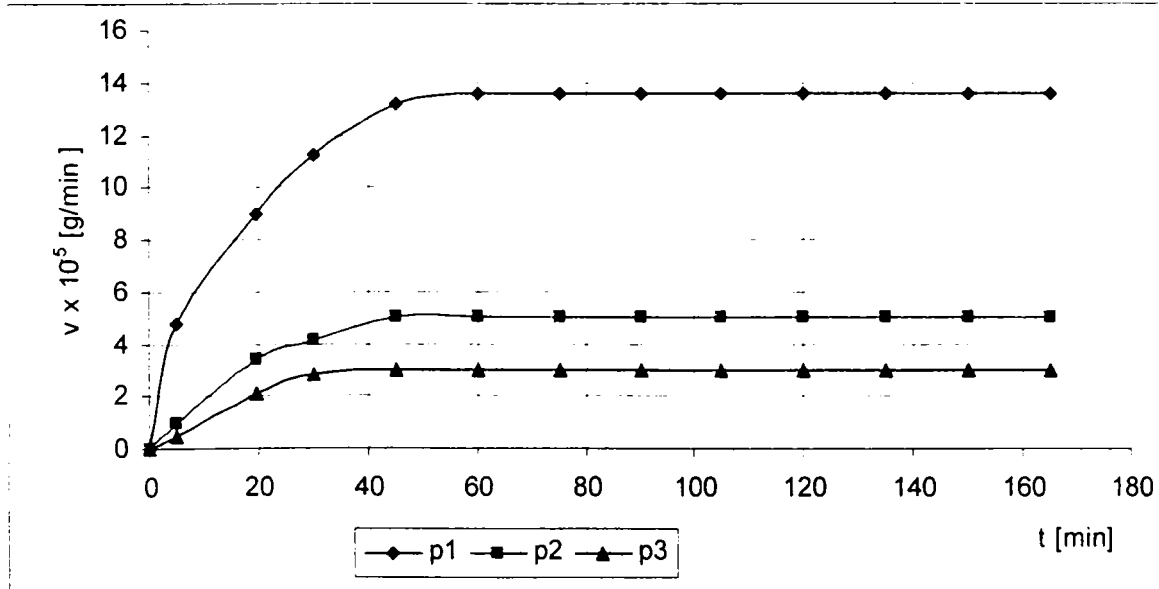


Fig. 3.38

Prelucrarea rezultatelor celor trei probe supuse la cavitație conduce la valorile medii indicate în tabelul 3.34 și Fig. 3.39, 3.40.

MEDIA CELOR TREI PROBE

Tabel 3.34

Timp [min]	Masa $\times 10^3$ [g]	Vitezax 10^5 [g/min]
0	0,00	0,00
5	0,10	1,50
15	0,37	3,12
30	1,24	6,45
45	2,41	7,14
60	3,49	7,20
75	4,50	7,20
90	5,58	7,20
105	6,71	7,20
120	7,79	7,20
135	8,87	7,20
150	9,95	7,20
165	11,03	7,20

Curbele de variație ale masei erodate $m_a(t)$ și a vitezei de eroziune cavitațională $v(t)$ sunt reprezentate ca valori medii în Fig. 3.39, 3.40.

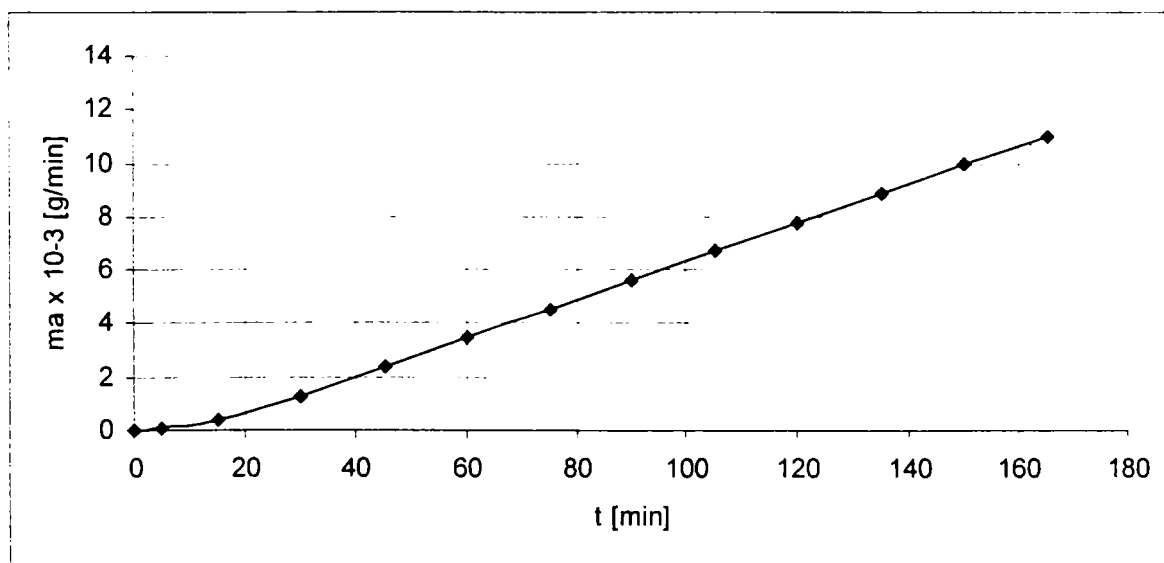


Fig. 3.39

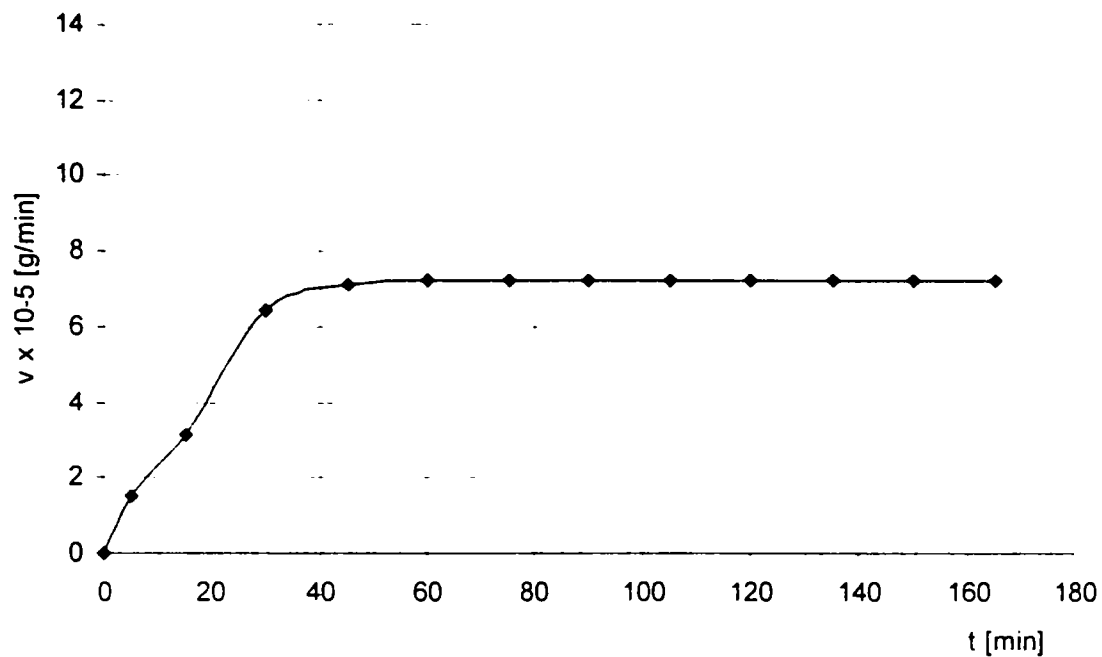


Fig.3.40

Pe baza datelor din tabelul 3.30 și Fig. 3.35, 3.36 rezultă că oțelul GX4CrNi13-4 supus tratamentului de călire revenire încărcat prin sudare are caracteristicile cavitaționale în zona de stabilizare $v_s = 7,20 \times 10^{-5}$ [g/min] și $m_a = 11.03 \times 10^{-3}$ [g] după 165 min. de atac cavitațional.

**3.4.9 COMPARAREA VITEZEI DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ
 $v_s = \text{const.}$ ÎN ZONA DE STABILIZARE ȘI A MASEI DE MATERIAL
 ERODAT $-m_a$, DUPĂ 165 minute DE ATAC CAVITAȚIONAL
 PENTRU DIFERITE MĂRCI DE OȚELURI**

Table 3.35 OȚEL AUSTENITIC-GX5CrNi19-10

STARE	$m_a \times 10^3 <g>$	$V_s \times 10^5 <g/min>$
CS	18,26	13,50
NITRURAT	12,99	9,20
SABLAT+NITRURAT	11,74	8,10
ZIT(SUDAT)	6,70	5,00

Table 3.36 OȚEL MARTENSITIC-GX4CrNi13-4

STARE	$m_a \times 10^3 <g>$	$V_s \times 10^5 <g/min>$
CĂLIT+REVENIT	17,63	12,50
NITRURAT	14,81	10,10
SABLAT+NITRURAT	12,40	8,00
ZIT(SUDAT)	11,03	7,20

OȚELURI CU BUNĂ REZISTENȚĂ LA EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ

Table 3.37

MARCĂ OȚEL	$m_a \times 10^3 <g>$	$V_s \times 10^5 <g/min>$
40Cr10	51.00	35.00
GX5 CrNiMo13-6-1	33.24	22.00
T07CuMoMnNiCr165-Nb	20.67	13.60
T09CuMoMnNiCr185-Ti.	22.77	15.00

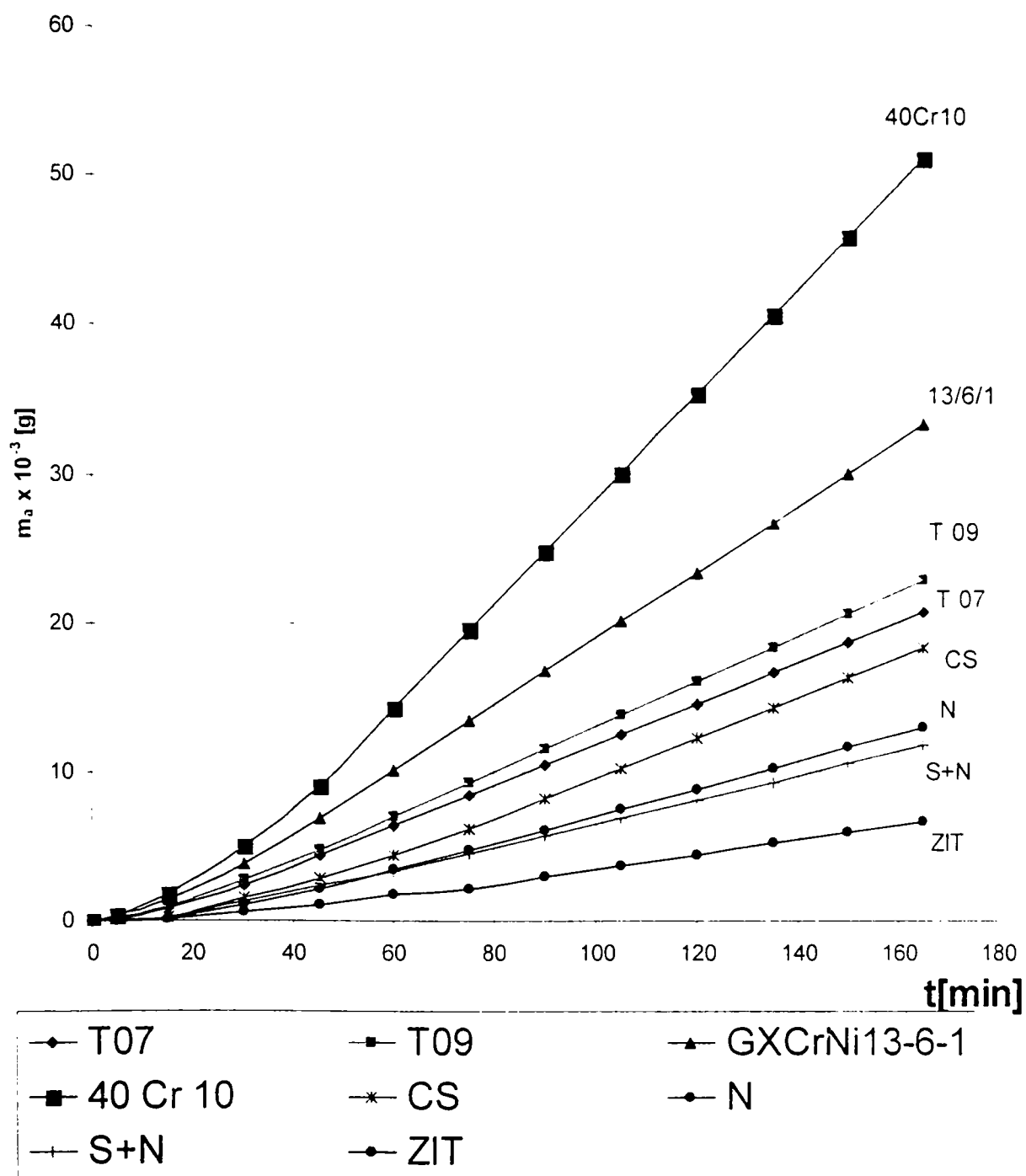


Fig.3.41

AUSTENITIC-GX5CrNi19-10

COMPARAREA MASELOR ERODATE DUPĂ 165 min.

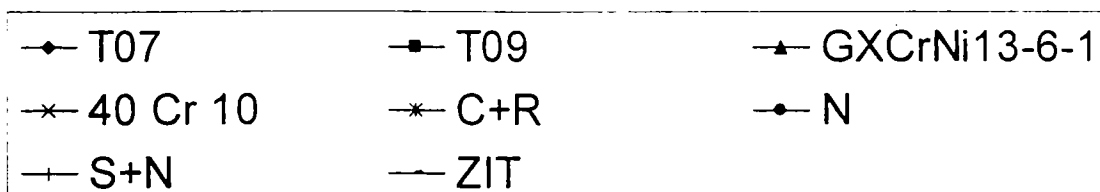
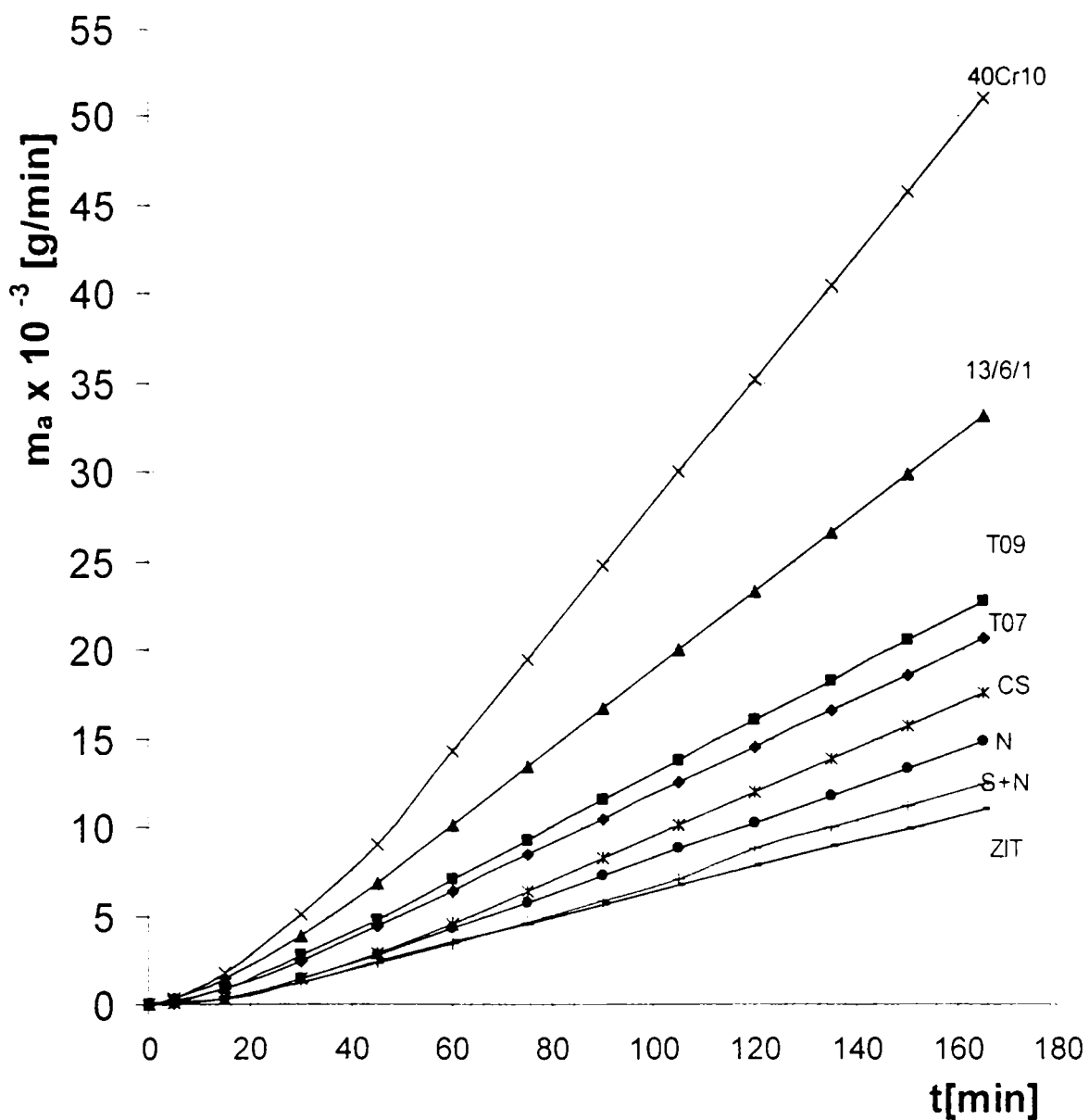


Fig.3.42

MARTENSITIC-GX4CrNi13-4

COMPARAREA MASELOR ERODATE DUPĂ 165 min.

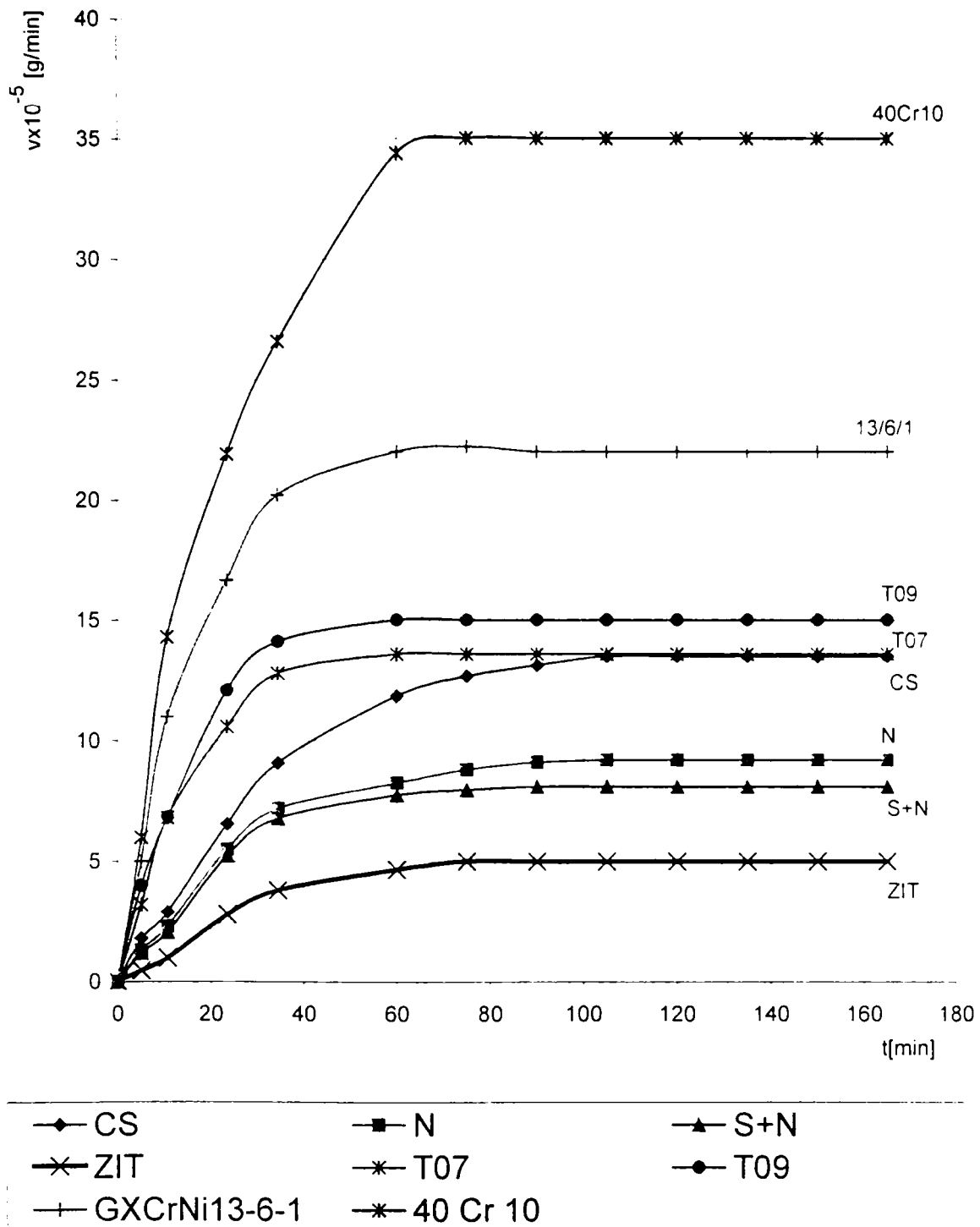


Fig.3.43

AUSTENITIC-GX5CrNi19-10

Compararea vitezelor de eroziune cavitațională

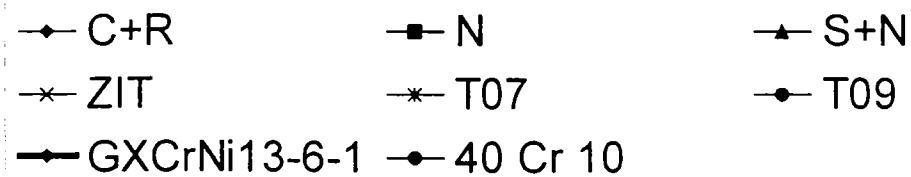
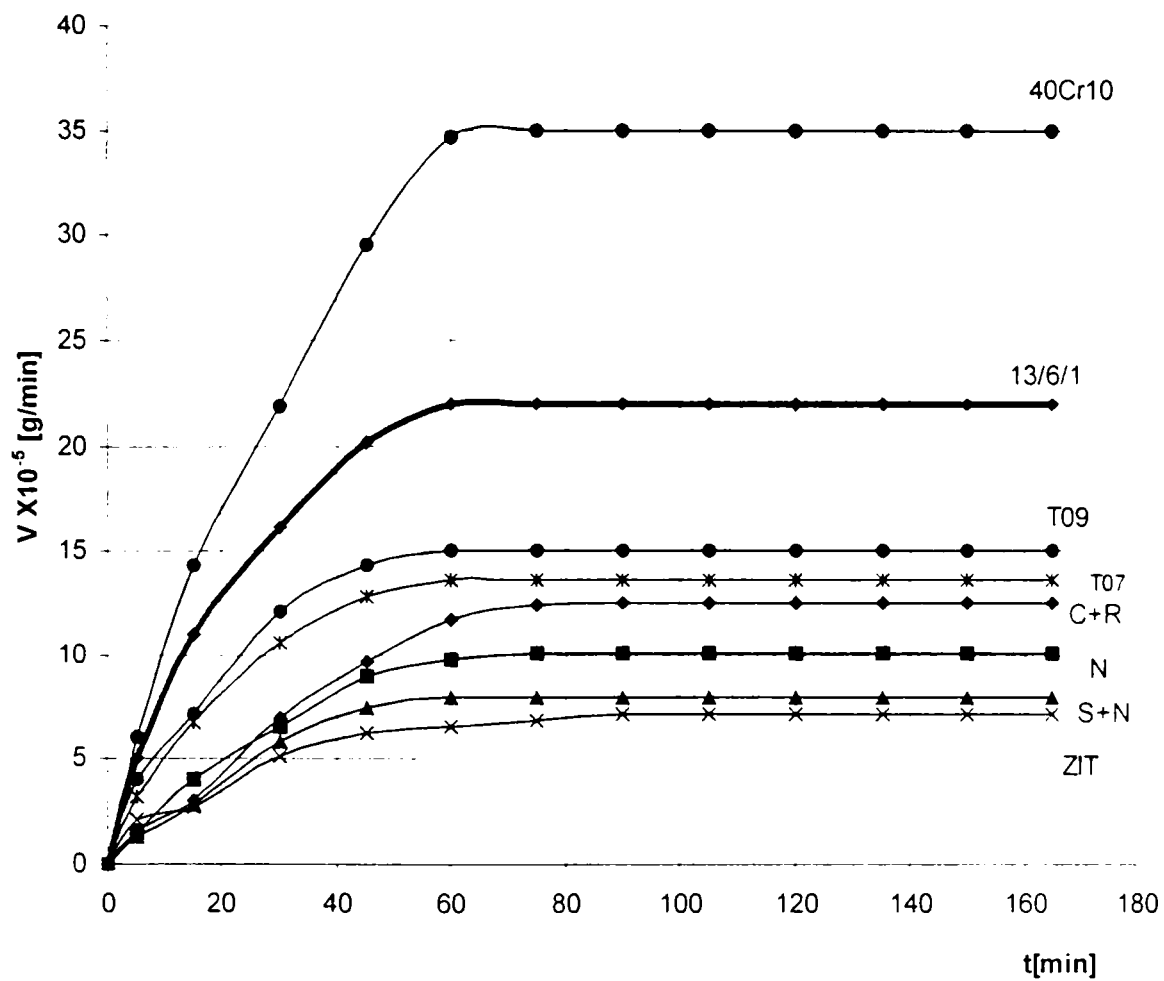


Fig.3.44

MARTENSITIC-GX4CrNi13-4

Compararea vitezelor de eroziune cavitațională

CONCLUZII PARȚIALE

Analizând valorile indicate în **tabelele 3.35, 3.36, 3.37** pentru diverse oțeluri încercate cavitațional în laborator se constată următoarele:

- Oțelurile austenitice **GX5CrNi19-10** au cea mai bună rezistență la cavitație în stare tratată termic prin călire de punere în soluție, sablare și nitrurare gazoasă.
- Oțelurile martensitice **GX4CrNi13-4** au cea mai bună rezistență la eroziune cavitațională în stare de tratament termic de călire volumică, revenire, sablare și nitrurare gazoasă.
- Față de oțelurile din aceeași clasă - **inoxidabile**, cele 2 oțeluri au rezistența cavitațională superioară.
- S-a comparat comportarea la cavitație a oțelului austenitic **GX5CrNi 19-10** tratat în diferite variante termice cu oțelurile **T07CuMoMnNiCr165-Nb** și **T09CuMoMnNiCr185-Ti** și se constată că se comportă mai bine la atac cavitațional.
- Oțelul martensitic **GX4CrNi13-4** are calități superioare de rezistență la cavitație față de oțelul **GX5CrNi13-6-1**.
- Oțelurile inoxidabile austenitice sau martensitice au o rezistență superioară la cavitație față de oțelurile aliate de construcție - **40Cr10** folosite în fabricarea unor componente ale mașinilor hidraulice.

Apare evident faptul rezistența la eroziune cavitațională a oțelurilor inoxidabile fie austenitice, fie martensitice este mult mai bună dacă se aplică, tratamentul complex de călire de punere în soluție respectiv călire/revenire urmate de sablare și nitrurare gazoasă.

Această variantă va trebui analizată și din punct de vedere economic pentru a i se stabili indicele de economicitate.

În cazul reparării prin sudură a zonelor deteriorate prin cavitație s-a demonstrat prin încercări de laborator, că procedeul și regimul de sudare folosit este corespunzător iar materialele folosite la încărcare, fie pentru stratul tampon fie pentru stratul anticavitațional, prezintă o rezistență la cavitație deosebit de ridicată în zona de influență a sudării-ZIT.

Din literatura consultată nu am găsit efectuate încercări la cavitație, din zone astfel influențate termic în urma reparării prin sudură a defectelor cauzate de cavitație.

Cercetările făcute privind rezistența la cavitație în zona influențată termic a reparării prin sudură constituie o **contribuție personală** la stabilirea unor tehnologii de reparare prin sudare și de analiză a rezistenței cavitaționale a acestor zone.

3.5 ANALIZA METALOGRAFICĂ A PROBELOR ERODATE CAVITAȚIONAL

3.5.1 Analiza macroscopică a probelor încercate la cavitație.

Probele încercate la cavitație au fost analizate macroscopic folosind un stereo microscopic la diverse grosismente.

Analiza macroscopică a probelor din oțelul austenitic GXCrNi19-10 este evidențiată în **PLANȘA I** (după 165min. de atac cavitațional).



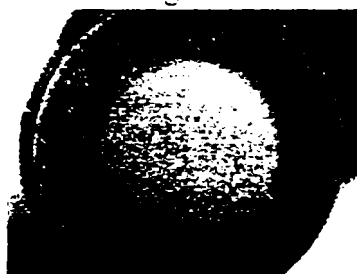
A-C S MO 10X

Fig. 1



MO 20X

Fig. 1a



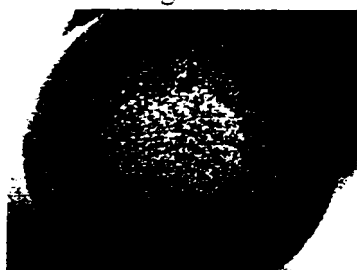
A-CS+N MO 10X

Fig. 2



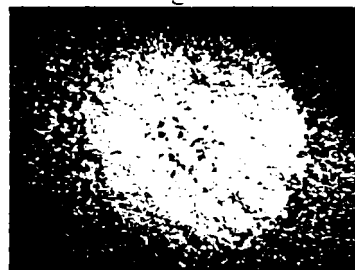
MO 20X

Fig. 2a



A-CS+S+N MO 10X

Fig. 3



MO 20X

Fig. 3a



A-CS+ZIT MO 10X

Fig. 4



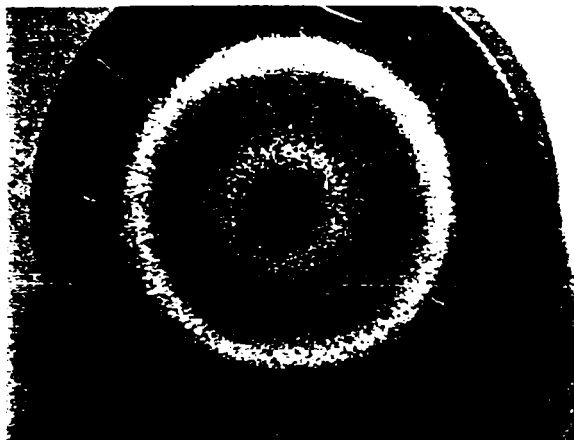
MO 20X

Fig. 4a

PLANȘA I –OȚEL AUSTENITIC GX5CrNi19-10

PLANȘA I - continuare

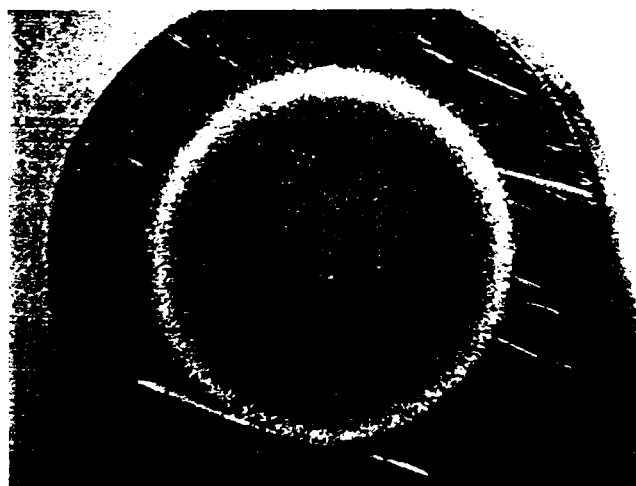
OȚEL AUSTENITIC - C S
(după 75, 120, 165 min. de atac cavitațional)



75 min MO10X
Fig. 1.b



120 min MO10X
Fig.1.c



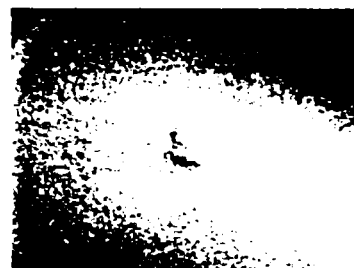
165 min MO 10X
Fig.1.d

Analiza macroscopică a probelor din oțelul martensitic GXCrNi13-4 este evidențiată în **PLANȘA II.** (după 165min. de atac cavitațional)



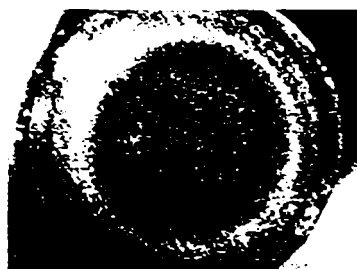
M - C +R MO 10X

Fig. 1



MO 20X

Fig. 1a



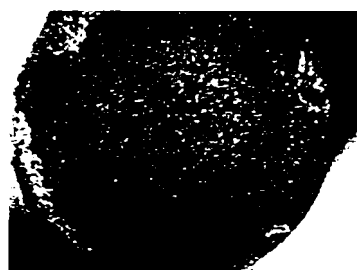
M - C +R + N MO 10X

Fig. 2



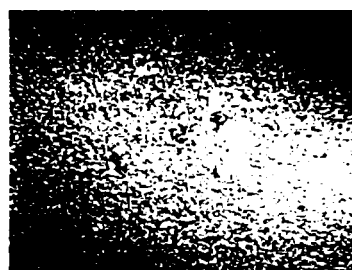
MO 20X

Fig. 2a



M - C +S+N MO 10X

Fig. 3



MO 20X

Fig. 3a



M - C +R + ZIT MO 10X

Fig. 4



MO 20X

Fig. 4a

PLANȘA II- OȚEL MARTENSITIC GX4CrNi13-4

CS- CĂLIRE DE PUNERE ÎN SOLUȚIE

C+R- CĂLIT+REVENIT

N- NITRURAT

S+N- SABLAT SI NITRURAT

ZIT- ZONA INFLUENȚATĂ TERMIC

I). Analiza macroscopică a probelor încercate la cavitație din oțelul austenitic GX5CrNi19-10 scoate în evidență următoarele aspecte:

- O zonă centrală puternic erodată cavitațional în care se evidențiază și apariții de microfisuri
- În jurul zonei centrale apare o zonă mai puțin erodată (de culoare deschisă)
- O a treia zonă apare cu erodări puternice și chiar cu microfisuri
- O a patra zonă este mai puțin atacată cavitațional

Aceste detalii apar clar la toate probele tratate în diferite variante tehnologice conform paragrafului 2.4.1 din cap.2

Imaginile structurale evidențiază mai pregnant aceste zone - **PLANȘA I** din **fig. 1b, 1c, 1d.**

Apare evident faptul că datorită acțiunii complexe a presiunilor de impact, a oscilațiilor termice și a modificării rezistenței electrochimice se produce eroziunea cavitațională a oțelului respectiv.

Analiza macroscopică evidențiază faptul că tratamentul termic de călire de punere în soluție urmat de sablare și nitrurare, conferă o rezistență cavitațională sporită.

Comportarea cavitațională a zidului pe probelor sudate este net superioară comparativ cu celelalte variante tehnologice. Apar mai puține microfisuri și o mai mică pătrundere în adâncime.

II). Analiza macroscopică a probelor din oțelul martensitic GXCrNi13-4 tratat în diferite variante tehnologice (Cap.2.4.2) scoate în evidență următoarele aspecte caracteristice:

- apariția de microfisuri în zona centrală - (**Planșa II, fig. 1 și 1 a.**)
- fisuri centrale și microdesprinderi de grăunți - (**Planșa II, fig. 2 și 2 a.**)
- microfisuri fine în zona centrală și desprinderi de microgrăunți - (**Planșa II, fig. 3 și 3 a.**)
- o zonă centrală puternic atacată cu desprinderi de microgrăunți și crearea de porozități - (**Planșa II, fig. 4 și 4 a.**)

Și în această situație probele tratate prin călire urmată de sablare și nitrurare gazoasă atestă o ridicată rezistență la eroziune cavitațională.

La probele sudate în zona influențată termic datorită stratului tampon și a straturilor anticavitaționale apare un atac cavitațional similar cu cel constatat macroscopic la oțelul inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10.

Apariția microfisurilor în zona centrală și desprinderea de microgrăunți este direct influențată de varianta tehnologică de tratament aplicat.

3.5.2 Pregătirea și atacul probelor metalografice

Probele încercate la cavitație aflate sub stare de tratament termic în diferite variante tehnologice au fost secționare pe generatoare și au fost înglobate pentru cercetare metalografică.

Pentru fiecare probă s-a făcut înglobarea celor 2 jumătăți folosind material de înglobare cu inel de plastic -fig. 3.45.

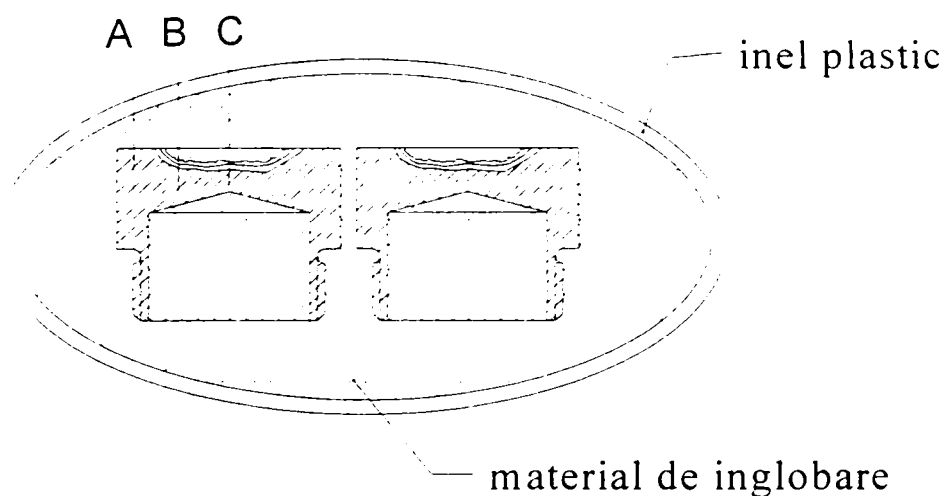


Fig. 3.45

Probele înglobate au fost supuse prelucrării metalografice în conformitate cu prevederile STAS 4003-74 [rrr] și SR 5000 97 [130]. S-a folosit pastă de diamant de 3 și 2 μm .

Atacul metalografic s-a realizat soluție de acid clorhidric și acid azotic (39 ml H₂O 52 ml HCl și 9 ml acid azotic) Atacul s-a făcut la temperatura ambiantă în timp de 10-30 sec.

Probele astfel pregătite și atacate metalografic au fost investigate prin microscopie optică la un microscop Neofot dotat cu cameră de fotografiere.

Investigația metalografică s-a realizat în următoarele zone ale probei metalografice : FIG. 3.46, zonele A, B1, B2.

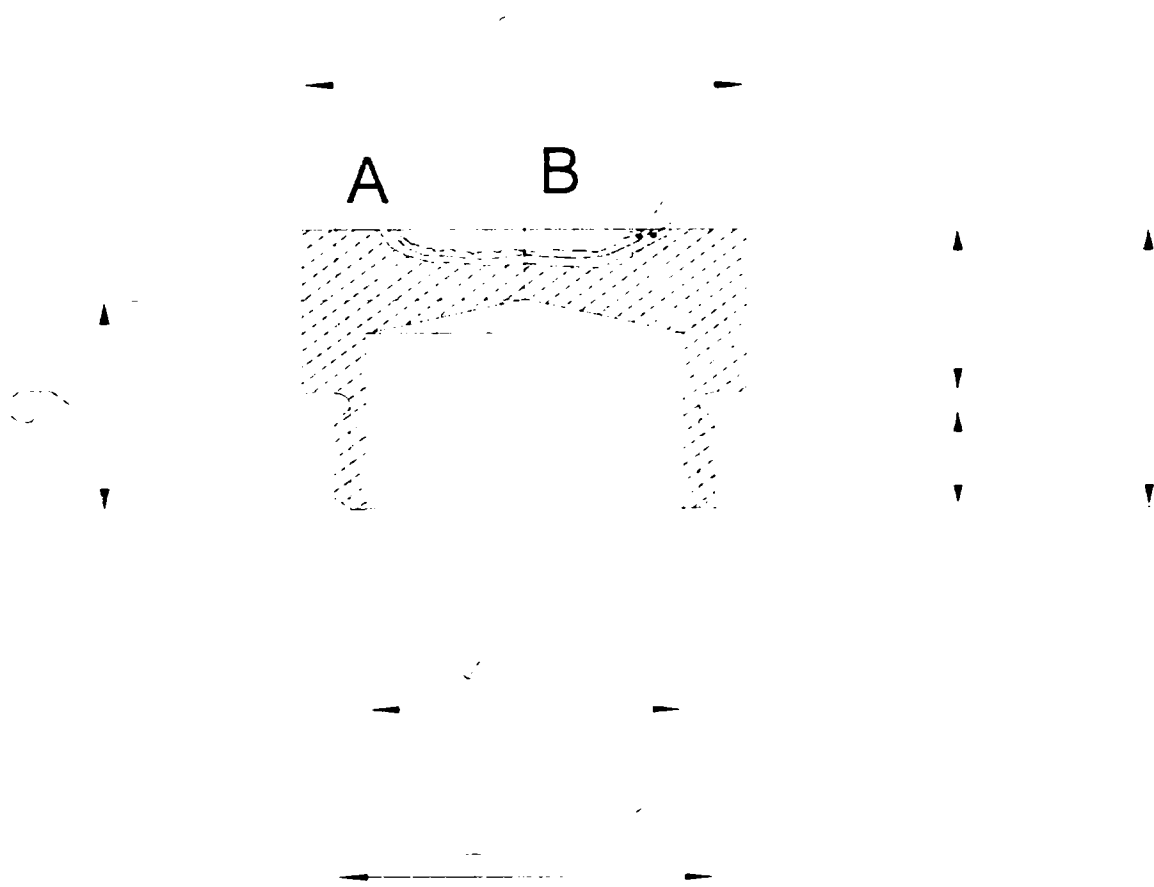


Fig. 3.46

3.5.3. STRUCTURA PROBELOR ÎNCERCATE LA CAVITAȚIE

3.5.3.1 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX5CrNi 19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție

Structura probelor din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție este prezentată în **PLANȘA 1, Fig. 1, 2, 3, 4.**

Probele de cavitație din oțelul GX5CrNi19-10, tratate termic prin călire de punere în soluție prezintă o structură austenitică cu unii grăunții maciați. Structura este omogenă și are granulația G=6, conform normelor ASTM, **Planșa 1 Figura 1 Zona A.**

Această structură este corespunzătoare tratamentului termic de călire de punere în soluție aplicat oțelului.



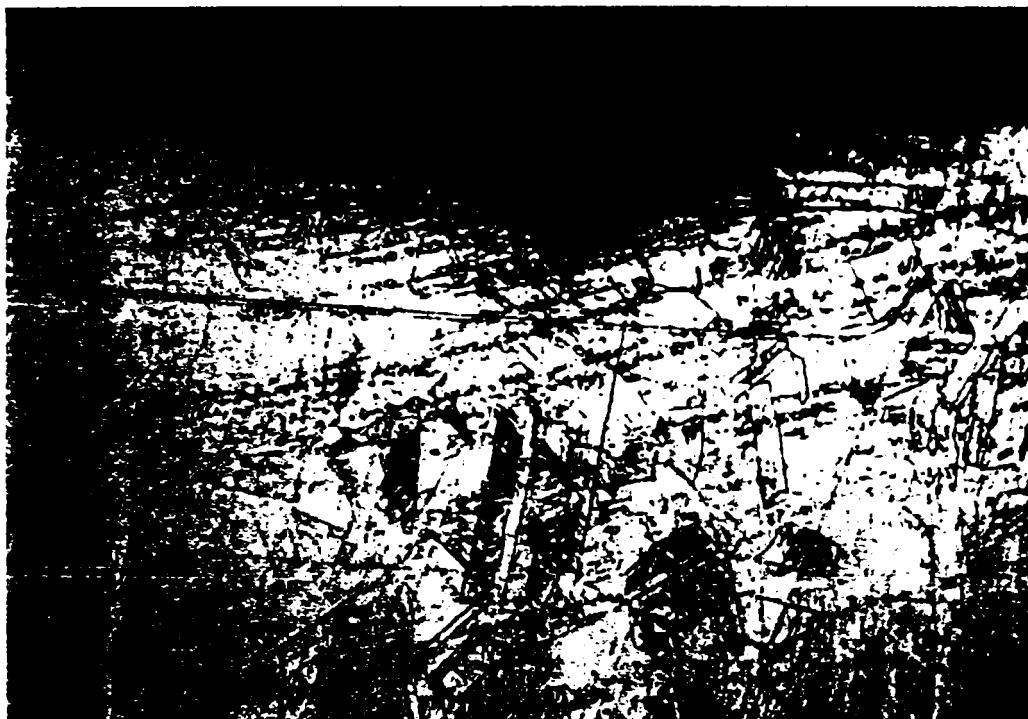
(CS)- Planșa 1 Figura 1 Zona A MO 100X

În zona distrusă prin cavitație apar următoarele modificări de formă și de structură:

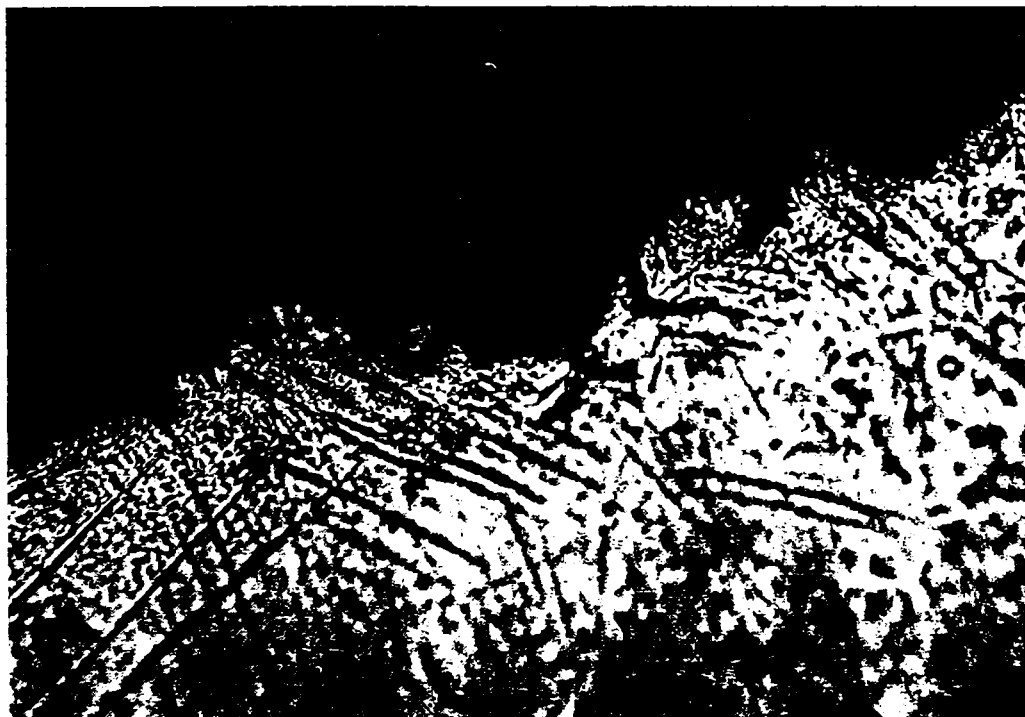
În zona B₁, B₂ apar microfisuri la limitele de grăunți, desprinderi de grăunți și expulzarea lor.

Se remarcă o finisare a granulației și precipitării de carburi complexe la limita și în interiorul grăunților austenitici.

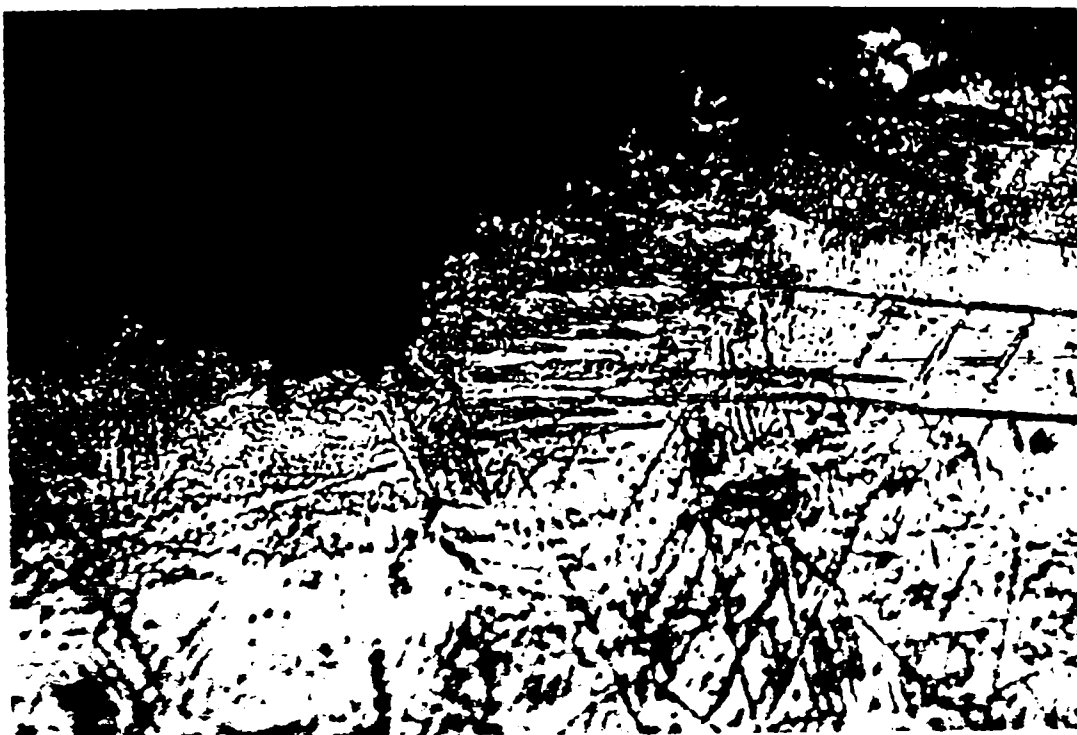
Zona afectată are grosimi variabile și este cuprinsă între 2-20 μm **Planșa 1 fig. 3, 4 zona B1, B2.**



(CS) - Planșa 1 Figura 2 Zona B₁ MO 100X



(CS) - Planșa 1 Figura 3 Zona B₂ MO 500X



(CS) - Planșa 1 Figura 4 Zona B₂ MO 500X

3.5.3.2. Structura probelor din oțel austenitic GX5CrNi19-10, tratate termic prin călire de punere în soluție și nitrurare gazoasă

Structura probelor din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție și nitrurare gazoasă este prezentată în **PLANȘA 2, Fig. 1, 2, 3, 4, 5.**

Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1.

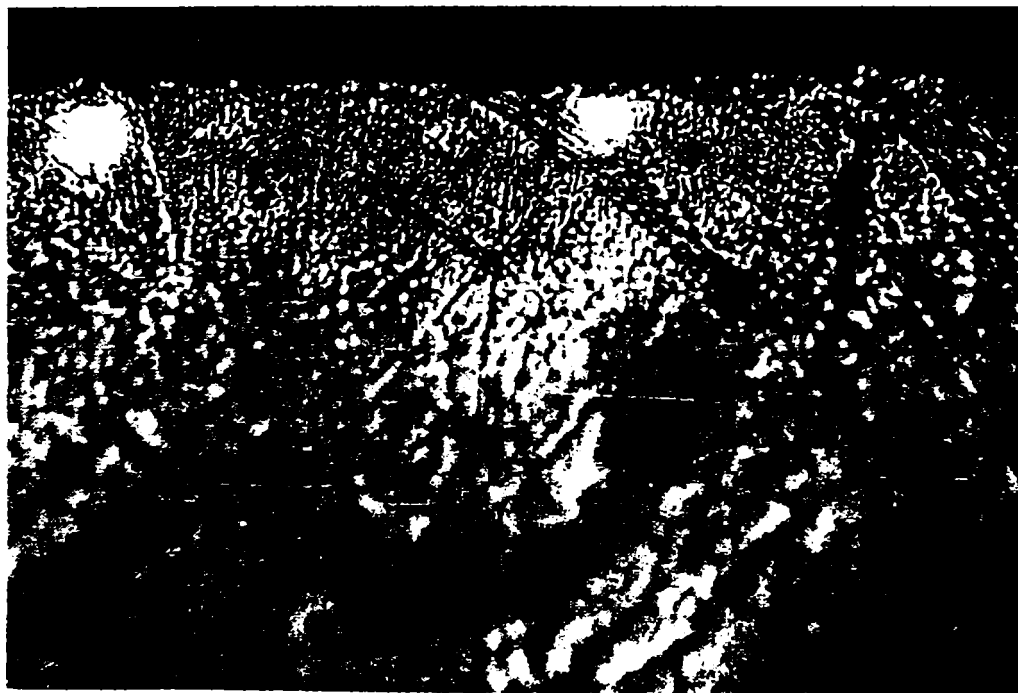
Stratul nitrurat are grosime mică, sub 0,1 mm și conține nitruri ale elementelor de aliere: **-PLANȘA 2 Fig. 1, 2.**

Stratul de tranziție este format din nitruri precipitate în grăunții austenitici- **PLANȘA 2-Fig.2.**

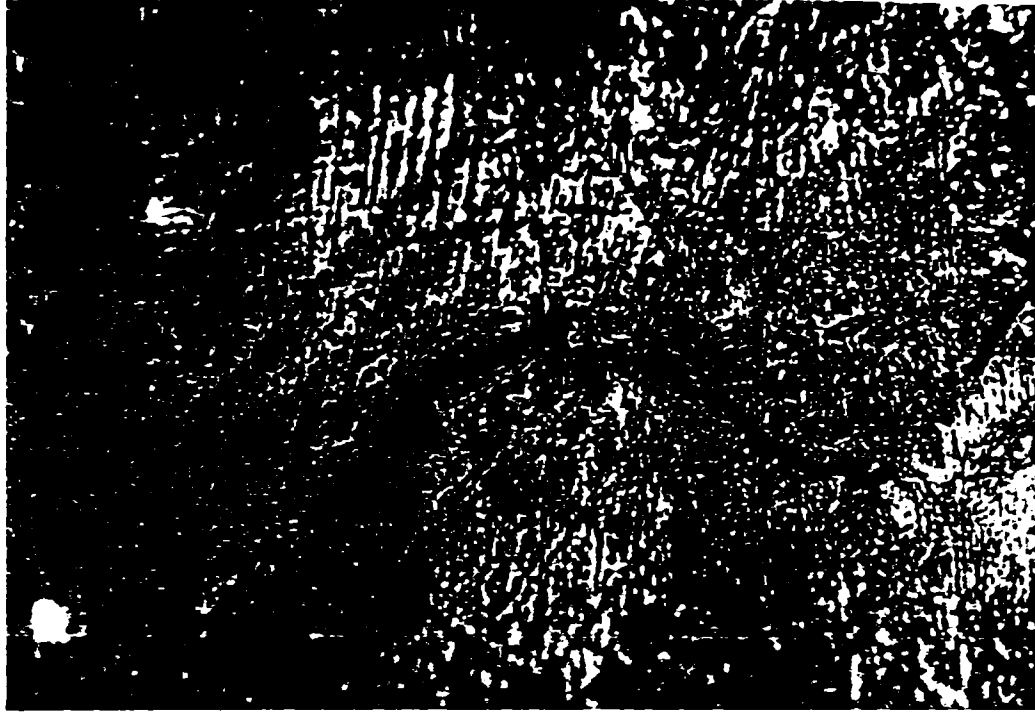
Probele supuse cavitației prezintă microfisuri, topiri zonale și desprinderi ale grăunților în care se află nitruri - **PLANȘA 2-Fig. 3, 4, 5.**

Prin distrugerea cavitațională datorită tensiunilor create și a temperaturilor momentane mari, de lucru, se produc precipitări de carburi în grăunții austenitici.

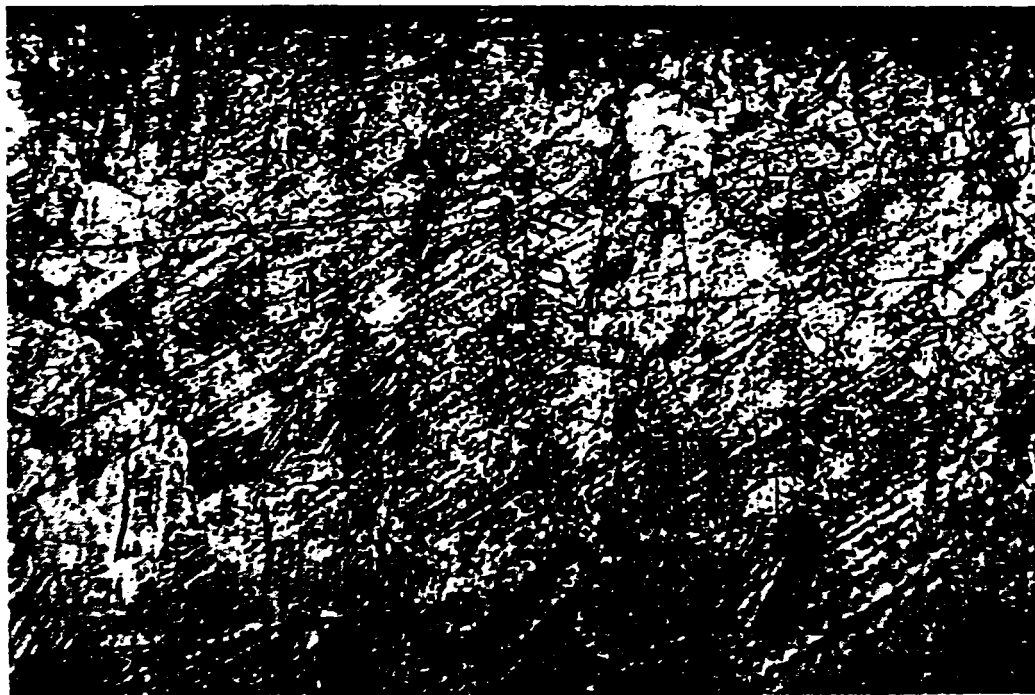
Duritatea mare a stratului nitrurat conferă o rezistență mărită la eroziune cavitațională.



(CS+N)- Planșa 2 Figura 1 Zona A MO 500X



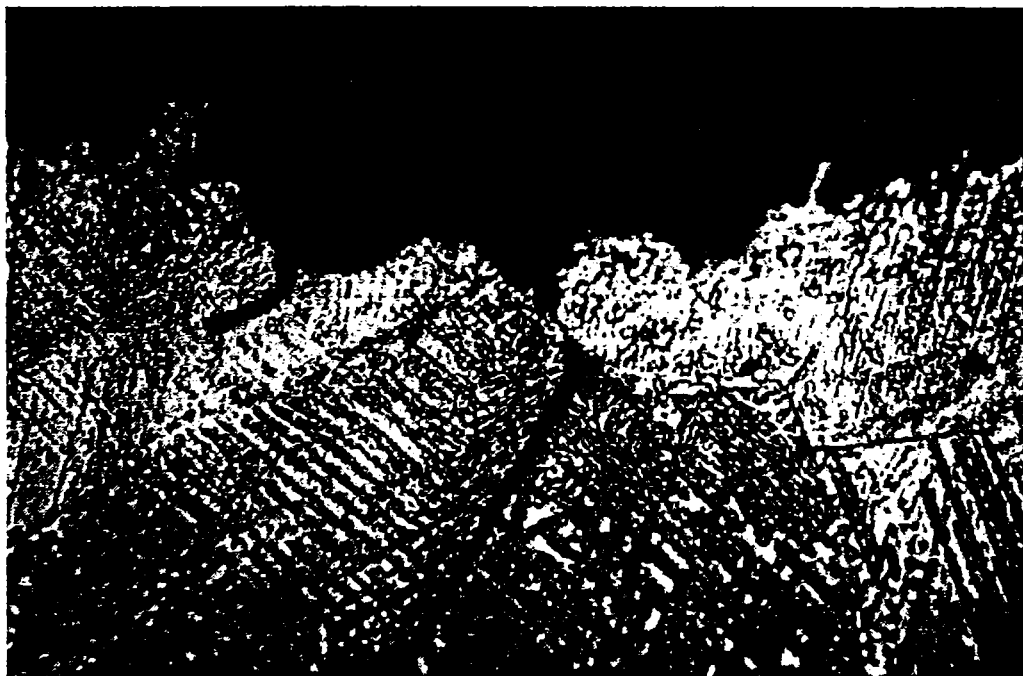
(CS+N) - Planșa 2 Figura 2 Zona A MO 500X



(CS+N) - Planșa 2 Figura 3 Zona B₁ MO 100X



(CS+N)- Planșa 2 Figura 4 Zona B₁ MO 500X



(CS+N)- Planșa 2 Figura 5 Zona B₂ MO 500X

3.5.3.3. Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție sablare și nitrurare

Structura probelor din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție, sablare și nitrurare gazoasă este prezentată în **PLANȘA 3, Fig.1,2,3.**

Din analiza metalografică a probelor încercate la cavitație după un timp de 165 min se evidențiază următoarele aspecte:

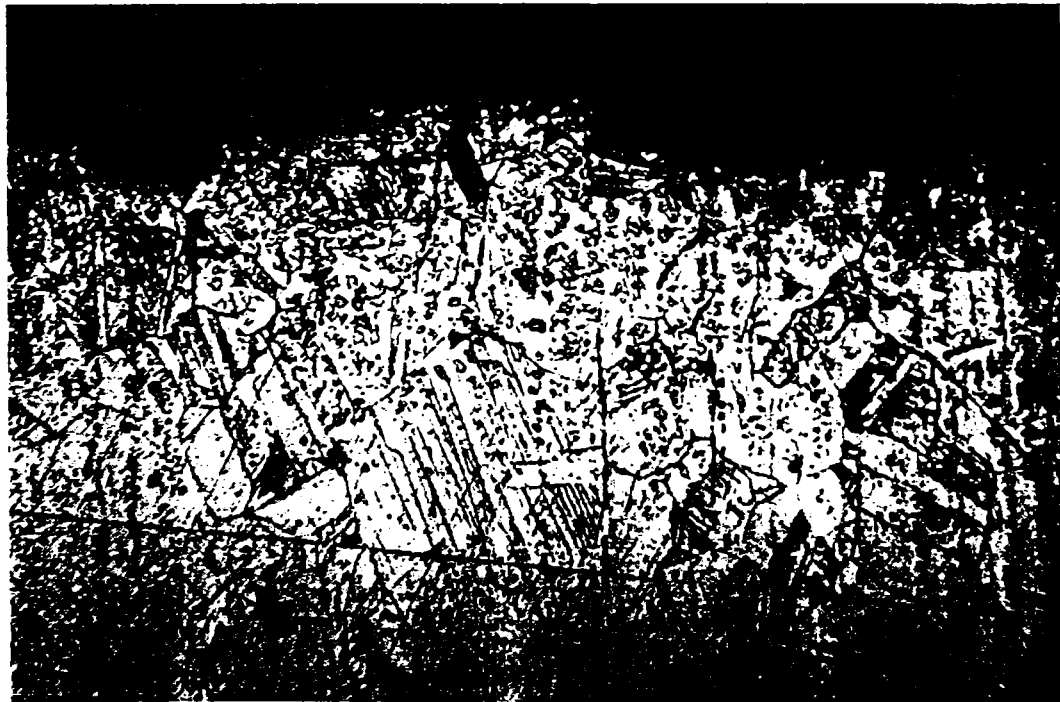
- microdeformații cauzate de impactul particulelor de sablare **Planșa 3, fig. 1.**
- o grosime mică de strat nitrurat care apare mai pregnant pe microasperitățile create de sablare **Planșa 3, fig. 1.**
- grosimea stratului nitrurat este neuniformă și are valoarea sub 0,1 mm.
- o structură austenitică cu macles ca o consecință a călirii de punere în soluție înainte de aplicarea tratamentului de sablare și nitrurare gazoasă.
- atacul cavitațional este mai puternic în microdenivelările create de sablare **Planșa 3, fig. 2 și 3.**
- atacul cavitațional provoacă microfisuri în stratul nitrurat, în special la vârful microasperităților **Planșa 3, fig. 2 și 3.**
- acțiunea presiunii și temperaturii zonale pe lângă crearea de microfisuri provoacă și precipitarea de faze intermetalice și carburi în foștii grăunți de austenită **Planșa 3, fig. 3.**
- Se remarcă o coroziune importantă inter și intracristalină.

Mecanismele degradării prin eroziune cavitațională a probelor tratate în această variantă tehnologică sunt similare cu cele descrise anterior: topiri zonale, crearea de microfisuri, modificări structurale în straturile superficiale.

Aceste mecanisme se desfășoară cu o viteză mai mică fapt care justifică și rezistența lor cavitațională mai ridicată.



(CS+S+N) - Planșa 3 Figura 1 Zona A MO 500X



(CS+S+N)- Planșa 3 Figura 2 Zona B₁ MO 100X



(CS+S+N) - Plansa 3 Figura 3 Zona B₁ MO 500X

UNIV. "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA
BIBLIOTECA CENTRALĂ

3.5.3.4 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție și încărcat prin sudare

Structura probelor din oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție și încărcat prin sudare este prezentată în **PLANȘA 4, Fig. 1, 2, 3, 4.**

Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1.

Analiza metalografică evidențiază următoarele aspecte caracteristice:

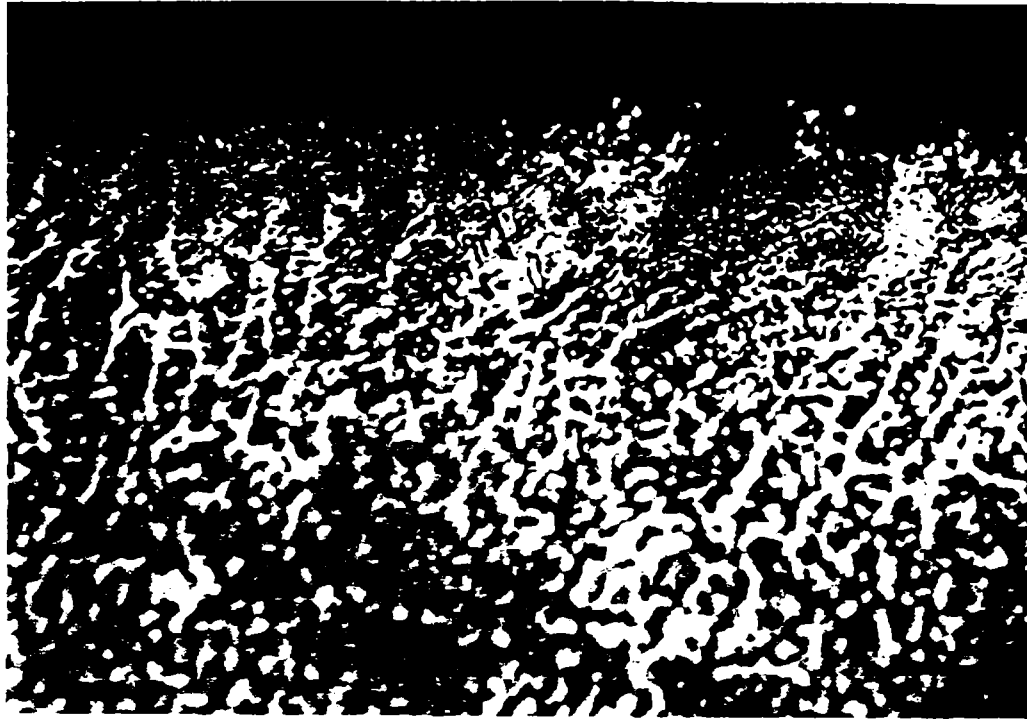
- creșteri dendritice ale grăunților perpendiculare pe frontul de sudare **Planșa 4, fig. 1, 2.**
- o finisare de granulație în microstraturi în zona influențată termic cu numeroase precipitări fine de carburi intragranulare **Planșa 4, fig. 2.**
- apariția de microfisuri la limita de grăunți austenitici și finisarea puternică a grăunților cristalini **Planșa 4, fig. 3.** în zona influențată termic.
- expulzări de microgrăunți, datorită topirii și microfisurilor la limita grăunților cristalini **Planșa 4, fig. 4.**

Se remarcă faptul că în zona influențată termic apare o granulație foarte fină, fapt care justifică mărirea la rezistență cavitațională a acestei zone.

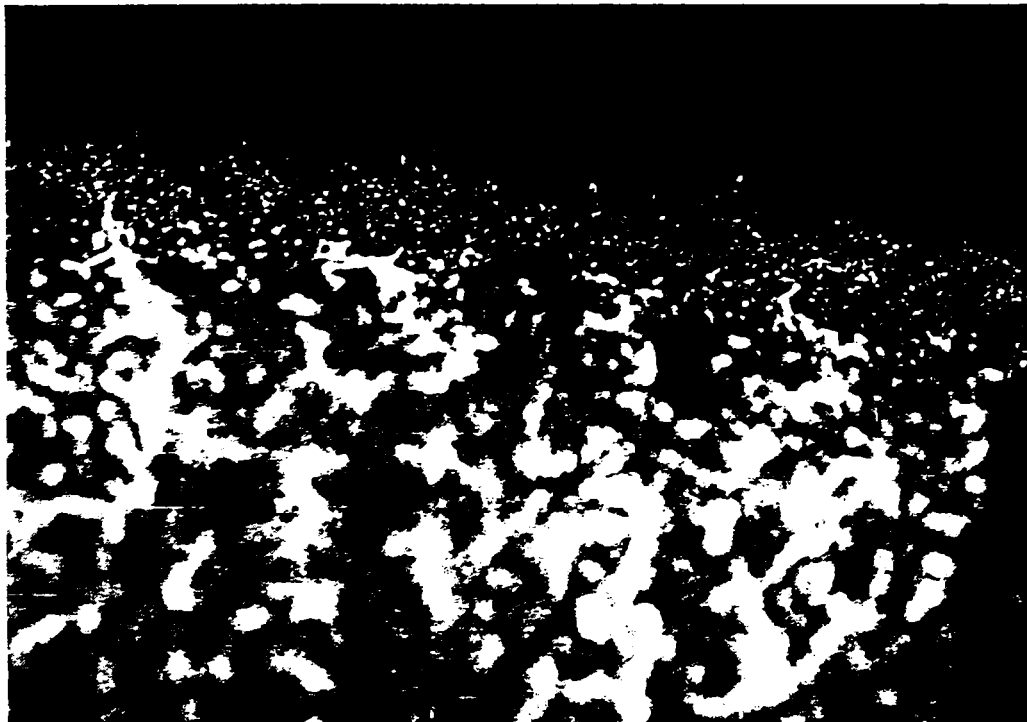
Straturile anticavitaționale depuse prin sudare au în zona influențată termic o mărită rezistență la cavitație, în special datorită mecanismelor de finisare a grăunților și de omogenizare a austenitei.



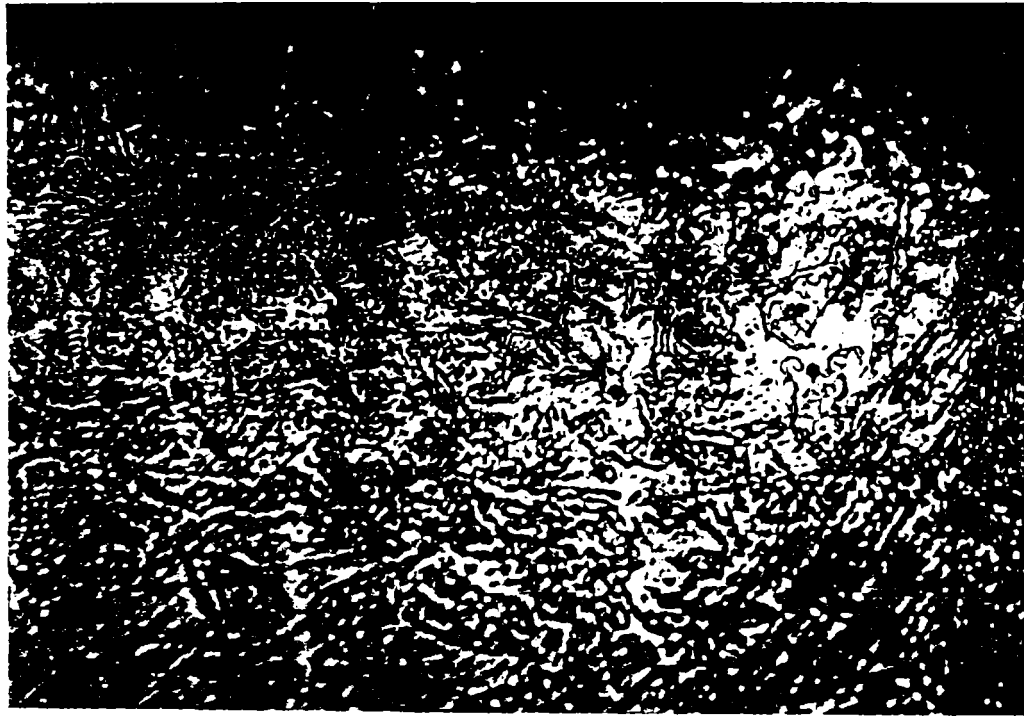
(CS+SUDAT)- Planșa 4 Figura 1 Zona A MO 100X



(CS+SUDAT) - Plansa 4 Figura 2 Zona A MO 500X



(CS+SUDAT) - Plansa 4 Figura 3 Zona B₁ MO 500X



(CS+SUDAT) - Planșa 4 Figura 4 Zona B₂ MO 500X

3.5.3.5 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire

Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire și revenire este prezentată în **PLANȘA 5, Fig. 1,2,3, 4.**

Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1.

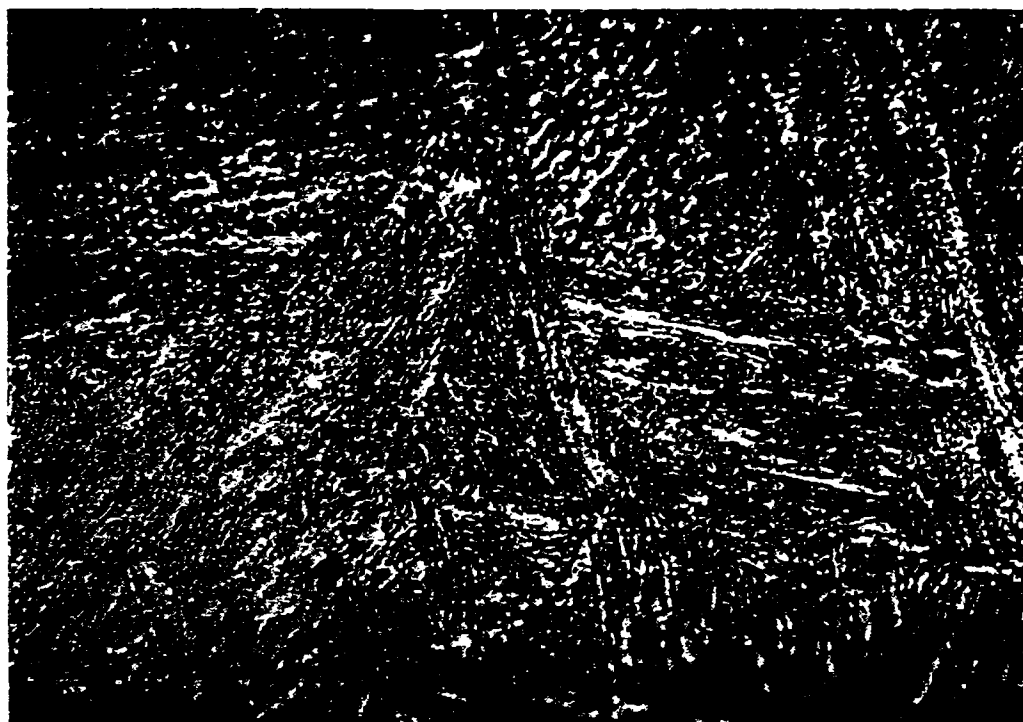
Analiza metalografică a probelor călite și revenite atestă:

- formarea unei structuri martensitice de revenire cu numeroase precipitări de carburi fine în acele de martensită **Planșa 5, fig. 1.**
- în zona marginală a cavitației se evidențiază desprinderi de grăunți cristalini și microfisuri **Planșa 5, fig. 2.**
- în zona centrală a atacului cavitațional apare coroziuni puternice cu expulzare de grăunți cristalini **Planșa 5, fig. 3, 4.**

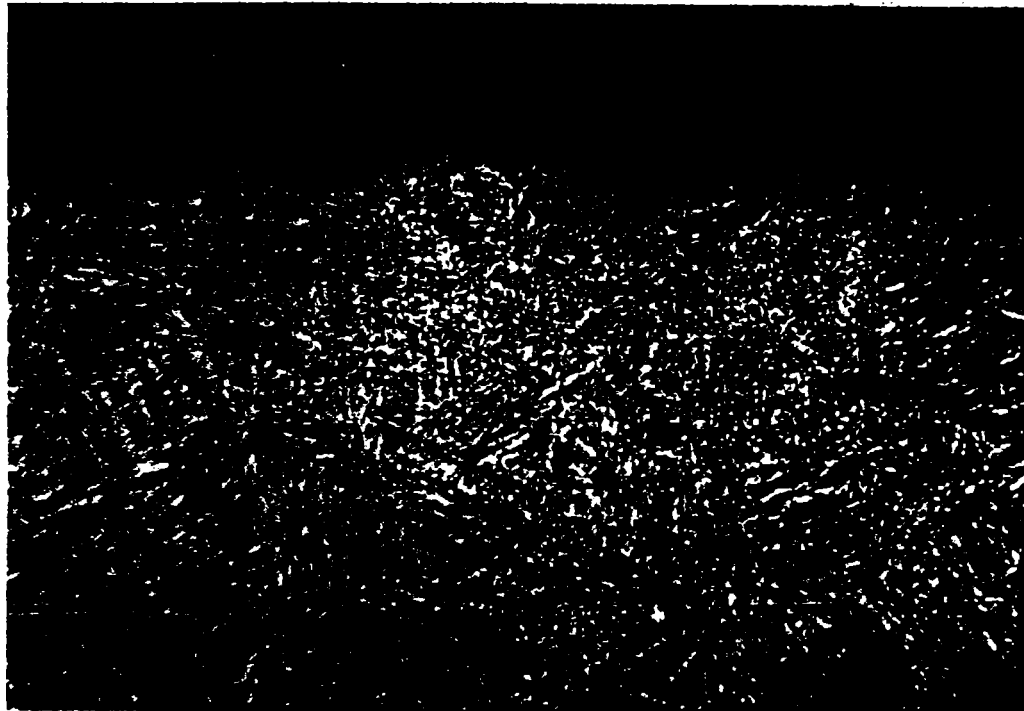
Se remarcă o finisare a granulației și modificări de structură pe grosimi 0,1...0,2 mm **Planșa 5, fig. 3, 4.**

Probabil în interiorul acestor grăunți fini se păstrează o structură martensitică de revenire, situație care ar putea fi evidențiată prin cercetări ulterioare de microscopie electronică.

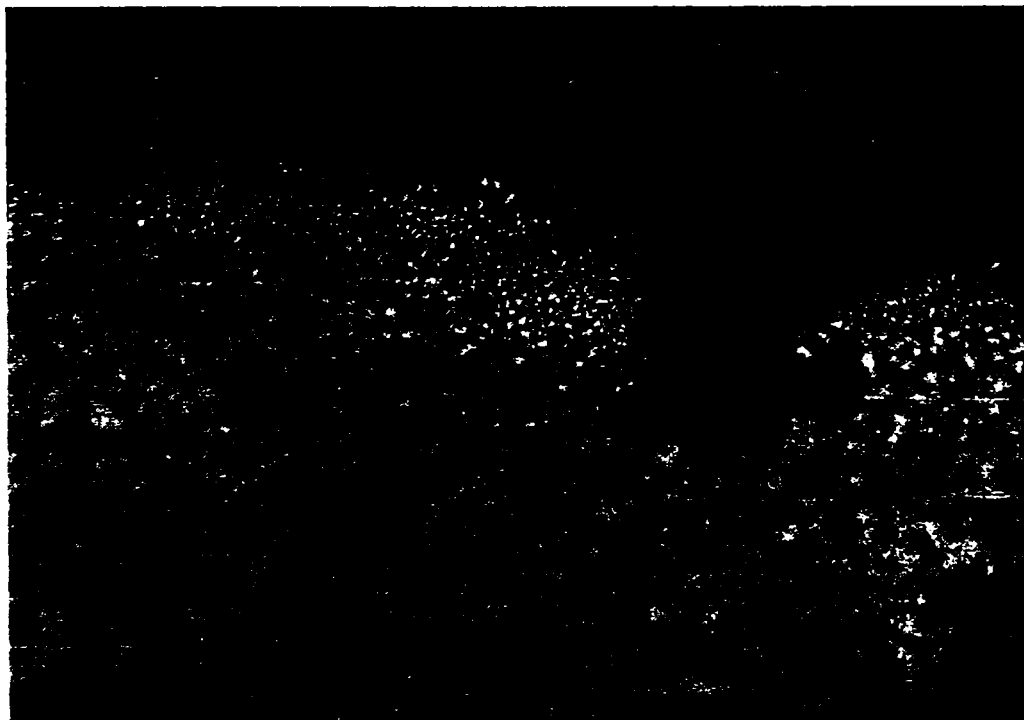
Eroziunea cavitațională în această situație are mecanism principal modificarea de granulație și de microstructură fapt care conduce la un atac electrochimic pronunțat, datorită fenomenelor conexe procesului cavitațional.



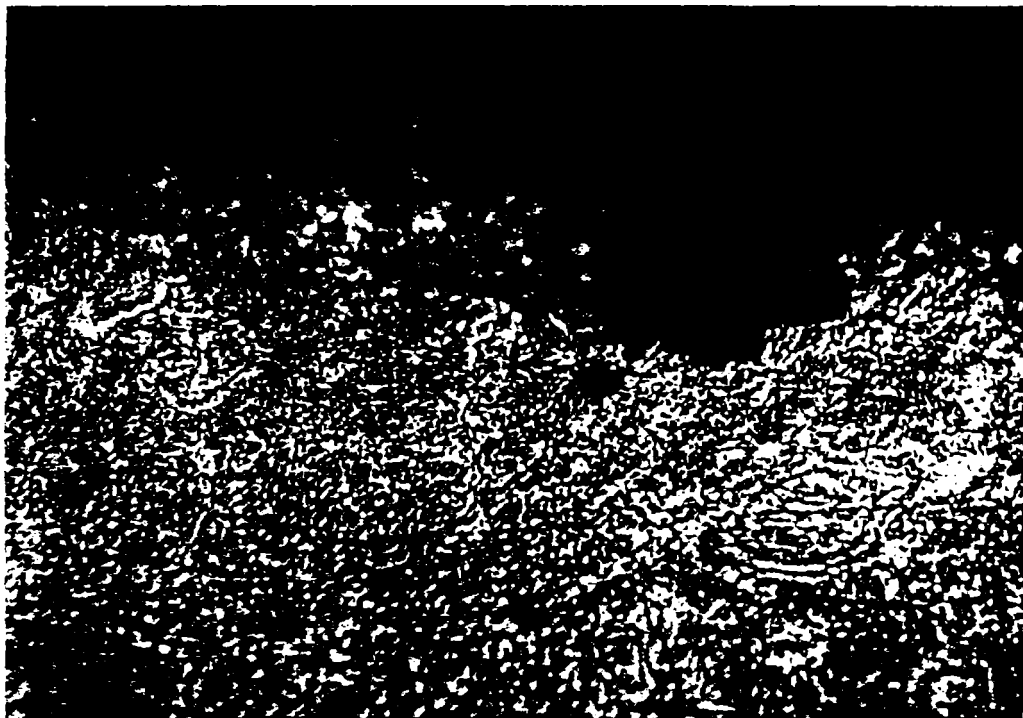
(C+R) - Planșa 5 Figura 1 Zona A MO 500X



(C+R) - Planșa 5 Figura 2 Zona B₁ MO 100X



(C+R) - Planșa 5 Figura 3 Zona B₂ MO 500X



(C+R)- Planșa 5 Figura 4 Zona B₂ MO 500X

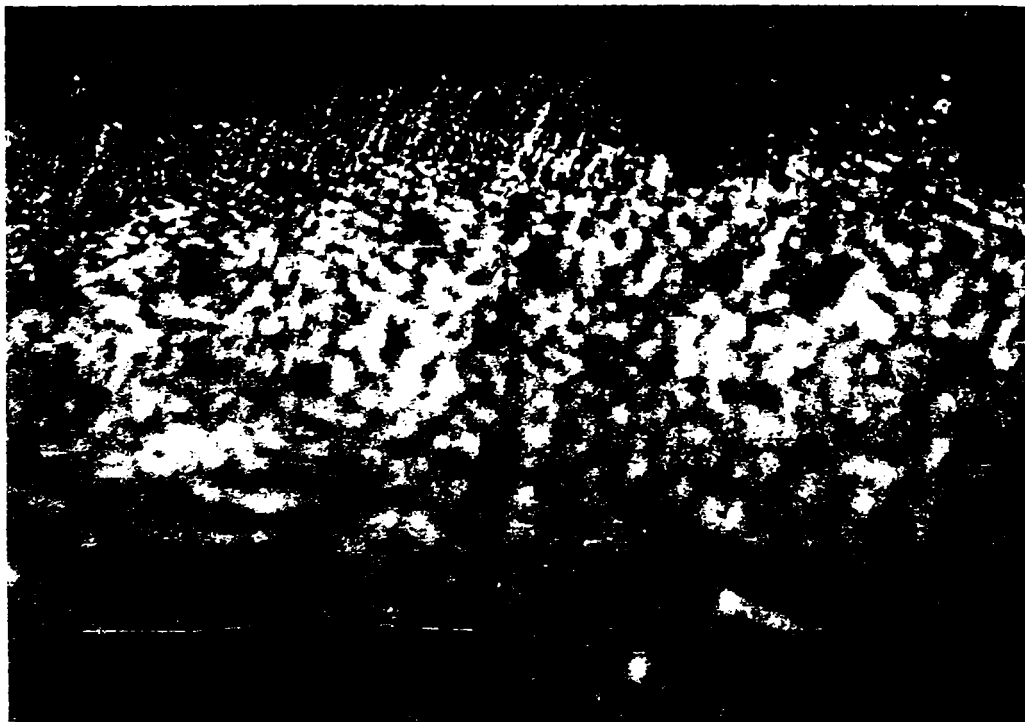
3.5.3.6 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire și nitrurare gazoasă.

Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire și nitrurare gazoasă este prezentată în **PLANȘA 6, Fig.1,2,3,4,5.**

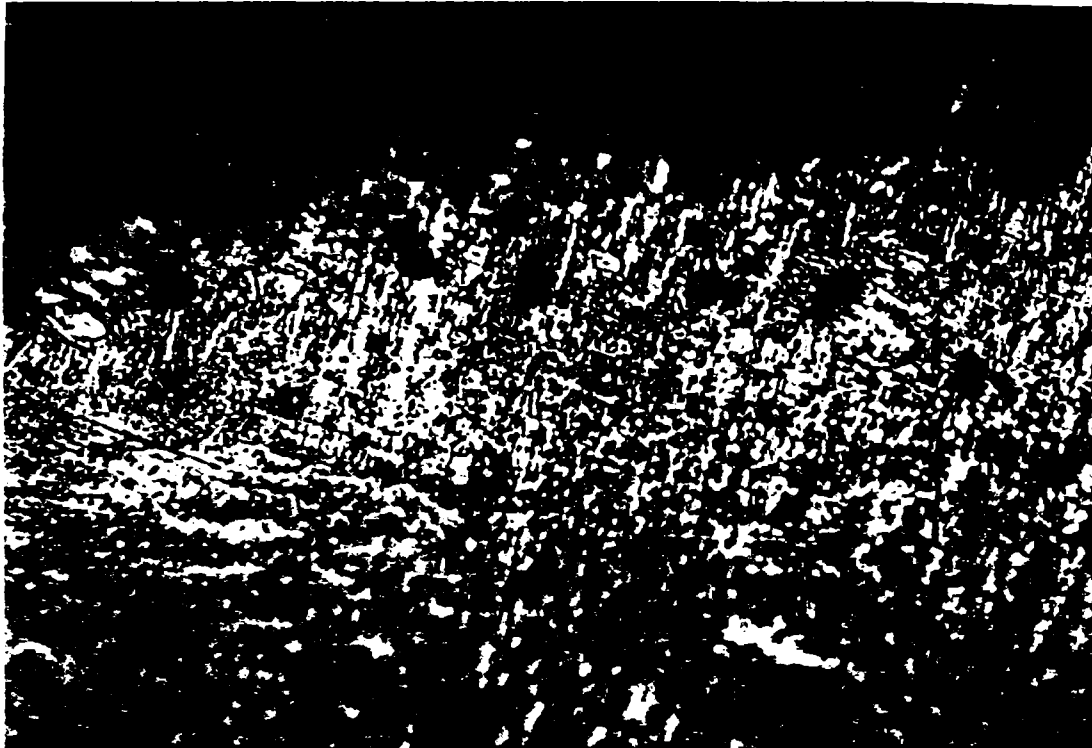
Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1. Imaginile structurale scot în evidență următoarele aspecte:

- un strat nitrurat cu grosimi sub 0,1 mm
- grosimea este variabilă pe suprafața probelor
- o zonă de tranziție formată din constituenți de nitrurare (nitruri ale elementelor de aliere, nitruri de Fe) și structuri de martensită revenită **Planșa 6, fig. 1, 2.**
- distrugerea prin cavitație a stratului nitrurat se realizează prin formarea de microfisuri și expulzarea de grăunți cristalini **Planșa 6, fig. 3, 4.**
- apar modificări structurale în stratul nitrurat a căror natură se poate evidenția numai prin microscopie electronică.
- în zona centrală a cavitației apar evidente mecanismele de microfisurare, de detașare de particule metalice, **Planșa 6, fig. 5.**

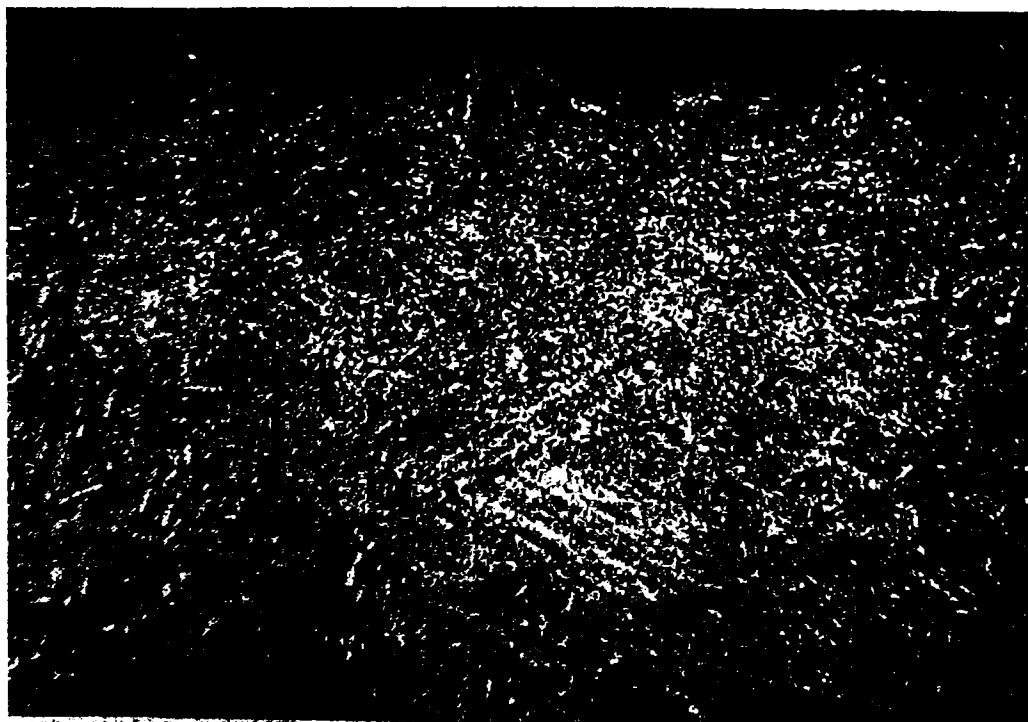
Fenomenele complexe ale eroziunii cavitaționale produc modificări structurale în stratul nitrurat (modificări care în etapa actuală nu le-am putut evidenția), fapt care va justifica buna rezistență la cavitație a straturilor nitrurate create pe oțelurile martensitice GX4CrNi13-4 după (C+R).



(C+R+N) - Planșa 6 Figura 1 Zona A MO 500X



(C+R+N) - Planșa 6 Figura 2 Zona A MO 500X



(C+R+N) - Planșa 6 Figura 3 Zona B₂ MO 100X



(C+R+N)- Planșa 6 Figura 4 Zona B₂ MO 500X



(C+R+N) - Planșa 6 Figura 5 Zona B₂ MO 500X

3.5.3.7 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire sablare și nitrurare gazoasă

Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire, sablare și nitrurare gazoasă este prezentată în **PLANȘA 7, Fig. 1,2,3,4,5.**

Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1. Analiza metalografică scoate în evidență următoarele aspecte caracteristice:

- sablarea produce o finisare de granulație pe adâncimi de câțiva microni fără a crea microasperități pe suprafața probei **Planșa 7, fig. 1.**
- aplicarea nitrurării după sablare creează constituenți structurali de faze intermetalice și nitruri de Fe și ale elementelor de aliere, foarte fine și foarte disperse **Planșa 7, fig. 2.**
- atacul cavitațional are loc prin crearea de microfisuri în stratul sablat și nitrurat și de microasperități datorate eroziunii electrochimice **Planșa 7, fig. 3, 4.**
- în zona centrală a cavitației se evidențiază clar și modificările de structură cauzate de mecanismele de eroziune cavitațională.
- se observă finisări de faze și de precipitate, precum și o dispersie mare a precipitatelor **Planșa 7, fig. 5.**

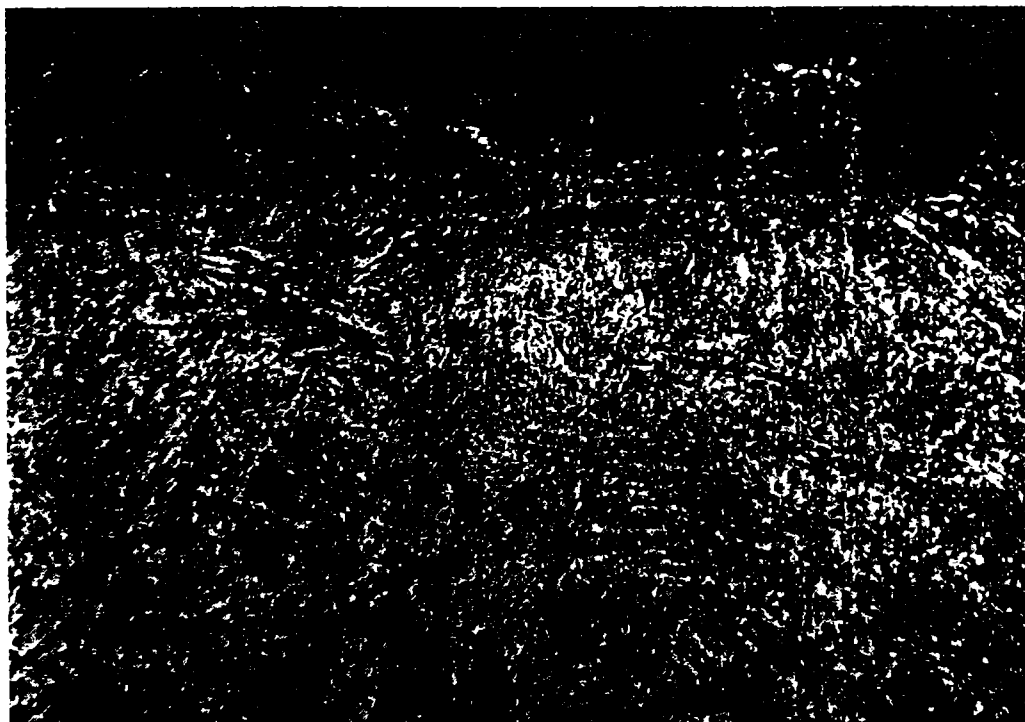
Crearea prin sablare a unui microstrat durificat și a unor precipitate de nitruri de Fe și ale elementelor de aliere măresc rezistența la atac cavitațional a oțelului austenitic.



(C+R+S+N) - Planșa 7 Figura 1 Zona A MO 100X



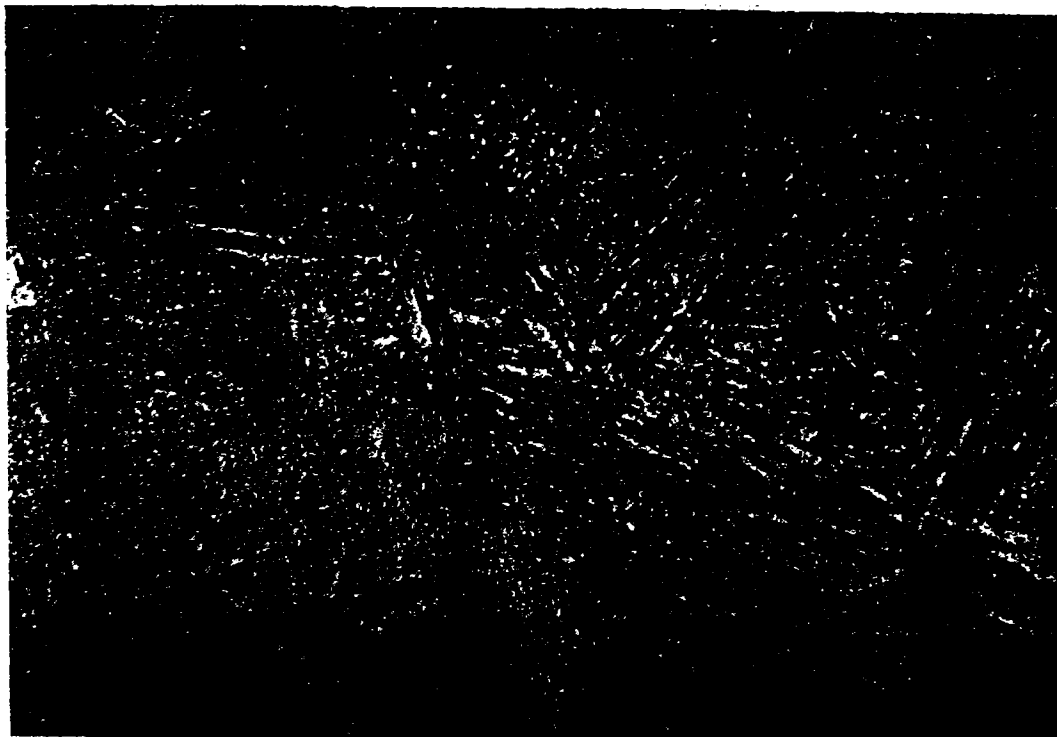
(C+R+S+N)- Planșa 7 Figura 2 Zona A MO 500X



(C+R+S+N)- Planșa 7 Figura 3 Zona B₁ MO 100X



(C+R+S+N) - Planșa 7 Figura 4 Zona B₂ MO 500X



(C+R+S+N) - Planșa 7 Figura 5 Zona B₂ MO 500X

3.5.3.8 Structura probelor încercate la cavitație din oțelul GX4CrNi13-4, tratat termic prin călire, revenire și încărcate prin sudare

Structura probelor GX4CrNi13-4, tratate termic prin călire, revenire și încărcate prin sudare este prezentată în **PLANȘA 8-Fig.1, 2, 3, 4, 5**.

Pregătirea și atacul metalografic au fost aceleași cu cele arătate în 3.5.1.

Analiza metalografică a probelor supuse eroziunii cavitaționale scoate în evidență următoarele aspecte:

- o structură dendritică a materialului depus prin sudare **Planșa 8-Fig. 1, 2**.
- o structură formată din martensită de revenire și precipitații de carburi complexe în metalul de baza **Planșa 8-Fig. 2**.
- atacul cavitațional are loc la limitele de grăunți cristalini **Planșa 8-Fig. 3**.
- desprinderea și expulzarea unor particule de material **Planșa 8-Fig. 4**.
- finisarea grăunților cristalini și intensificarea separărilor de carburi complexe la limita grăunților **Planșa 8-Fig. 4, 5**.
- microfisuri multiple la limitele de grăunți cristalini, grăunți mai fini datorită acțiunii cavitaționale **Planșa 8-Fig. 3, 4**.

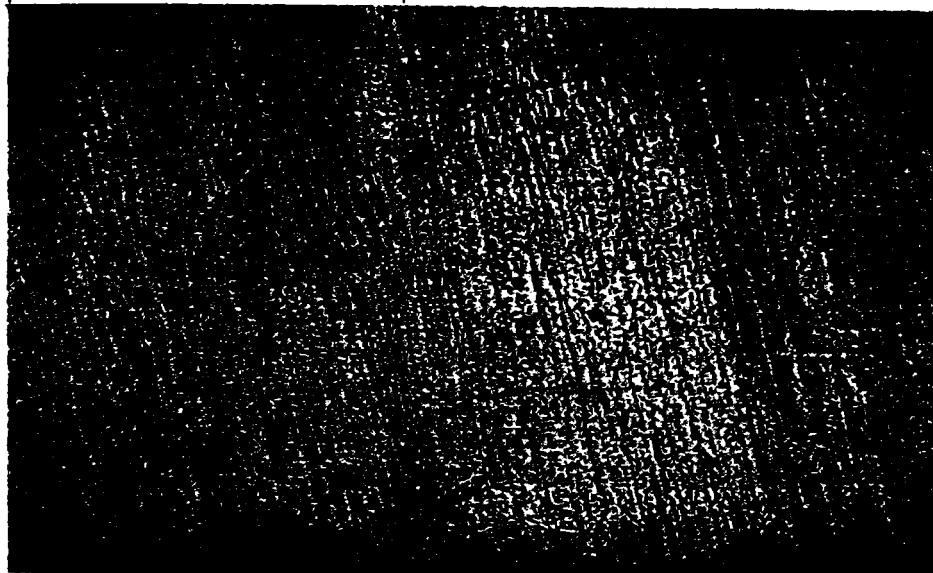
Finisarea de granulație contribuie la mărirea rezistenței la atac cavitațional iar separările de carburi complexe micșorează rezistența la coroziune a oțelului.

Distrugerea prin cavitație are la bază mecanisme de coroziune tenso-fisurantă cu expulzare de particule de material.

Finețea structurii, omogenitatea granulației și dispersia carburilor face să crească rezistența la atac cavitațional a zonei influențată termic-ZIT, a sudurii oțelului GX4CrNi13-4.

Straturile tampon și straturile anticavitaționale create prin sudarea oțelului martensitic produce modificări structurale complexe care nu au putut fi evidențiate în stadiul actual al cercetărilor.

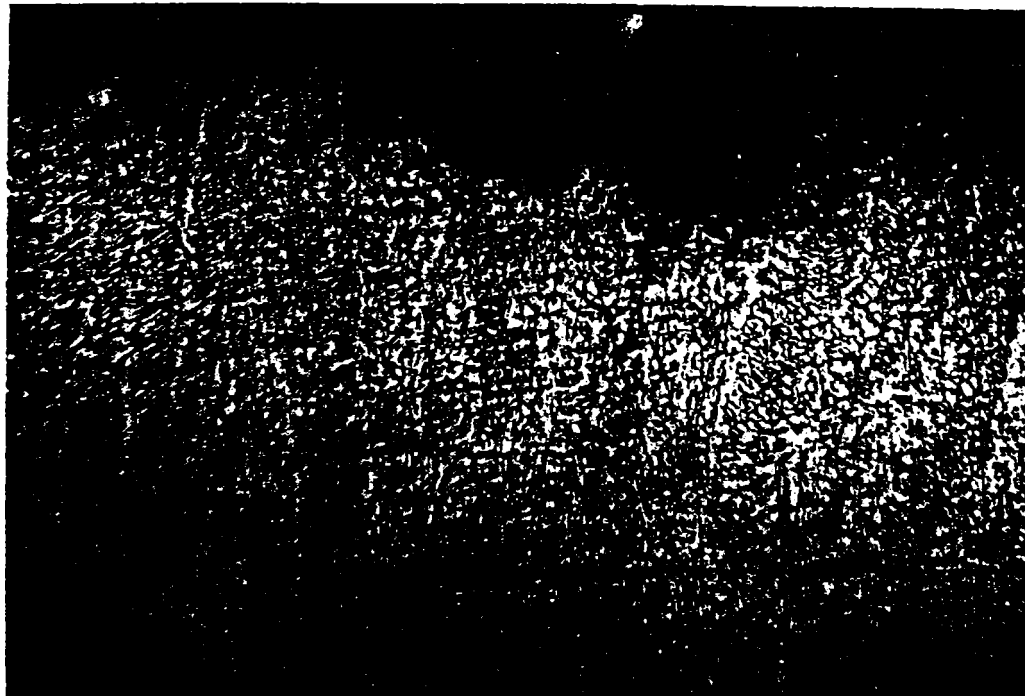
Analizele prin metalografie electronică și cu raze penetrante vor aduce noi lămuriri privind structura zonei influențate termic-ZIT, a oțelurilor martensitice încărcate prin sudare cu structuri complexe.



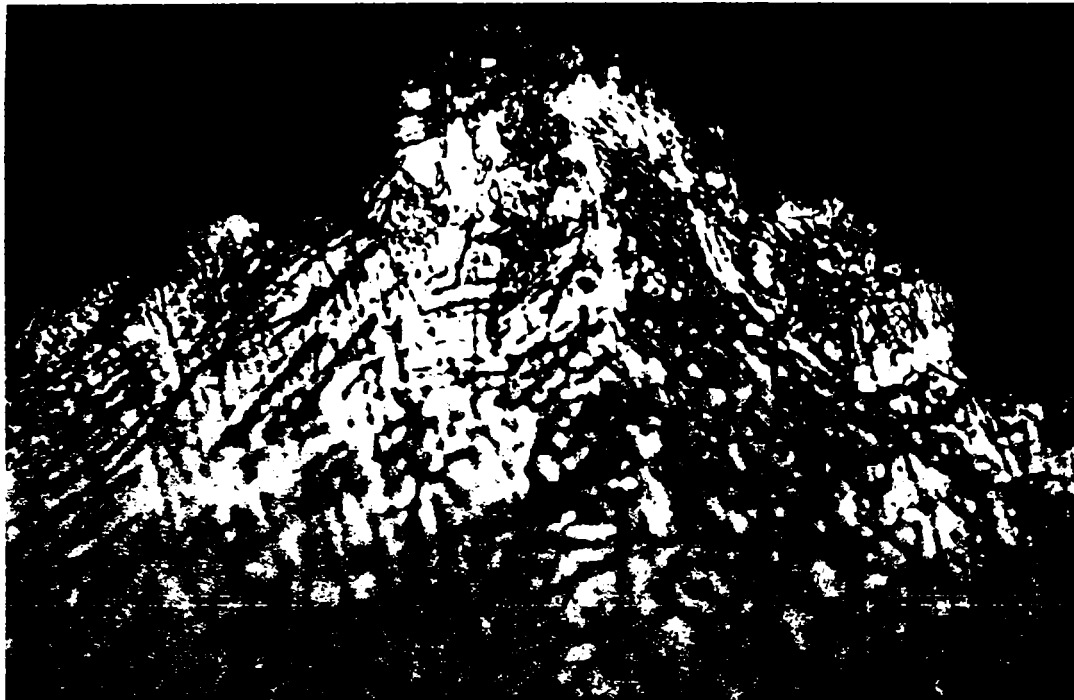
(C+R+SUDAT) - Planșa 8 Figura 1 Zona A MO 100X



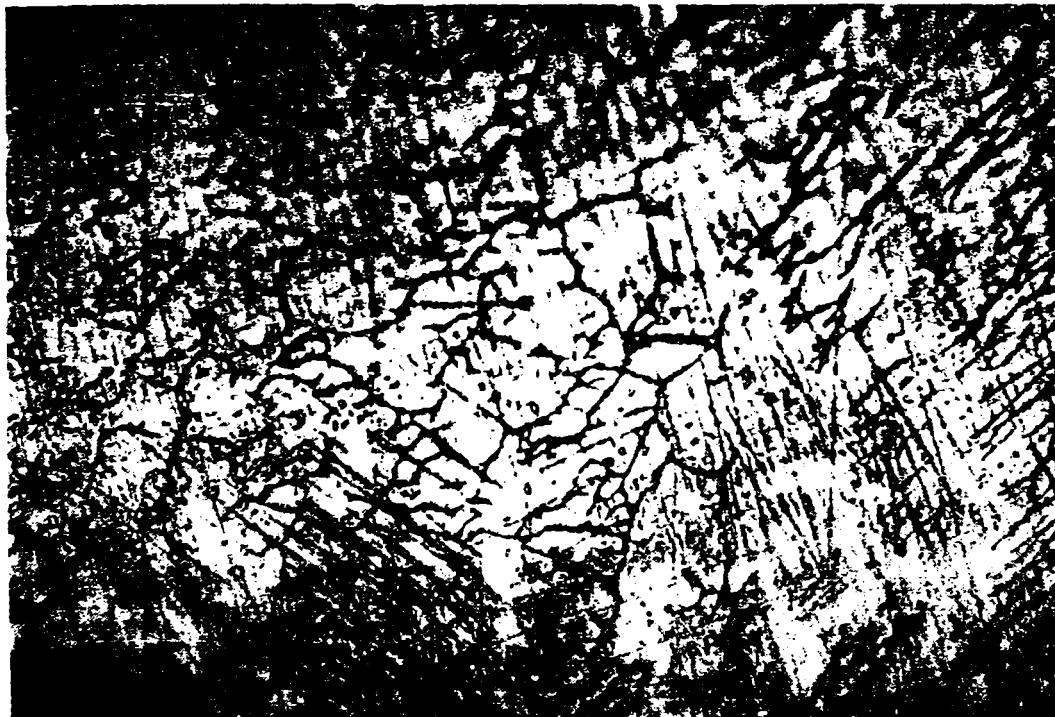
(C+R+SUDAT) - Planșa 8 Figura 2 Zona A MO 500X



(C+R+SUDAT) - Planșa 8 Figura 3 Zona B₂ MO 100X



(C+R+SUDAT) - Planșa 8 Figura 4 Zona B₂ MO 500X



(C+R+SUDAT) - Planșa 8 Figura 5 Zona B₂ MO 500X

3.6. ÎNCERCĂRI LA DURITATE A PROBELOR DIN OȚELULURILE SUPUSE ATACULUI CAVITAȚIONAL

3.6.1. Pregătire și zone de măsurare

S-au făcut încercări de microduritate folosind un microdurimetru TTM-3.

Investigația s-a făcut în zonele **A**, **B**, **C** a probelor metalografice indicate în **fig. 3.47**, în toate cele trei cazuri originea axei Oh fiind la suprafața liberă.

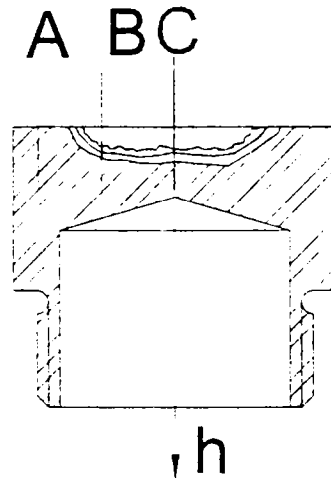


Fig.3.47

S-au făcut măsurători microdurimetrice cu un pas de 0,1mm în zonele indicate pe lungimi de până la 1,2 mm. (în **fig. 3.53**, **3.54**, **3.55** măsurătorile pe adâncimea de 0,1mm făcându-se cu pas de 20 μm)

Prelucrarea măsurătorilor și reprezentarea variației de duritate HV0,2 este indicată în **fig.3.48** → **3.55**.

3.6.2 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX5CrNi 19-10 tratat termic prin călire de punere în soluție

Microduritățile inițiale sunt la nivelul 200HV0,1 iar zonele afectate de cavitație 185HV 0,1, duritatea nu este uniformă în volum, ea având mici variații.

Prelucrarea măsurătorilor și reprezentarea variației de duritate HV0,1 este indicată în **fig.3.48**.

Măsurătorile de duritate confirmă cele date de investigația metalografică, în sensul că apar finisări de granulații și precipitări de carburi complexe la limita și în interiorul grăunților.

Analizele metalografice atestă că materialul supus la cavitație., din cauza șocurilor termice și a presiunilor mari a suferit topiri locale și expulzări de grăunți, coroziuni tensofisurante care explică degradarea cavitațională a materialului. La oțelul inoxidabil austenitic nu s-a produs mărirea zonală a durității ci datorită

precipitărilor de carburi, austenita a devenit neomogenă și cu duritate mai mică decât cea inițială - cea dată tratamentul termic de călire de punere în soluție.

Apar micșorări ale grăunților cristalini datorită solicitărilor mecanice și termice și apar degradări ale materialului, formându-se o zonă de asperități în zona erodată prin cavitație.

Rezistența bună la cavitație a acestui oțel este dată de structura omogenă a austenitei. Structură care mărește rezistența la coroziune chimică și electrochimică a oțelului.

3.6.3 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX5CrNi 19-10 tratat termic prin călire de punere în soluție și nitrurare gazoasă

În straturile superficiale pe adâncimi până la 0,1mm apare o duritate HV0,2-350...370.(Fig. 3.49-A)

În zona de tranziție, strat nitrurat-oțel tratat termic prin călire de punere în soluție cu o grosime de 0,4mm apar durități HV0.2-349...280. .(Fig. 3.49-A)

Zona din probă neafectată de nitrurare are duritățile HV0,2-270, durități care se mențin și în zonele afectate cavitațional. .(Fig. 3.49-B, C)

Față de probele tratate numai prin călire de punere în soluție regimul de nitrurare a indus în oțel stări de compresiune și a modificat și granulația prin creșterea grăunților austenitici, situație care explică obținerea unei durități mai ridicate la grosimi mai mari de 0,9mm, față de materialul care nu a fost nitrurat.

3.6.4 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX5CrNi19-10 tratat termic prin călire de punere în soluție, sablare și nitrurare gazoasă

În stratul superficial pe adâncimi de până la 0,2 mm apare o duritate ridicată HV0,2 – 410-450, mai mare decât în cazul oțelului tratat termic numai prin nitrurare gazoasă. (fig.3.50).

În zona de tranziție stratul sablat și nitrurat- oțel tratat termic prin călire de punere în soluție, de la 0,2-0,45 mm duritatea variază HV 0,2- 410-340 (fig.3.50-zona A.) iar peste 0,6 mm duritatea se stabilizează la nivelul HV 02-330

Măsurătorile de duritate efectuate în zonele B și C – zone afectate cavitațional, microduritățile se situează la nivelul HV 02-270. Este de fapt duritatea materialului afectat de mecanismele deteriorării prin eroziune cavitațională și materialul are o duritate superioară stării inițiale de călire de punere în soluție.

În etapa actuală cercetările metalografice efectuate nu au permis lămurirea acestei durificări.

Studiile în continuare de microscopie electronică și analize cu raze X sper că vor elucida această situație, bănuind, că este vorba de stări tensionale induse de procesul de eroziune cavitațională.

3.6.5 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX5CrNi19-10 tratat termic prin călire de punere în soluție și încărcare prin sudare

În zona neafectată de cavitație (fig. 3.51-A), pe adâncimi de până la 0,8 mm, duritățile măsurate sunt aceleași ca la oțelul supus numai tratamentului termic de călire de punere în soluție,(fig. 3.48-B, C), HV 0,2 -180.

În zona de trecere de la material neafectat de cavitație- material erodat cavitațional (fig.3.51-B), pe adâncimi de până la 0,4 mm, se constată o ecruisare a oțelului până la durități HV 0,2 – 240

La adâncimi de 0,4 mm până la 0,9 mm, duritățile măsurate sunt HV 0.2–190, ca și la oțelul supus numai tratamentului termic de călire de punere în soluție. În zona cea mai expusă erodării cavitaționale (fig. 3.51-C), se constată o puternică ecruisare a oțelului, duritatea ajungând în stratul superficial HV 0,2 – 330.

Cercetările metalografice actuale nu au elucidat cauza acestei durificări și se impune o cercetare mai amănunțită prin metalografie electronică și iradierii cu raze X.

Presupunem că prin procesele de eroziune cavitațională s-au indus stări tensionale în straturile adiacente care ar justifica ecruisarea materialului.

La adâncimi mai mari de 0,7 mm, duritatea este HV 0,2 – 190, ca și la materialul tratat termic prin călire de punere în soluție.

3.6.6 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX4CrNi13-4 tratat termic prin călire și revenire

După călire și revenire oțelul GX4CrNi13-4 are duritatea medie HV0,2-300, situație care este în deplină concordanță cu constituenții structurali evidențiați prin analiză metalografică (*martensită de revenire, cu precipitări fine de carburi în acele de martensită*).

În zonele adiacente degradării prin eroziune cavitațională (zonele B, C – fig.3.47) duritatea HV 0,2-300 atestă că nu s-au produs modificări importante în aceste zone.(fig. 3.52)

3.6.7 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX4CrNi13-4 tratat termic prin călire, revenire și nitrurare gazoasă

În straturile superficiale pe adâncimi până la 0,1 mm, apare o duritate 300-600 HV 0,2 - (fig. 3.53-A)

Variația acestei durtăți este dată de precipitatele de nitruri în stratul superficial și în straturile de tranziție, precipitate care induc tensiuni de compresiune care justifică creșterea de duritate și creșterea rezistenței la coroziune.

În substraturile zonei degradate prin atac cavitațional, duritatea este la nivelul HV 0,2-240, situație normală dat fiind că s-au făcut măsurători în metalul cu structură C+R.

Se constată că și la adâncimi mai mari de 0,9 mm duritatea este: HV0,2-240.

3.6.8 Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX4CrNi13-4 tratat termic prin călire, revenire, sablare și nitrurare

Prelucrarea măsurătorilor și reprezentarea variației de duritate HV 0,1 este indicată în (fig. 3.54-A, B, C).

În straturile superficiale neafectate de cavitație pe adâncimi până la 0,1 mm apare o duritate HV 0,1 -750- 1000. (fig. 3.54-A), iar între 0,1 mm și 0,4 mm variația este HV 0,1 -750 - 300.

La adâncimi mai mari de 0,4 mm HV0,1 - 300.

În zonele afectate de cavitație (fig.3.54- B, C), la adâncimi până la 0,1 mm, duritatea măsurată est HV 0,1 – 300-1100.

La adâncimi mai mari de 0,3 mm duritățile măsurate se mențin constante HV 0,1 - 300

Aceste variații de duritate sunt în deplină concordanță cu starea structurală a oțelului analizat în paragraful 3. 5. 3. 7.

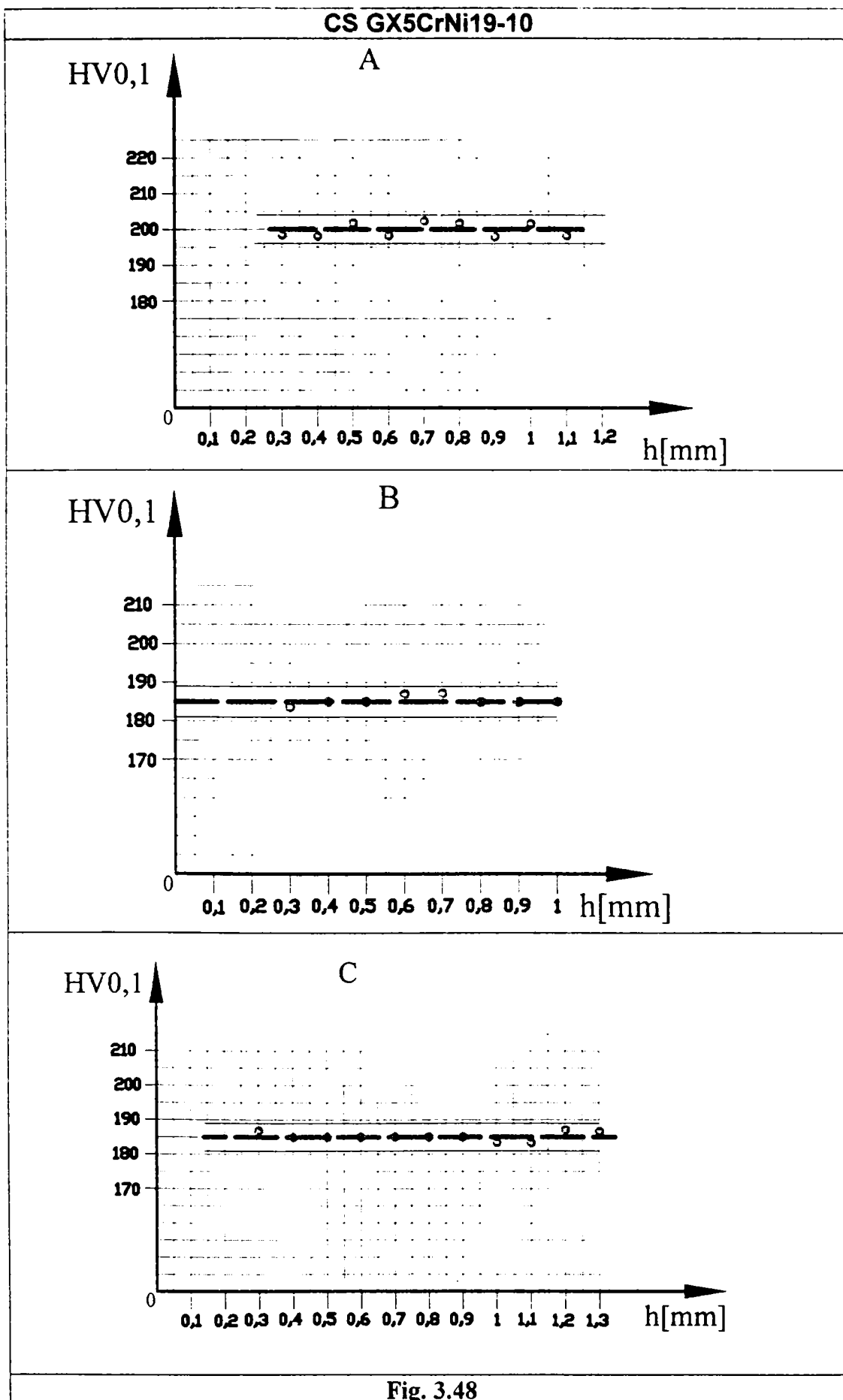
3.6.9. Măsurători de microduritate pe probele din oțelul inoxidabil GX4CrNi13-4 tratat termic prin călire, revenire și încărcare prin sudare.

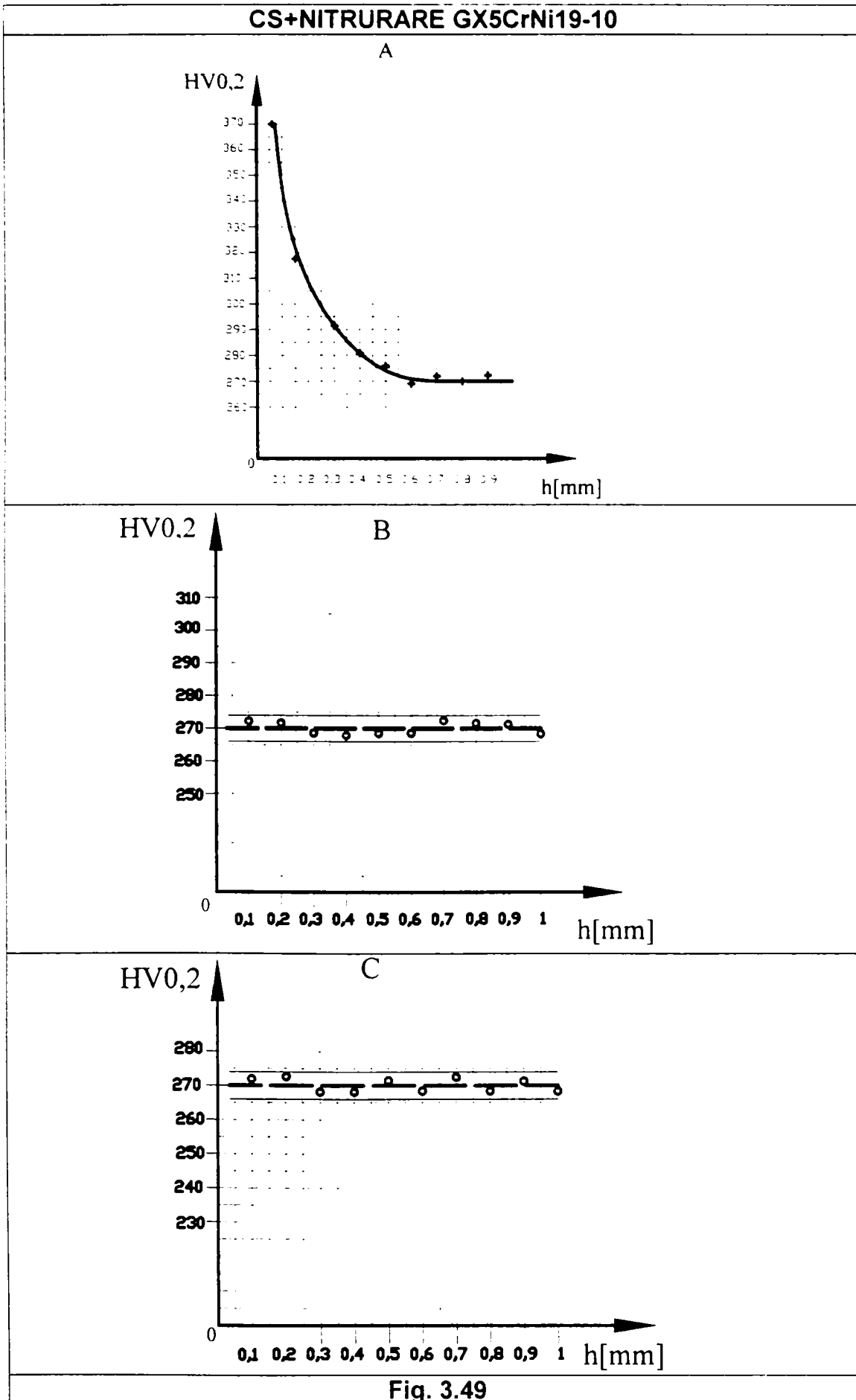
Prelucrarea măsurătorilor și reprezentarea variației de duritate HV 0,2 este indicată în (fig. 3.55 -A, B, C).

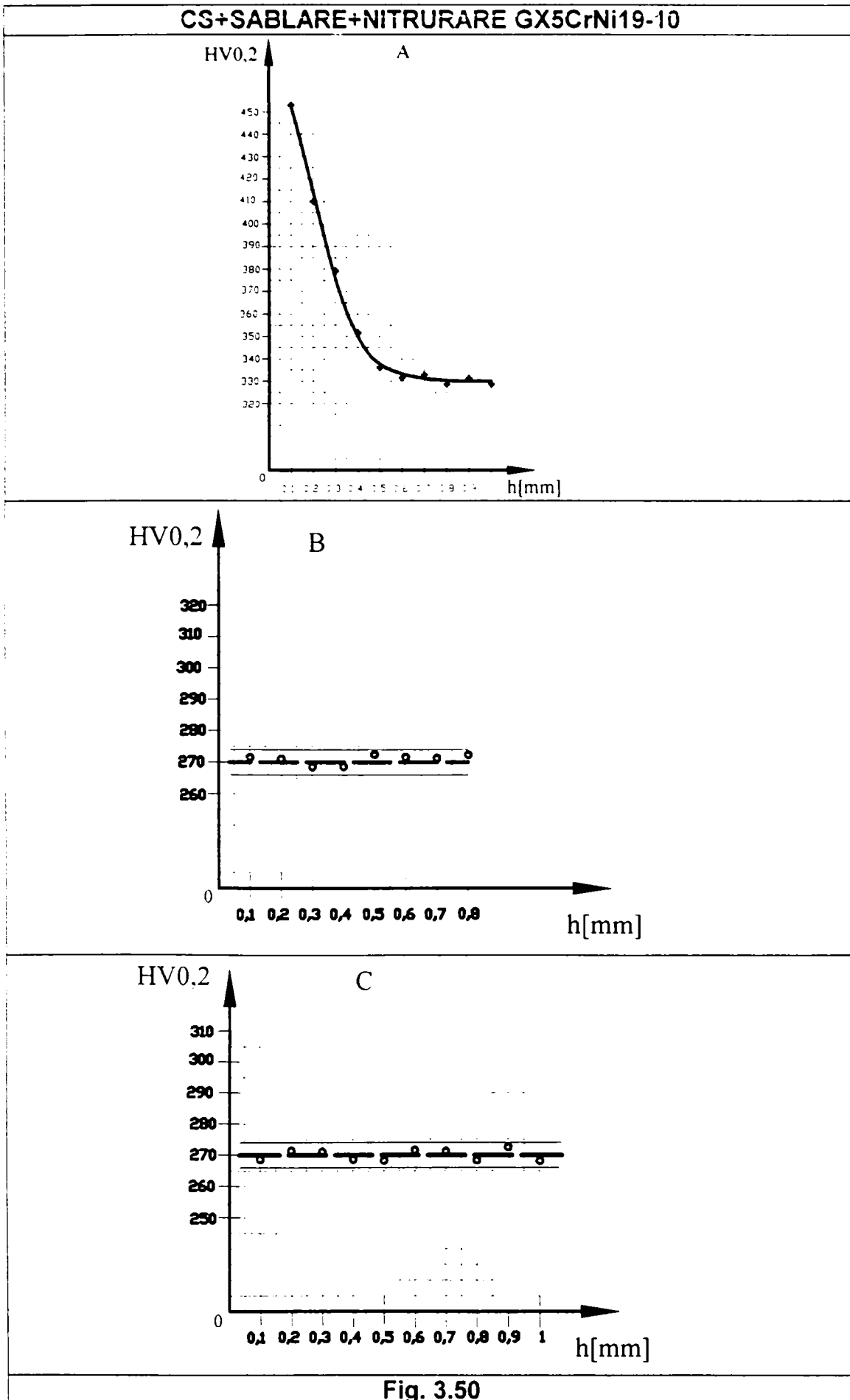
În zonele neafectate cavitațional fig.3.55 -A și cea de tranziție fig. 3.55 -B, duritățile HV 0,2 = 220 egale cu cea a oțelului supus numai tratamentului termic de călire și revenire.

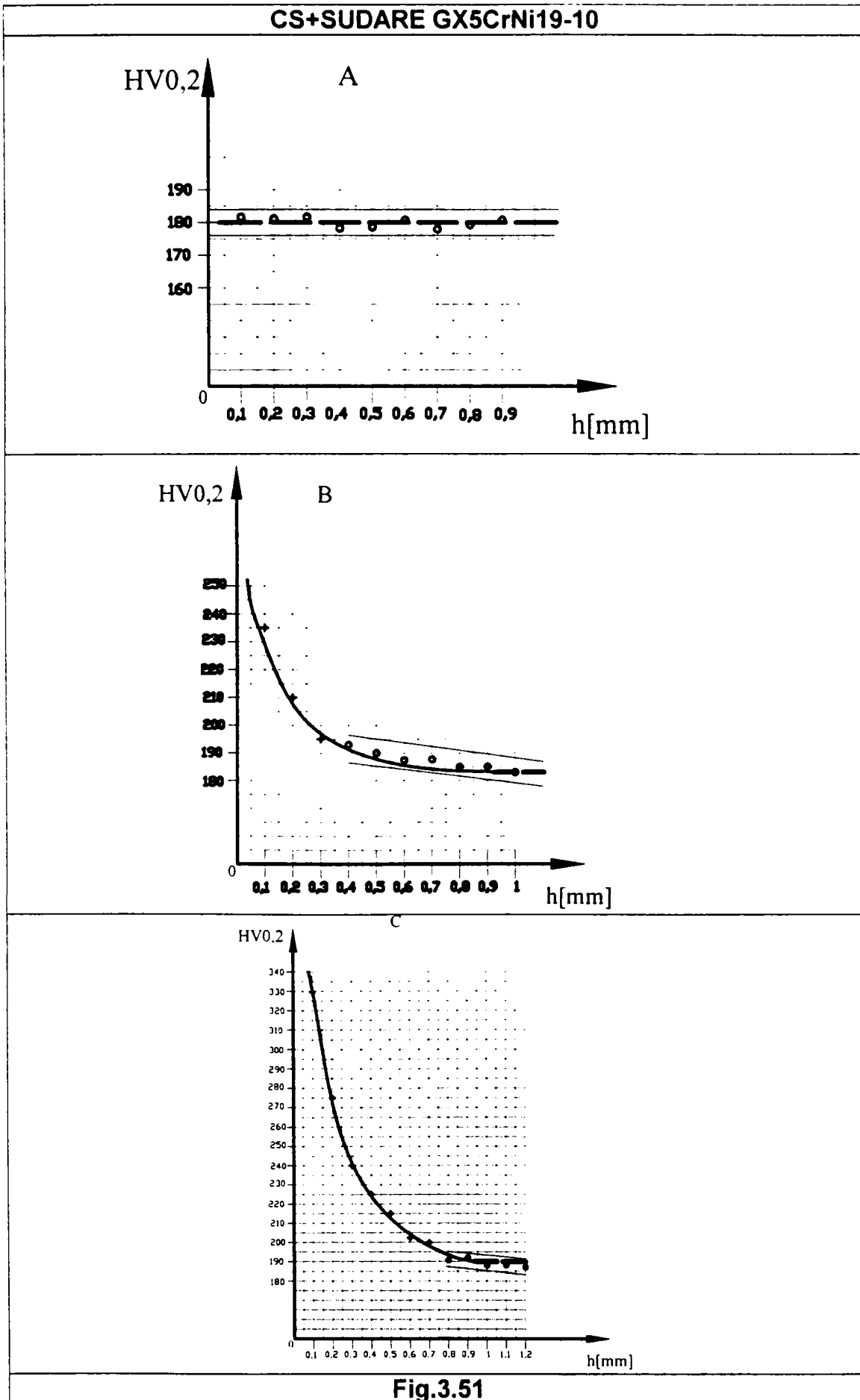
În zona afectată de eroziune cavitațională se constată o ușoară creștere a durității la HV 0,2 -285 (fig. 3.55 -C)

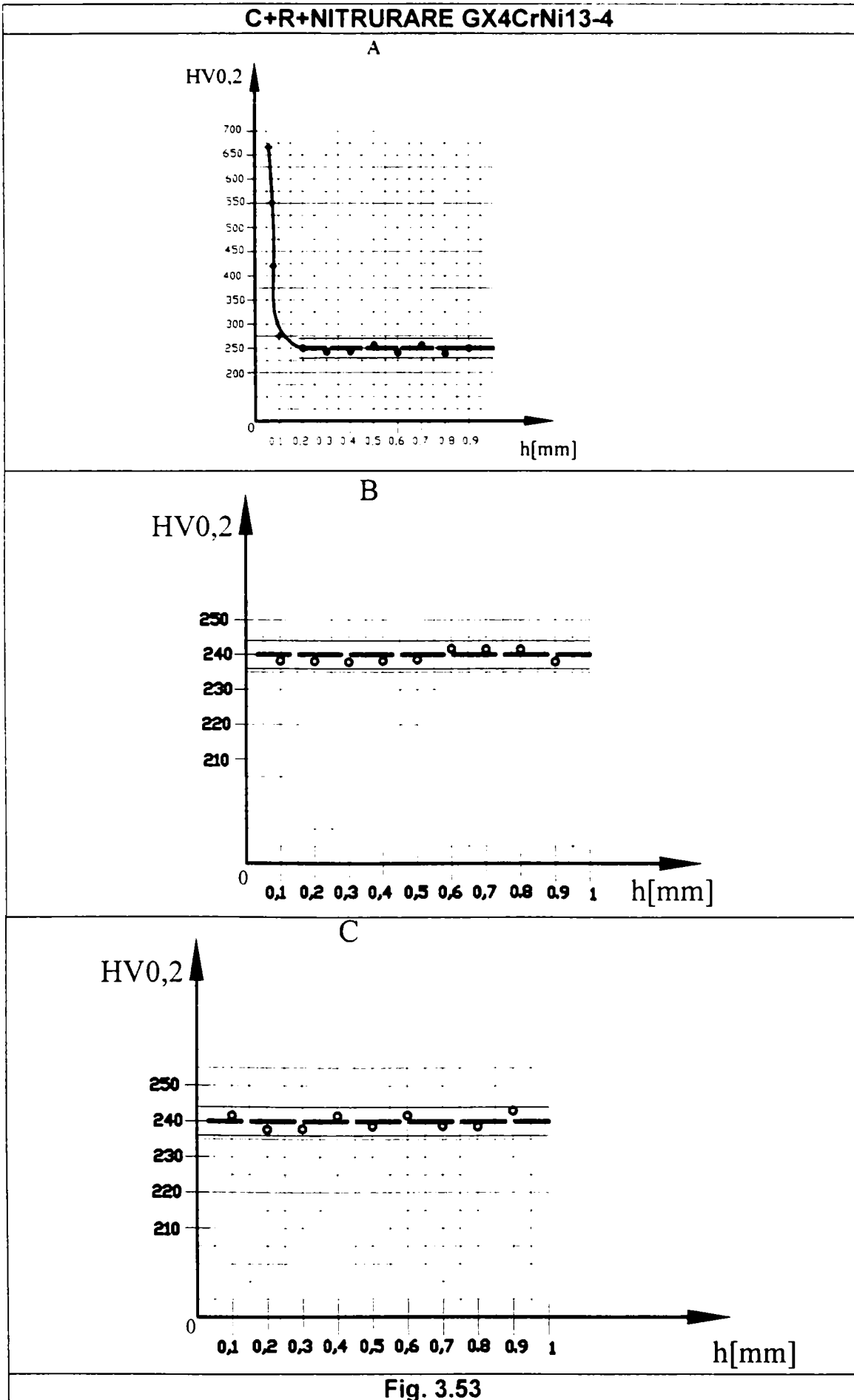
Valorile de microduritate HV0,2 sunt în deplină concordanță cu cele analizate la cercetarea metalografică a Zit-ului oțelului GX4CrNi13-4 încărcat prin sudură cu staturi tampon și straturi anticavitaționale (Paragraf 3.5.3.8).

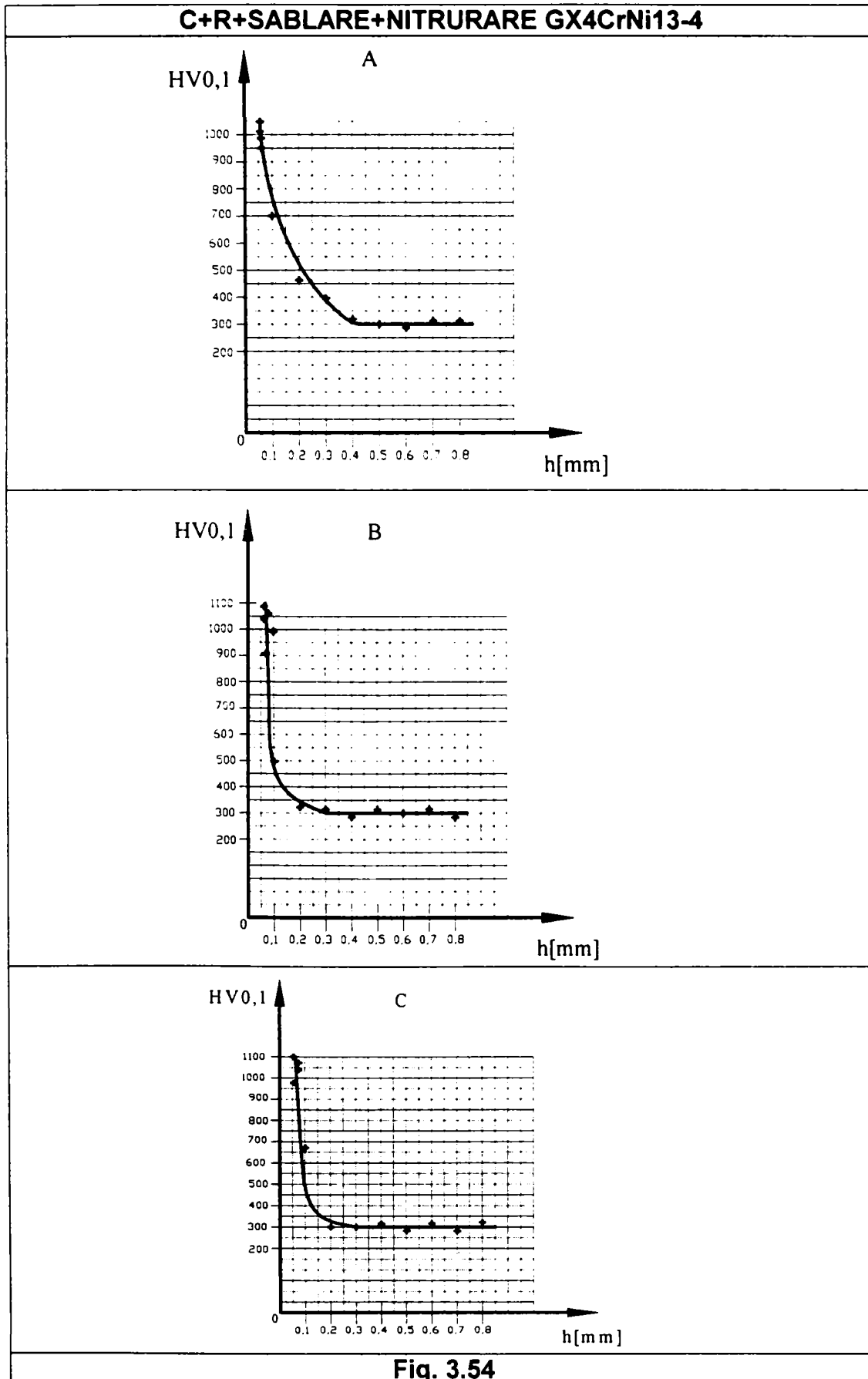


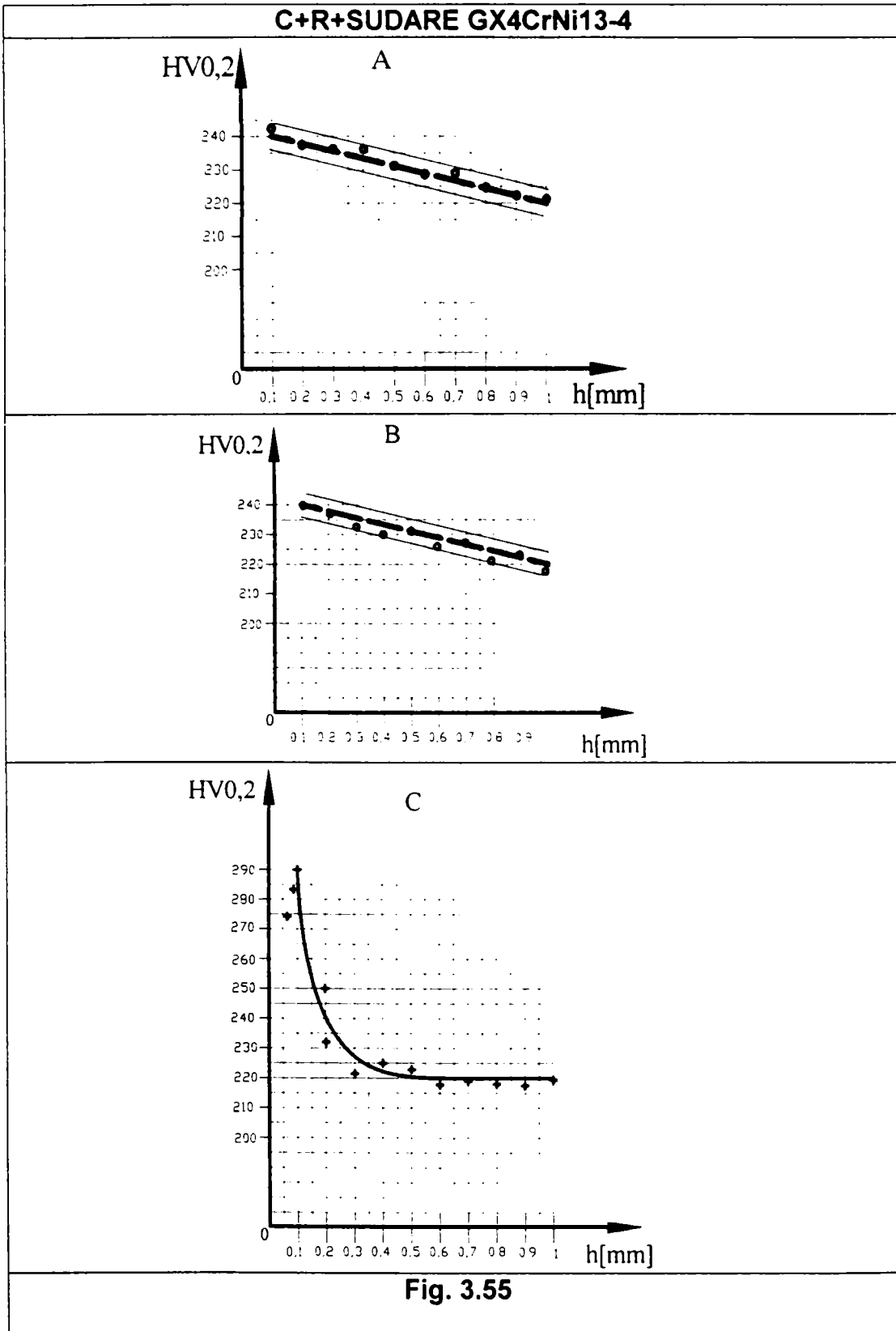












3.7. INFLUENȚA CALITĂȚII OȚELULUI ȘI A VARIANTELOR DE TRATAMENT TERMIC ASUPRA REZISTENȚEI CAVITAȚIONALE

3.7. 1. Rezultate macrostructurale.

Analiza macroscopică a probelor încercate la cavitație, folosind un microscop stereo, la diverse grosisme, mi-a permis să trag următoarele concluzii :

- erodarea cavitațională apare datorită acțiunii conjugate a presiunilor de impact, a variațiilor mari de temperatură din zona de implozie a bulelor cavitaționale, precum și a modificării rezistenței electrochimice a oțelului respectiv.
- distrugerea se manifestă prin apariția de erodări centrale, microfisuri la oțelul austenitic și microfisuri fine în zona centrală cu desprinderi de microgrăunți la oțelul martensitic GX4CrNi 13-4.
- la oțelul martensitic GX4CrNi 13-4, în zona centrală puternic atacată se constată, pe lângă desprinderi de microgrăunți și crearea de porozități.
- la ambele mărci (calități) de oțeluri, tratamentele termice de călire de punere în soluție la oțelul austenitic, respectiv călire și revenire la oțelul martensitic, urmate de tratamente de sablare și nitrurare gazoasă măresc considerabil rezistența la eroziune cavitațională, lucru de altfel constatat în Cap.3, din curbele de pierdere masică $m_a(t)$ și viteză de eroziune cavitațională $v(t)$. (vezi paragraful 3.4.9).
- comportarea cavitațională în ZIT este net superioară comparativ cu celelalte variante tehnologice de tratament termic.
- în zona influențată termic –ZIT apar mai puține microfisuri și o mai mică pătrundere în adâncime.
- distrugerea cavitațională la aceste oțeluri se face : uniform, progresiv, lent, fără mari cratere (spre deosebire de alte mărci de oțeluri cu care s-au comparat în paragraful 3.4.9).

Acest fapt dovedește că prin alegerea pentru studiu a acestor două mărci de oțeluri și variantele tehnologice de tratament termic aplicate, a fost bine făcută recomandându-le pentru turnarea rotoarelor de turbină hidraulică.

3.7.2 Rezultate microstructurale

Structura probelor din oțelurile inoxidabile GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 tratate termic prin călire de punere în soluție a oțelului austenitic, respectiv călire și revenire la cel martensitic , urmate de sablare, nitrurare gazoasă și încărcare prin sudare s-a prezentat în **Planșele 1-8** (Cap. 3.5.3.1 - 3.5.3.8).

Analiza structurală din zonele neafectate de atacul cavitațional – zonele A și din zonele afectate cavitațional - B₁, B₂, permite tragerea următoarelor concluzii :

- oțelul GX5CrNi19-10, tratat termic prin călire de punere în soluție prezintă o structură austenitică omogenă cu unii grăunți maclați.

- la acest tip de oțel în zonele afectate cavitațional -B₁,B₂ , apar microfisuri la limitele de grăunți, desprinderi de grăunți și expulzarea lor.
- se remarcă o finisare a granulației și precipitări de carburi complexe la limita și în interiorul grăunților austenitici
- oțelul martensitic GX4CrNi13-4, călit și revenit are o structură de martensită de revenire cu numeroase precipitări de carburi fine în acele de martensită.
 - în zonele afectate de cavitație se observa desprinderi de grăunți și microfisuri, pentru că în zona centrală (cea mai afectată de atacul cavitațional), să apară coroziuni puternice cu expulzare de grăunți cristalini.

În cazul aplicării tratamentului termic de nitrurare gazoasă, după călirea de punere în soluție respective călire și revenire , la ambele calități de oțeluri se constată :

- apariția într-un strat subțire de 0.1 mm de nitruri de fier și nitruri ale elementelor de aliere.
- apariția unui strat de tranziție format din nitruri precipitate în grăunții cristalini.
- erodarea cavitațională a stratului nitrurat se realizează prin expulzarea de grăunți cristalini.
- apar modificări structurale în stratul nitrurat datorită fenomenului complex de eroziune cavitațională.

Mecanismele erodării cavitaționale la aplicarea tratamentului termic de călire de punere în soluție urmat de sablare și nitrurare sunt identice cu cele descrise anterior: topiri zonale , crearea de microfisuri, modificări structurale în straturile superficiale, cu remarcă că în cazul acestei variante tehnologice de tratament termic , viteza de desfășurare a acestor mecanisme este mai mică, fapt ce justifică rezistența cavitațională mai ridicată.

Apar mici diferențe în ceea ce privește efectul sablării la cele două calități de oțeluri:

- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10 se constată microdeformații cauzate de impactul particulelor de sablare cu o grosime mică de strat nitrurat pe microasperitățile create de sablare.
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4 sablarea produce o finisare a granulației pe adâncimi de câțiva microni, fără a crea microasperități pe suprafața probei.
- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10 atacul cavitațional este mai puternic în microdenivelările create prin sablare.
- la ambele calități de oțeluri se observă microfisuri în stratul sablat și nitrurat, precum și microasperități datorate erozunii electrochimice.
- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10 se observă precipitări de faze intermetalice și carburi în foștii grăunți de austenită.
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4 apare o finisare de faze și de precipitate , precum și o dispersie mare a precipitatelor.

În concluzie , prin tratamentul de sablare se creează un microstrat durificat și unele precipitate de nitruri de Fe și ale elementelor de aliere, care măresc rezistența la atac cavitațional a acestor oțeluri.

În cazul în care probele încercate la cavitație sunt ***încărcate prin sudare*** după ce anterior au fost supuse tratamentului termic de călire de punere în soluție, respective călire și revenire, analiza metalografică scoate în evidență următoarelor aspecte:

- la ambele mărci de oțeluri apar creșteri dendritice ale grăunților perpendiculare pe frontul de sudare.
- o finisare de granulație în microstructuri în zona influențată termic cu numeroase precipitări fine de carburi intergranulare la oțelul austenitic, și precipitări de carburi complexe în metalul de bază la oțelul martensitic.
- microfisuri multiple la limitele de grăunți cristalini, finisarea grăunților cristalini și intensificarea separărilor de carburi complexe la limita grăunților în zonele B₁, B₂ - afectate de atacul cavitațional.

Distrugerea prin cavitație are la baza mecanismul de coroziune tenso-fisurantă cu expulzare de particule de material.

Straturile tampon și straturile anticavitaționale create prin sudare produc modificări structurale complexe, cu apariția în ZIT a unei granulații foarte fine, omogene precum și dispersia carburilor.

Acest fapt justifică mărirea rezistenței la eroziune cavitațională a acestei zone influențate termic, în cazul ambelor calități de oțeluri.

3.7. 3 Rezultate ale încercărilor de duritate

S-au făcut încercări de microduritate HV 0.2, folosind un microdurimetru TTM – 3.

Investigația s-a făcut în zonele neafectate de atacul cavitațional – zonele A, în cele de tranziție – zonele B, și în zonele centrale, cele mai erodate - zonele C (**vezi Fig. 3.47**), iar prelucrarea măsurătorilor și reprezentarea variației de duritate HV 0.2 este dată în **fig. 3.48 – 3.55**.

Măsurătorile de duritate efectuate pe probele încercate scot în evidență următoarele aspecte, funcție de varianta tehnologică de tratament termic aplicat celor două calități de oțeluri cercetate :

- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10, **tratat termic prin călire de punere în soluție** microduritățile inițiale HV 0.1 – 200 se conservă și în zonele afectate de cavitație HV 0.1 – 185, lucru confirmat și de investigația metalografică, în sensul că apar finisări de granulații și precipitări de carburi complexe la limita și interiorul grăunților.
- nici la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, nu s-au produs modificări structurale importante în aceste zone, după călire și revenire oțelul are duritatea medie HV 0.2 – 300 lucru în concordanță cu constituenții structurali evidențiați prin analiza metalografică (martensită de revenire, cu precipitări fine de carburi în acele de martensită).

În cazul probelor tratate termic prin ***călire de punere în soluție***, respectiv ***călire și revenire***, urmate de ***niturare gazoasă*** se constată :

- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10 în straturile superficiale, pe adâncimi mici de până la 0.1 mm apare un gradient de duritate HV 0.2 – 370, iar la

cel martensitic GX4CrNi13-4 gradientul fiind chiar mai mare HV 0.2 – 670 , în zona A -neafectată de atacul cavitațional.

- variația acestei durități este dată de precipitățile de nitruri în stratul superficial și în straturile de tranziție, precipitate care induc tensiuni de compresiune care justifică creșterea de duritate și mărirea rezistenței la coroziune.
- la oțelul GX5CrNi19-10 în zonele B și C afectate de cavitație, microduritățile sunt HV 0.2 – 270 , fiind de fapt egale cu cele din zona A, la adâncimi mai mari de 0.9 mm (neafectată de nitrurare), lucru explicat prin faptul că față de probele tratate termic numai prin călire de punere în soluție regimul de nitrurare gazoasă a indus în oțel stări de compresiune și a modificat și granulatia prin creșterea grăunților austenitici.
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, în substraturile zonei degradate prin atac cavitațional, duritatea este la nivelul HV 0.2 – 240 lucru normal deoarece măsurătorile s-au făcut în metalul de bază care are o structură dată de tratamentul termic de călire și revenire.
- și la adâncimi mai mari de 0.9 mm duritatea rămâne aceeași HV 0.2 – 240 .

În cazul probelor tratate termic prin călire de punere în soluție, respectiv călire și revenire urmate de tratamente de sablare (S) și nitrurare gazoasă (N) se evidențiază următoarele aspecte :

- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10, în stratul superficial – până la 0.2 mm apare o duritate mărită față de tratamentul termic de nitrurare gazoasă și anume HV 0.2 – 450 (zona A – neafectată de atacul cavitațional).
- aceeași mărire a durității pe adâncimi de până de la 0.1 mm se constată și la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, aici duritatea măsurată este HV 0.1 – 1000 (zona A), în zona de tranziție între 0.1 mm – 0.4 mm variația este HV 0.1 – 750 – 300, deci un gradient semnificativ al durității.
- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10, măsurările de duritate din zonele B și C – zone afectate cavitațional microduritățile se situează la nivelul HV 0.2 – 270, aceasta fiind de fapt duritatea materialului afectat de mecanismele erodării cavitaționale iar materialul are o duritate superioară stării inițiale de călire de punere în soluție . (lucru neelucidat în actuala fază a cercetărilor).
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, în zonele afectate de cavitație (B și C) la adâncimi de până la 0.1 mm duritatea variază mult de la HV 0.1 – 1100 până la HV 0.1 – 300 , iar la adâncimi mai mari de 0.3 mm ; duritățile măsurate se mențin constante HV 0.1 – 300 ; aceste variații de duritate sunt în deplină concordanță cu structura oțelului analizat la paragraful 3.5.3.7.

În cazul probelor tratate termic prin călire de punere în soluție pentru oțelul austenitic GX5CrNi19-10 , respectiv călire și revenire pentru oțelul martensitic GX4CrNi13-4, urmate de încărcarea prin sudare , măsurătorile de microduritate au scos în evidență următoarele :

- la oțelul austenitic GX5CrNi19-10, în zona neafectată de cavitație (A) pe adâncimi de până la 0.8 mm, duritățile sunt aceleași ca la oțelul supus numai tratamentului termic de călire de punere în soluție, HV 0.2 – 180 .

- în zonele afectate de cavitație B și C se constată ecrusări ale oțelului de HV 0.2 – 240 în zona B , iar în zona C – cea mai puternică atacată cavitațional , duritatea ajungând în stratul superficial HV 0.2 – 330 (Obs. : ecrusare neelucidată în faza actuală a cercetărilor, dar se presupune că prin procesele complexe induse de cavitație în straturile adiacente apar stări tensionale , care ar justifica acest gradient de duritate).
- la adâncimi mai mari de 0.7 mm , duritatea HV 0.2 – 190 este aceeași ca și la materialul tratat termic numai prin călirea de punere în soluție .
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, în zonele neafectate de atacul cavitațional – A și în zonele de tranziție, zonele – B, duritățile HV 0.2 – 220 sunt identice cu cele ale oțelului supus numai tratamentului termic de călire și revenire.
- se constată o ușoară creștere a durității la HV 0.2 – 285, valori în concordanță cu cele analizate la cercetarea metalografică a ZIT- ului oțelului GX4CrNi13-4, încărcat prin sudură cu straturi tampon și straturi anticavitaționale (Paragraf 3.5.3.8).

3.7.4 CONCLUZII

Din analiza metalografică, macroscopică și microscopică precum și din măsurătorile de microduritate pe probele din oțelul austenitic GX5CrNi19-10 și martensitic GX4CrNi13-4 încercate la cavitație, din punct de vedere a influenței calității oțelului și a variantelor de tratament termic asupra rezistenței cavitaționale se pot trage următoarele concluzii:

- din toate variantele tehnologice de tratament termic aplicate celor două calități de oțeluri, tratamentul termic de călire de punere în soluție pentru oțelul austenitic GX5CrNi19-10, respectiv călire și revenire în cazul oțelului martensitic GX4CrNi13-4, urmate de **tratamente de sablare și nitrurare gazoasă rezultă că această ultimă variantă de tratament conferă oțelurilor cea mai mare rezistență la eroziune cavitațională.**
- încercările experimentale la cavitație pe probele confecționate din oțelul austenitic GX5CrNi19-10 și martensitic GX4CrNi13-4, au arătat că **oțelul martensitic are rezistență mai bună la eroziune cavitațională în variantele tehnologice de tratament termic de călire și revenire, respectiv sablare și nitrurare,** recomandându-l cu prioritate la turnarea rotoarelor de turbină hidraulică.
- ZIT-ul probelor sudate ale ambelor oțeluri are o bună comportare la cavitație ceea ce atestă faptul că procedeul și tehnologia de sudare folosită sunt compatibile.

CAPITOLUL 4

CALCULE ESTIMATIVE TEHNICO - ECONOMICE

4. EVALUAREA COSTURILOR LA REPARAȚIA DE CAVITAȚIE

DEVIZ DE CHELTUIELI

Conform H.G. 2139/30.11.2004 "Pentru aprobarea catalogului privind clasificarea și duratele normale de funcționare a mijloacelor fixe" la grupa 2.1.16. care se referă la "Mașini de forță și utilaje energetice", durata de funcționare pentru o turbină hidraulică este cuprinsă în intervalul 12-22 ani iar a generatorului electric între 22-34 ani.

Conform "Deviz-4.3", pentru evaluarea costurilor la reparația de cavitație pentru un agregat din CHE Porțile de Fier I, costurile calculate pentru un rotor sunt $C_R = 90.000$ € pentru oțelul martensitic și 88.000 € pentru oțelul austenitic.

4.1 Calculul costurilor în cazul oțelului martensitic GX4CrNi13-4

Durata actuală între două reparații cu recondiționarea la cavitație este de 8.000 ore în cazul rotoarelor de turbină turnate din **oțeluri martensitice** supuse tratamentului termic de **călire și revenire**.

O turbină funcționează în medie 6.000 ore /an, rezultând în acest fel $22 \times 6.000 = 132.000$ ore de funcționare a unei turbine până la scoaterea din uz.

Numărul total de intervenții în această perioadă va fi :

$$N_{T1} = 132.000 / 8.000 = 17 \text{ intervenții.}$$

Conform " Deviz-4.3 " costul unei intervenții este :

$$C_R = 90.000 \text{ €}$$

deci în cele 17 intervenții costurile totale vor fi :

$$C_{T1} = C_R \times N_{T1} = 17 \times 90.000 = 1.530.000 \text{ €}$$

La oțelul inoxidabil martensitic GX4CrNi13-4 masa de material erodat după 165 de min. de atac cavitațional după tratarea în diferite variante tehnologice [Cap. 2 paragraf 2.4.2] este :

$$m_a(C+R) = 17,63 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$m_a(N) = 14,81 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$m_a(S+N) = 12,40 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$m_a(\text{sudat})=11.03 \text{ <g>}$$

DEFINITIE : K-coeficientul indicelui relativ al rezistenței la eroziune cavitațională, se definește ca fiind raportul dintre masa cea mai mare de material erodat după 165 min. de atac cavitațional și masele erodate în cazul diferitelor variante tehnologice de tratament termic.

$$K_1 = 1.0$$

$$K_2 = m_a(C+R)/m_a(N) = 1,2$$

$$K_3 = m_a(C+R)/m_a(S+N) = 1,4$$

$$K_4 = m_a(C+R)/m_a(\text{sudat}) = 1,6$$

Tabelul 4.1

Tratament termic	Austenitic	Martensitic
Călire de punere în soluție	8 cenți / kg h x 19.500 kg x 6h = 9.360 € / paletă	-
Călire	-	8 cenți / kg x h x 19.500 kg x 6h = 9.360 €
Revenire	-	4 cenți / kg h x 19.500 kg x 3 h = 2.340 €
Sablare	12 € / h x 16 h = 192 € / paletă	12 € / h x 16 h = 192 € / paletă
Nitrurare	20 cenți / kg x 19.500kg = 3.900 € / paletă	20 cenți / kg x 19.500kg = 3.900 € / paletă
Total / paletă	13.452 €	15.792 €
Total / rotor	80.712 €	94.752 €

NOTĂ : Un rotor din CHE PDF I are:

- n= 6 palete;
- m= 19.500 kg / paletă

VARIANTA I- Oțelul este supus tratamentului termic de călire , revenire și nitrurare gazoasă.

Va rezulta că intervalul între două intervenții cu recondiționare la cavitație este :

$$I = \text{nr.ore} \times K_1 = 8000 \times 1,2 = 9.600 \text{ ore}$$

$$I = \text{nr.ore} \times K_4 = 8000 \times 1,6 = 12.800 \text{ ore}$$

Numărul total de intervenții în perioada de viața a turbinei va fi în acest caz :

$$N_{T2} = 1 + (132.000 - 12.800) / 12.800 = 1 + 10 = 11 \text{ intervenții}$$

Costul total al intervențiilor cu recondiționarea prin sudare la cavitație va fi :

$$C_{T2} = N_{T2} \times C_R = 11 \times 90000 = 990.000 \text{ €}$$

Costurile cu tratamentul termic de nitrurare :

$$C_T(N) = 20 \text{ cenți/kg} \times 19.500 \text{ kg} \times 6 \text{ palete} = 23.400 \text{ € /turbină}$$

Costurile totale se vor calcula prin însumarea costurilor intervențiilor cu recondiționarea la cavitație cu costurile cu nitrurarea:

$$C_{tot} = C_{T2} + C_T(N) = 990.000 + 23.400 = 1.013.400 \text{ €}$$

Diferența de costuri va fi :

$$\Delta C_{TI} = C_{T1} - C_{tot} = 1.530.000 - 1.013.000 = 516.600 \text{ €}$$

Deci o reducere a costurilor cu reparațiile de 34%.

VARIANTA II- Oțelul este supus tratamentului termic de călire , revenire, sablare și nitrurare gazoasă.

Va rezulta că intervalul între doua intervenții cu recondiționare la cavitație este :

$$I = \text{nr.ore} \times K_2 = 8.000 \times 1,4 = 11.200 \text{ ore}$$

Numărul total de intervenții în perioada de viața a turbinei va fi în acest caz :

$$N_{T3} = 1 + (132.000 - 11.200) / 12.800 = 1 + 9 = 10 \text{ intervenții}$$

Costul total al intervențiilor va fi :

$$C_{T3} = N_{T3} \times C_R = 10 \times 90.000 = 900.000 \text{ €}$$

Costurile cu tratamentul termic de nitrurare :

$$C_T(N) = 20 \text{ cenți/kg} \times 19500 \text{ kg} \times 6 \text{ palete} = 23.400 \text{ € /turbină}$$

Costurile cu tratamentul de sablare :

$$C_T(S) = 12 \text{ Euro/ora} \times 16 \text{ ore} \times 6 \text{ palete} = 1.152 \text{ € /turbină}$$

Costurile totale se vor calcula prin însumarea costurilor intervențiilor cu recondiționarea la cavitație cu costurile cu nitrurarea și cu sablarea:

$$C_{tot} = C_{T3} + C_T(S) = 900.000 + 23.400 + 1.152 = 924.552 \text{ €}$$

Diferența de costuri va fi :

$$\Delta C_{TII} = C_{T1} - C_{tot} = 1.530.000 - 924.552 = 605.448 \text{ €}$$

Deci o reducere a costurilor cu reparațiile de 40 %.

4.2 Calculul costurilor în cazul oțelului austenitic GX5CrNi19-10

Durata actuală între două reparații cu recondiționarea la cavitație este de 6.000 de ore în cazul rotoarelor de turbină turnate din **oțeluri austenitice** supuse tratamentului termic **de călire de punere în soluție**.

O turbină funcționează în medie 6.000 ore /an, rezultând în acest fel **22 x 6.000 = 132.000 ore** de funcționare a unei turbine până la scoaterea din uz.

Numărul total de intervenții în această perioadă va fi :

$$N_{T1} = 132.000 / 6.000 = 22 \text{ intervenții.}$$

Conform "Deviz-4.3" costul unei intervenții este :

$$C_R = 88.000 \text{ €}$$

deci în cele 22 intervenții costurile totale vor fi :

$$C_{T1} = C_R \times N_{T1} = 22 \times 88.000 = 1.936.000 \text{ €}$$

La oțelul inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10 masa de material erodat după 165 de min. de atac cavitațional după tratarea în diferite variante tehnologice [Cap. 2 paragraful 2.4.1] este :

$$m_a(\text{CS}) = 18,26 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$m_a(\text{N}) = 12,99 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$m_a(\text{S+N}) = 11,74 \times 10^{-3} \text{ <g>}$$

$$K_1 = 1,0$$

$$K_2 = m_a(\text{CS}) / m_a(\text{N}) = 1,4$$

$$K_3 = m_a(\text{CS}) / m_a(\text{S+N}) = 1,5$$

$$K_4 = m_a(\text{CS}) / m_a(\text{SUDAT}) = 2,7$$

VARIANTA I- Oțelul austenitic GX5CrNi19-10 este supus tratamentului termic de călire de punere în soluție și nitrurare gazoasă.

Va rezulta că intervalul între doua intervenții cu recondiționare la cavitație este :

$$l = \text{nr.ore} \times K_1 = 6.000 \times 1,4 = 8.400 \text{ ore}$$

$$l = \text{nr.ore} \times K_4 = 6.000 \times 2,7 = 16.200 \text{ ore}$$

Numărul total de intervenții în perioada de viața a turbinei va fi în acest caz :

$$N_{T2} = 1 + (132.000 - 8.400) / 16.200 = 1 + 8 = 9 \text{ intervenții}$$

Costul total al intervențiilor cu recondiționarea la cavitație va fi :

$$C_{T2} = N_{T2} \times C_R = 9 \times 88.000 = 792.000 \text{ €}$$

Costurile cu tratamentul termic de nitrurare :

$$C_T(N) = 20 \text{ cenți/kg} \times 19.500 \text{ kg} \times 6 \text{ palete} = 23.400 \text{ € /turbină}$$

Costurile totale se vor calcula prin însumarea costurilor intervențiilor cu recondiționarea la cavitație cu costurile cu nitrurarea:

$$C_{\text{tot}} = C_{T2} + C_T(N) = 792.000 + 23.400 = 815.400 \text{ €}$$

Diferența de costuri va fi :

$$\Delta C_{T1} = C_{T1} - C_{\text{tot}} = 1.936.000 - 815.400 = 1.120.600 \text{ €}$$

Deci o reducere a costurilor cu reparațiile de 58%.

VARIANTA II- Oțelul austenitic GX5CrNi19-10 este supus tratamentului termic de călire de punere în soluție , sablare și nitrurare gazoasa.

Va rezulta că intervalul între doua intervenții cu recondiționare la cavitație este :

$$l = \text{nr.ore} \times K_2 = 6.000 \times 1,5 = 9.000 \text{ ore}$$

Numărul total de intervenții în perioada de viața a turbinei va fi în acest caz :

$$N_{T3} = 1 + (1.320.00 - 9.000) / 16.200 = 1 + 8 = 9 \text{ intervenții}$$

Costul total al intervențiilor va fi :

$$C_{T3} = N_{T3} \times C_R = 9 \times 88.000 = 792.000 \text{ €}$$

Costurile cu tratamentul termic de nitrurare :

$$C_T(N) = 20 \text{ cenți/kg} \times 19.500 \text{ kg} \times 6 \text{ palete} = 23.400 \text{ € /turbină}$$

Costurile cu tratamentul de sablare :

$$C_T(S) = 12 \text{ € /ora} \times 16 \text{ ore} \times 6 \text{ palete} = 1.152 \text{ € /turbină}$$

Costurile totale se vor calcula prin însumarea costurilor intervențiilor cu recondiționarea la cavitație cu costurile cu nitrurarea și cu sablarea:

$$C_{\text{tot}} = C_{T3} + C_T(S) = 792.000 + 23.400 + 1152 = 816.552 \text{ €}$$

Diferența de costuri va fi :

$$\Delta C_{TII} = C_{T1} - C_{\text{tot}} = 1.936.000 - 816.552 = 1.119.448 \text{ €}$$

Deci o reducere a costurilor cu reparațiile de 58%.

In Tabelul 4.2 se prezintă sintetic rezultatele studiului economic.

OBSERVAȚIE: Calculul costurilor pentru cele două mărci de oțel s-a făcut pentru un rotor din CHE Porțile de Fier I, care are n=6 palete, o masă m = 19.500 Kg.

Tabelul 4.2. Compararea rezultatelor obținute din calculele efectuate pentru oțelul austenitic și martensitic

Tratament termic	MARTENSITIC GX4CrNi13-4				AUSTENITIC GX5CrNi19-10				(*) $\Delta C_T = C_T(M) - C_T(A)$ [milioane] €
	K	Nr intervenții	Costuri		K	Nr. intervenții	Costuri		
			C_{Totale} [milioane] €	$C_{Reducere}$ [%]			C_{Totale} [milioane] €	$C_{Reducere}$ [%]	
C+R	1	17	1,530	bază	X	X	X	X	0,406
CS	X	X	X	X	1	22	1,936	bază	
N+ SUDAT	1,6	11	1,013	34	2,7	9	0,815	58	0,198
S+N +SUDAT	1,6	10	0,925	40	2,7	9	0,816	58	0,109

NOTA:

- K- coeficientul indicelui relativ al rezistenței la eroziune cavitațională
- $C_{Reducere}$ (%) --reducerea C_{Totale} prin aplicarea diferitelor variante de tratament termic
- (*) ΔC_T – reprezintă diferența dintre costurile totale ale celor doua mărci de oțel; $\Delta C_T = C_T(M) - C_T(A)$

4.3 Deviz pentru calculul costurilor la reparația de cavitație

4.3.1 Date de intrare pentru evaluarea costului la reparația de cavitație pentru un agregat din CHE Porțile de Fier I durata reparației = 60 zile calendaristice

Evaluarea cantităților se va face conform structurii impuse mai jos :

1. Montare – Demontare platformă sub rotor pentru lucrări la cavitație .
2. Montare grup pompare și dispozitive pentru manevrare închidere – deschidere rotor.
3. Lucrări de remediere (polizare + încărcare) a suprafețelor afectate de cavitație la paleteleroarelor.

3.1. Materiale utilizate Cap. 2.4.2.4, și cap. 2.4.1.4.

- Electrode cu înveliș austenitic Selectarc 18.8 Mn
Dimensiuni : Φ 2,5; 3,25; 4 mm
- Electrode special rezistent la cavitație UTP 730
Dimensiuni : Φ 2,5; 3,25; 4 mm

OBSERVAȚIE :

- Pentru evaluarea volumului de materiale utilizate la reparația cavitației pe suprafața paleteleroarelor va fi luată în considerare suprafața totală de $S_{total} = 1,4 \text{ m}^2$ (pentru 6 palete) și adâncimea maximă de 4,5 mm. Aceasta este aria erodată de cavitația de vârtej. Suplimentar apare și cavitația de de profil pe o arie mare ($S=4,8\text{m}^2$) și adâncime mică de 0,1-0,2 mm. Materialul paleteleroarelor este inițial tratat prin nitrurare sau sablare și nitrurare. Precizez că după un timp ($T=9600+2 \times 12.600=34.800$ ore) intervențiile se vor face simultan atât pentru cavitația de vârtej cât și pentru cea de profil.

- Forma geometrică a defectului în secțiunea transversală va fi asimilată cu o concavitate de formă eliptică care trebuie încărcată cu material austenitic , electrode Selectarc 18.8 Mn până când se realizează o suprafață plană cu 1,5 mm sub cota finală după care:

- Se va acoperi cu sudură ultima porțiune a suprafeței cu un strat de 1,5 mm UTP 730

3.2. Preturi estimative :

- UTP 730 = 36 € /kg
- Pentru electrode austenitic Selectarc 18.8 Mn = 10 € /kg

4. Valoarea manoperei :

- volum om ore = aproximativ 10.000 ore
- tarif orar = 72.780 lei/oră

OBSERVAȚIE: -Devizul de calcul s-a efectuat ținând cont de reglementările legale în vigoare și anume:

- **Legea 571/2003** – *Codul Fiscal*
- **Legea 19/2000** — *Legea pensiilor și a asigurărilor sociale de stat.* (MO. 140/01.04. 2000).
- **Legea 76/2002** — *Legea fondului de șomaj.* (MO. 103/06.02. 2002).

4.3.2 Deviz de calcul pentru reparația la cavitație a turbinelor.

Tabelul 4.3

Nr. crt.	Cheltuieli	Valoare [€]	
		Oțel martensitic	Oțel austenitic
1	Materii prime și materiale	7.988	6.607
2	Manoperă	19.882	19.882
3	Cheltuieli cu CAS 24,5 %(2) și protecție socială 11,6% (2)	7.177	7.177
4	Cheltuieli comune unității 74% (2+3)	20.023	20.023
5	Total cost compartiment (1+2+3+4)	55.070	53.689
6	Cheltuieli indirecte 25%(5)	13.767	13.422
7	Total (5+6)	68.837	67.112
8	Beneficiu 10% (7)	6.883	6.711
9	Total(7+8)	75.720	73.823
10	TVA 19 % (9)	14.386	13.667
11	Total general (9+10)	90.106	87.850
12	Total rotunjit	90.000	88.000

Calculul s-a făcut pe baza datelor de intrare-4.3.1 pentru un rotor, numai pentru paletă și nu și pentru butuc și camera rotorului. Rezultatele fiind centralizate în **Tabelul 4.3.**

4.4 CONCLUZII

a) Diferența de costuri cu intervențiile pentru recondiționarea la cavitație a oțelurilor austenitice și a celor martensitice tratate termic în diferite variante tehnologice variază între 0,109 și 0,198 mil. € [vezi Tabel 4.2-(*) ΔC_T]

b) prețurile de livrare (vânzare) practicate de firmele de profil, a celor două mărci de oțeluri sunt :

- pentru oțeluri austenitice $P_A = 4.530 \text{ € / tonă}$
- pentru oțeluri martensitice $P_M = 2.671 \text{ € / tonă}$

rezultând că, costul cu materialele pentru un rotor din oțel austenitic este 530.010 €, iar pentru un rotor din oțel martensitic este 312.507 €.

Deci prețul unui rotor turnat din oțel austenitic GX5CrNi19-10 este mai mare decât al unui rotor turnat din oțel martensitic GX4CrNi13-4 cu 217.503 €.

c) În final, pe baza calculelor tehnico - economice se recomandă ca pentru grupurile din CHE cu puteri instalate mai mari de 1 MW /grup turnarea rotoarelor să se facă din oțel martensitic GX4CrNi13-4 și dacă există posibilități din punct de vedere al dotărilor uzinale, să li se aplice după tratamentul termic de călire + revenire și tratamente de sablare și niturare.

CAPITOLUL 5

CERCETĂRI PRIVIND CONCEPEREA, PROIECTAREA, ȘI REALIZAREA UNUI APARAT VIBRATOR MAGNETOSTRICTIV CU GENERATORUL DE ULTRASUNETE DIN COMPONENTE SEMICONDUCTOARE

5.1 Sisteme autooscilante generatoare de câmpuri magnetice alternative. Generalități

Una din cele mai folosite metode pentru producerea oscilațiilor (ultra)acustice se bazează pe **fenomenul de magnetostricțiune**.

În anul 1847 J. P. Joule a constatat experimental că o bară confecționată dintr-un material feromagnetic, introdusă într-un câmp magnetic, își modifică dimensiunile.

Materialele feromagnetice au proprietăți magnetice asemănătoare cu ale fierului, menținându-și magnetizarea (parțial) și după ce a fost înlăturată cauza care a produs-o. Cele mai cunoscute substanțe feromagnetice sunt fierul, nichelul, cobaltul precum și anumite aliaje ale acestora.

Experiența arată că la magnetizarea sau demagnetizarea unei bare feromagnetice, lungimea acesteia variază. Această modificare relativă a lungimii barei este foarte mică. Unele materiale ca nichelul și cobaltul se contractă în prezența unui câmp magnetic, fierul se dilată la valori mici ale câmpului și se contractă la valori mari ale acestuia. Unele aliaje feromagnetice își măresc însă dimensiunile la creșterea intensității câmpului magnetic.

Efectul magnetosrictiv depinde, în afara de natura materialului utilizat, și de alți factori : tratamentul termic aplicat substanțelor utilizate, temperatura barei precum și de mărimea și direcția câmpului magnetic aplicat. Alungirea relativă pe care o suferă o bară este dată de relația:

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (5.1)$$

unde λ este coeficientul static al magnetostricțiunii.

Un tub de nichel având lungimea de 1 mm se contractă cu $30 \cdot 10^{-6}$ m adică coeficientul de magnetostricțiune al nichelului este de $-30 \cdot 10^{-6}$ pentru o intensitate a câmpului magnetic de 0.5A/m.

În cazul în care câmpul magnetic variază în timp în așa fel încât frecvența sa este egală cu frecvența de rezonanță mecanică a barei, amplitudinea deformației va fi maximă și poate atinge valori de ordinul a 10^{-4} m.

Temperatura tubului are o mare influență asupra efectului magnetostrictiv, în sensul că deformația acesteia scade pe măsura ce temperatura crește. (La o anumită temperatură, care depinde de caracteristicile materialului, efectul menționat dispare cu totul, la Ni această temperatură este $T \approx 400^{\circ} \text{C}$)

Dacă un tub din material magnetostrictiv este supus acțiunii unui câmp magnetic alternativ ale cărui linii sunt paralele cu axa oscilatorului, el oscilează cu o frecvență egală cu dublul frecvenței câmpului, deoarece variația dimensiunilor acestuia depinde doar de intensitatea câmpului, nu și de sensul acestuia.

În cazul în care asupra tubului acționează concomitent cu câmpul alternativ și un câmp magnetic continuu cu rol de premagnetizare (sau polarizare), frecvența de oscilație va fi egală cu frecvența câmpului alternativ iar amplitudinea oscilațiilor va crește mult.

Graficul din **fig. 1** ilustrează acest aspect :

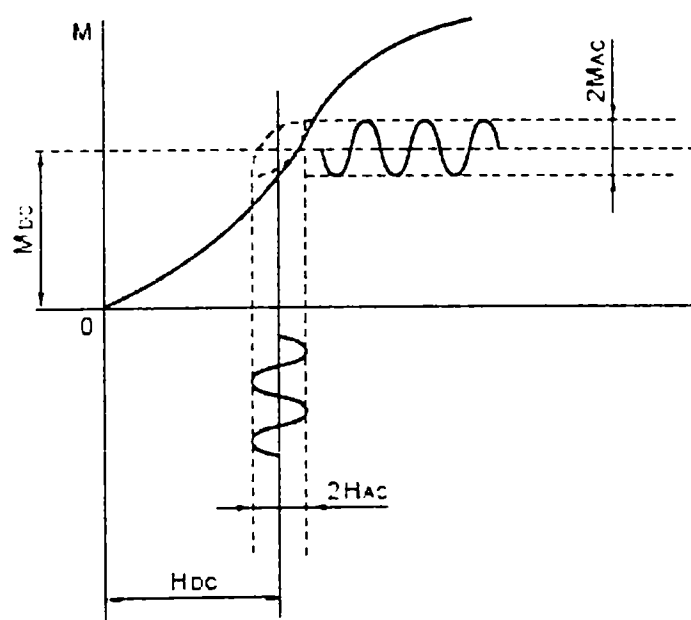


Fig. 5.1 Efectul câmpului de premagnetizare asupra amplitudinii oscilațiilor mecanice

În cadranul I este reprezentată evoluția intensității câmpului magnetic. Acesta se compune dintr-o componentă continuă, de premagnetizare, notată cu M_{dc} , peste care se adună câmpul alternativ M_{ac} . În cadranul IV este reprezentată deformarea mecanică a barei. Se poate observa că pentru valori mici ale lui M_{dc} , câmpul rezultat va schimba de semn. Deoarece sensul deformației nu depinde de acest semn, se poate deduce că frecvența oscilațiilor se va dubla dar amplitudinea acestora

va scădea [142] La aparatul vibrator T1 (Potencz-1958) componenta continuă a câmpului magnetic este produsă de jugul magnetic și bobinele 7 (Cap. 3 Fig.3.1).

În practică, câmpul magnetic alternativ poate fi produs cu ajutorul tuburilor electronice sau al tranzistoarelor. În **figura 5. 2** este prezentată schema de principiu a unui generator de ultrasunete realizat cu ajutorul unui tub electronic de mare putere, de tip trioda. [55]

Este vorba despre un sistem autooscilant, care generează un câmp magnetic alternativ cu o frecvență egală cu frecvența de rezonanță electrică a circuitului oscilant format din L_1 și C_1 . Frecvența de lucru se determină conform formulei lui Thomson :

$$F_o[Hz] = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 \cdot C_1}} \quad (5.2)$$

Condensatorul variabil C_1 se poate regla în așa fel încot frecvența de lucru a circuitului să corespundă cu frecvența de rezonanță mecanică a barei.

Tubul este fixat la mijlocul lungimii sale, într-un punct care constituie un nod, adică amplitudinea oscilațiilor este minimă. L_2 este bobina de reacție și are rolul de a aduce o parte din semnalul generat, înapoi la intrarea sistemului, fapt care permite automenținere oscilațiilor. Energia necesară funcționării sistemului se obține din sursa de tensiune anodica U_a . O a doua sursă U_f are rolul de a alimenta filamentul triodei U , care asigură temperatura de lucru a catodului acesteia. Se observă că nu apare în această schemă nici o referire la curentul de premagnetizare al barei.

În fapt, prin bobina L_1 circulă în afară de curentul alternativ de înaltă frecvență, și un curent continuu de o anumită valoare, datorită chiar modului de funcționare al triodei.

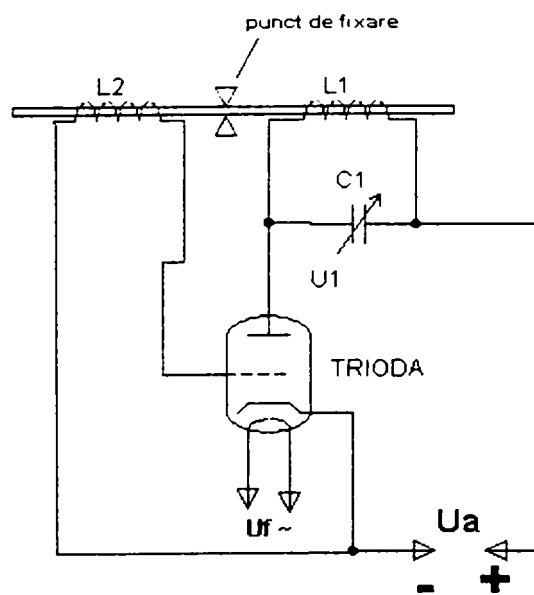


Fig.5.2 Schema de principiu a unui generator cu magnetostricțiune

Acest curent poate crea un câmp magnetic continuu, suficient de intens pentru a asigura polarizarea magnetică a barei. Dacă acest câmp este insuficient, se poate utiliza un sistem separat de premagnetizare, pe baza de electromagneți sau chiar de magneți permanenți.

În practică apar însă o serie de fenomene nedorite care afectează buna funcționare a sistemelor care generează ultrasunete prin această metodă.

Deoarece câmpul magnetic alternativ produs de L_1 are o frecvență mare, variația rapidă a acestuia va induce în toate corpurile conductoare străbătute de liniile de câmp, deci și în tubul de material feromagnetic, niște tensiuni electrice alternative.

Aceste tensiuni sunt cu atât mai mari cu cât viteza de variație a fluxului magnetic este mai mare, deci cu cât frecvența curentului prin bobină este mai mare.

Fiindcă materiale feromagnetice folosite la confecționarea tuburilor oscilatoare sunt bune conductoare de electricitate, în interiorul acestora vor apărea *curenți electrici induși*, numiți și curenți "Foucault", care duc la pierderi importante de energie precum și la încălzirea puternică a materialului respectiv. Odată cu încălzirea barei se produce o modificare, prin dilatare termică, a dimensiunilor acesteia, deci și o variație a frecvenței proprii de oscilație mecanică fapt care duce la dereglarea funcționării sistemului. De asemenea, o creștere a temperaturii duce și la o diminuare a randamentului prin scăderea amplitudinilor oscilației barei.

Pentru a contracara aceste fenomene, în bara magnetostrictivă se frezează, dealungul generatoarei două canale diametral opuse de 0,8 mm. În acest fel se realizează o "rupere" a continuității electrice a materialului respectiv, fapt care duce la o reducere semnificativă a încălzirii materialului.

O altă abordare constă în folosirea unor materiale speciale de tipul feritelor la confecționarea barelor rezonatoare. Feritele sunt materiale obținute prin sinterizarea unor pulberi feromagnetice. Ele sunt constituite din particule foarte mici de material feromagnetic, izolate unele de altele datorita liantului dielectric care le leagă. Din aceasta cauza, conductibilitatea electrică a unui miez de ferită este foarte redusă, fapt care permite funcționarea acestora până la frecvențe de ordinul sutelor de KHz. (ca un dezavantaj al feritelor trebuie arătat faptul ca acestea sunt casante și foarte dificil de prelucrat prin mijloace mecanice). În **figura 5.3** este prezentat un astfel de rezonator, confecționat din ferita, utilizat în diferite aplicații industriale, [141].

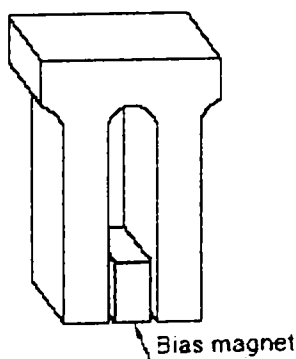


Fig. 5.3 Rezonator din ferită

Se poate observa că, încă din fabricație, problema premagnetizării materialului este rezolvată cu ajutorul unui magnet permanent din material ceramic.

În ceea ce privește implementarea practică a părții electronice a unui generator cu magnetostricțiune, pot exista două abordări diferite în funcție de categoria de dispozitive electronice folosite: **tuburi electronice sau tranzistoare**.

Tuburile electronice sunt folosite încă, mai ales în cadrul aparatelor de foarte mare putere având avantajul robusteții electrice. Acestea prezintă însă o serie de dezavantaje majore cum ar fi: necesitatea existenței unor surse de alimentare de înaltă tensiune și a unor surse auxiliare pentru alimentarea filamentelor, folosirea unor componente de înaltă tensiune, fenomenul de uzură care duce la degradarea parametrilor funcționali în timp, timp relativ lung de așteptare la punerea în funcțiune, necesitatea unor sisteme costisitoare de adaptare cu sarcină, etc. Se poate afirma însă ca cel mai mare dezavantaj al tuburilor electronice este faptul ca sunt "demodate".

Din cauza faptului că nu se mai produc pe scară largă, acestea au devenit la ora actuală deosebit de scumpe și dificil de înlocuit în caz de defectare.

În același timp dispozitivele semiconductoare au devenit din ce în ce mai atractive atât din punct de vedere al prețului de cost, cât și al performanțelor electrice, astfel încât astăzi se preferă utilizarea acestora chiar și în cazul aparatelor industriale de mare și chiar de foarte mare putere.

5.2 Cercetări privind înlocuirea părții electronice a aparatelor vibratorii de tip T1 (Potencz-1958) cu componente semiconductoare T3 (Pădurean-2005)

Scopul a fost de a înlocui partea electronică a instalației respective T1 cu o versiune nouă, bazată pe dispozitive semiconductoare. Acest lucru a devenit necesar deoarece vechiul sistem este depășit din punct de vedere tehnologic, fiind realizat pe baza de tuburi electronice, iar menținerea sa în stare de bună funcționare este foarte costisitoare.

In acest scop mi-am propus în prima fază o abordare teoretică a noii instalații, precum și o realizare practică, la o scară redusă de putere, a unui generator ultrasonor pe bază de semiconductoare. În acest fel va putea fi verificată fezabilitatea acestei noi concepții, se vor putea desprinde unele concluzii asupra performanțelor cât și asupra problemelor care pot apărea și în cazul unei instalații la scară reală.

Precizez ca se intenționează păstrarea pentru faza actuală, a sistemului de tuburi rezonatoare din nichel pe frecvența de ≈ 7 KHz fără sistemul de premagnetizare

4

5.3 Generator de ultrasunete prin magnetostricțiune pe baza de semiconductoare

5.3.1 Sisteme rezonatoare în condiții reale de funcționare

Pentru început se vor analiza unele aspecte legate de comportarea unui sistem rezonator în condiții reale de funcționare. Așa cum s-a arătat anterior, câmpul magnetic alternativ aplicat barei rezonatoare, este produs de o inductanță. Pentru a compensa comportarea reactivă a acesteia se preferă legarea în serie sau în paralel cu aceasta, a unei capacități [141]

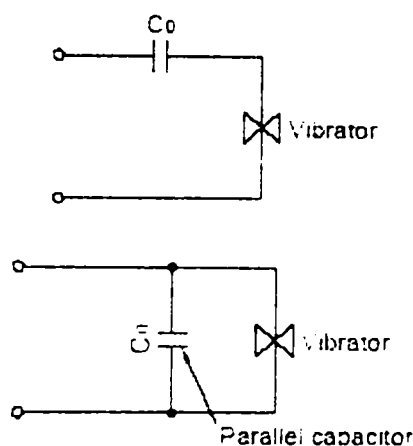


Fig.5. 4 Conectarea în serie (sus) sau în paralel (prin vibrator se înțelege bobina acestuia)

În cazul conectării serie, se alege valoarea lui C_0 în așa fel încât să se obțină rezonanța electrică, de tip serie, a circuitului tocmai pe frecvența de lucru a barei. În această situație impedanța circuitului va avea o valoare minimă, deci curentul prin bobina vibratorului va atinge o valoare maximă.

În cazul conectării de tip paralel, la rezonanță, impedanța circuitului are valoarea maximă.

Deoarece amplificatoarele realizate cu tranzistoare sunt alimentate la tensiuni relativ joase, este preferabilă varianta de circuit de tip serie, care se adaptează mai bine cu impedanța internă mică a unui asemenea amplificator. Aceasta soluție permite obținerea unei amplitudini mult mai mari a tensiunii de la bornele bobinei, valoarea acesteia depășind de câteva ori nivelul tensiunii de alimentare al montajului respectiv.

În realitate însă, comportarea circuitului este influențată și de o serie de alți factori, care trebuie luați în considerație :

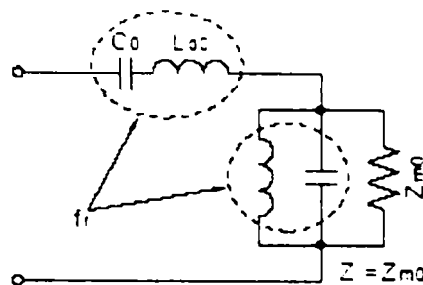


Fig.5.5 Schema reală a unui circuit rezonator de tip serie

După cum se poate observa din **fig. 5.5**, mai apare și o inductanță parazită a condensatorului, notată cu L_{d0} , precum și o capacitate parazită a bobinei. Z_{m0} reprezintă impedanța de sarcină și se datorează tocmai acțiunii tubului din material magnetostrictiv. Aceasta impedanță este destul de dificil de determinat pe cale teoretică deoarece depinde de mai mulți factori :

- caracteristicile mediului în care se generează oscilațiile
- suprafața radiantă a undelor ultrasonore
- modul în care este fixată bara vibratoare
- temperatura vibratorului și a mediului
- amplitudinea vibrațiilor
- dacă se produce sau nu fenomenul de cavitație
- impedanța cablurilor electrice de legătură precum și diversele capacități parazite care mai pot apărea în sistem.

Tinând seama de toate aceste variabile, este evident faptul că punerea la punct a unui sistem funcțional este o sarcină destul de dificilă, necesitând o abordare pragmatică a problemelor, mai ales când nu există suficientă experiență în acest domeniu.

Schema bloc a unui generator de ultrasunete prin magnetostricțiune este prezentată în **figura 5. 6**. După cum se observa, un asemenea aparat conține un **oscilator reglabil** care servește la producerea semnalului electric pe frecvența dorită.

Acesta comandă un **amplificator**, care are rolul de a genera prin bobina rezonatorului un curent de aceeași frecvență, dar la un nivel de putere mult mai mare.

Blocul circuitelor de alimentare are rolul de a asigura tensiunile necesare funcționării sistemului.

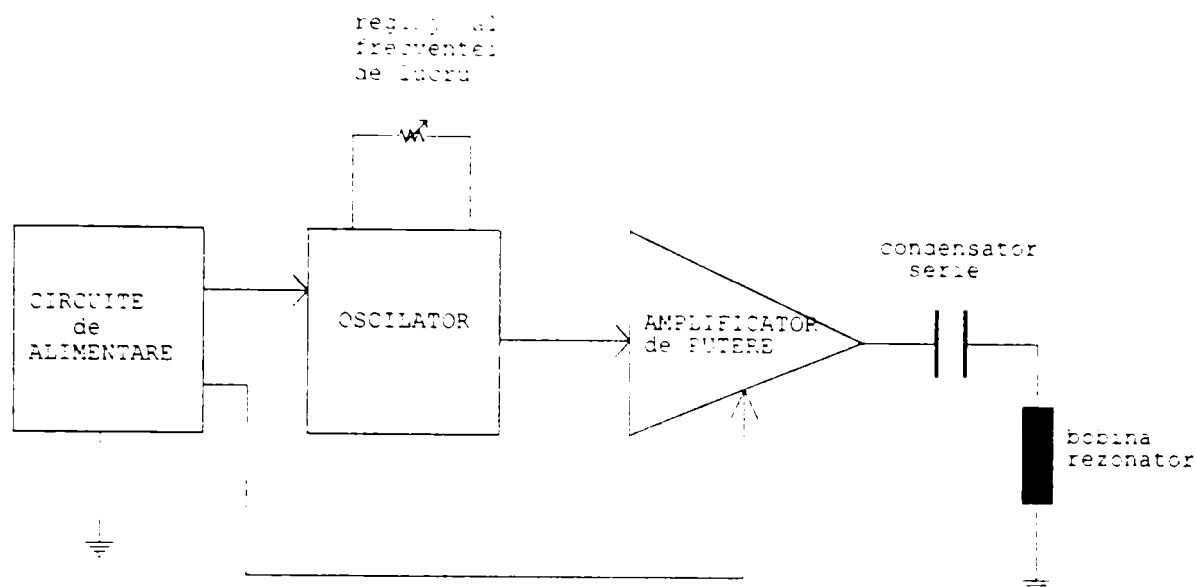


Fig.5. 6 Schema bloc a aparatului

În cele ce urmează voi prezenta pe rând fiecare din aceste unități funcționale ale aparatului. Funcționarea schemelor electronice a fost testată mai întâi prin simulare pe calculator (ori de câte ori acest lucru a fost posibil). În funcție de rezultatele obținute în urma proceselor de simulare am stabilit, pornind de la schemele de principiu, valorile parametrilor componentelor funcționale acestora.

5.3.2 Blocul oscilator

Unul din elementele esențiale ale modelului este blocul oscilator. În procesul de proiectare a unui circuit oscilator trebuie să se cunoască în primul rând **frecvența oscilațiilor electrice generate dar și forma de undă a acestora**.

În ceea ce privește frecvența generată, ea este în conformitate cu valoarea frecvenței de rezonanță a tubului de nichel folosit, adică de aproximativ 7 KHz, dar diferă într-o anumită măsură, de la o bară la alta. Din acest motiv, s-a prevăzut posibilitatea reglării frecvenței oscilatorului, cu ajutorul unui potențiomtru, de la 6 KHz până pe la o valoare maximă de circa 8 KHz.

În ceea ce privește **forma de undă a oscilației generate**, aceasta depinde de modul de lucru al amplificatorului de putere:

În cazul în care se folosește un amplificator de putere care funcționează în **regim liniar**, acesta trebuie comandat cu un **semnal sinusoidal**. In acest caz tranzistoarele funcționează pe post de rezistoare variabile, modulând curentul prin sarcină. Randamentul în cazul unui asemenea mod de funcționare este însă foarte mic și o mare parte din energia consumată se transformă în căldură. Randamentul teoretic al unui etaj final în **clasa B de funcționare (contratimp)** este de cca. 60 %.

Ținând seama de frecvența mare de lucru și de mulți alți factori care afectează eficiența reală, se poate conta pe un randament de maximum 40-50 %. Trebuie subliniat că aceste cifre exprimă doar randamentul din punct de vedere electric al sistemului, puterea acustică fiind mult mai mică. Considerând un amplificator cu o putere electrică utilă de 500 W, în cazul unui randament de 50%, rezultă o disipație de căldură (pierderi) de încă pe atât, deci un consum de minimum 1 kW. Inconvenientul constă în faptul că cei 500 W sub formă de căldură sunt disipați în cea mai mare parte de tranzistoarele finale care trebuie răcite în mod forțat, pentru a nu se încălzi peste temperatura admisă, iar tranzistoarele capabile să suporte asemenea puteri sunt costisitoare.

Din aceasta cauza se prefera folosirea unor amplificatoare de putere care să funcționeze în regim de comutație (clasa D). În acest caz disipația de putere pe tranzistoare este minimă, acestea lucrând asemenea unui comutator electric, fiind ori în conducție totală (saturație), ori blocate. În ambele situații produsul $I \cdot \Delta U$, care exprimă disipația de putere pe tranzistor, este minim. Un amplificator care funcționează în acest mod este foarte eficient dar forma de undă a semnalului la ieșirea sa este în mod evident dreptunghiulară. Acest lucru nu deranjează prea mult în cazul în care folosim un rezonator a cărui bobină face parte dintr-un circuit acordat, fapt care determină ca forma curentului prin aceasta să fie sinusoidală. În acest caz este neparat necesară dimensionarea elementelor circuitului conform cu [32, 55].

Aceasta este concluzia cea mai importantă în cazul vibratorului T3: deși semnalul nu este sinusoidal ca la T1, fiind dreptunghiular sistemul de rezonanță T3 funcționează foarte bine, iar vibratorul T3 este foarte fiabil.

Admițând deci că forma de undă generată poate fi dreptunghiulară, am realizat un oscilator pe baza circuitului integrat NE555. schema electrică a montajului este prezentată în **figura 5.7**. [138, 139]

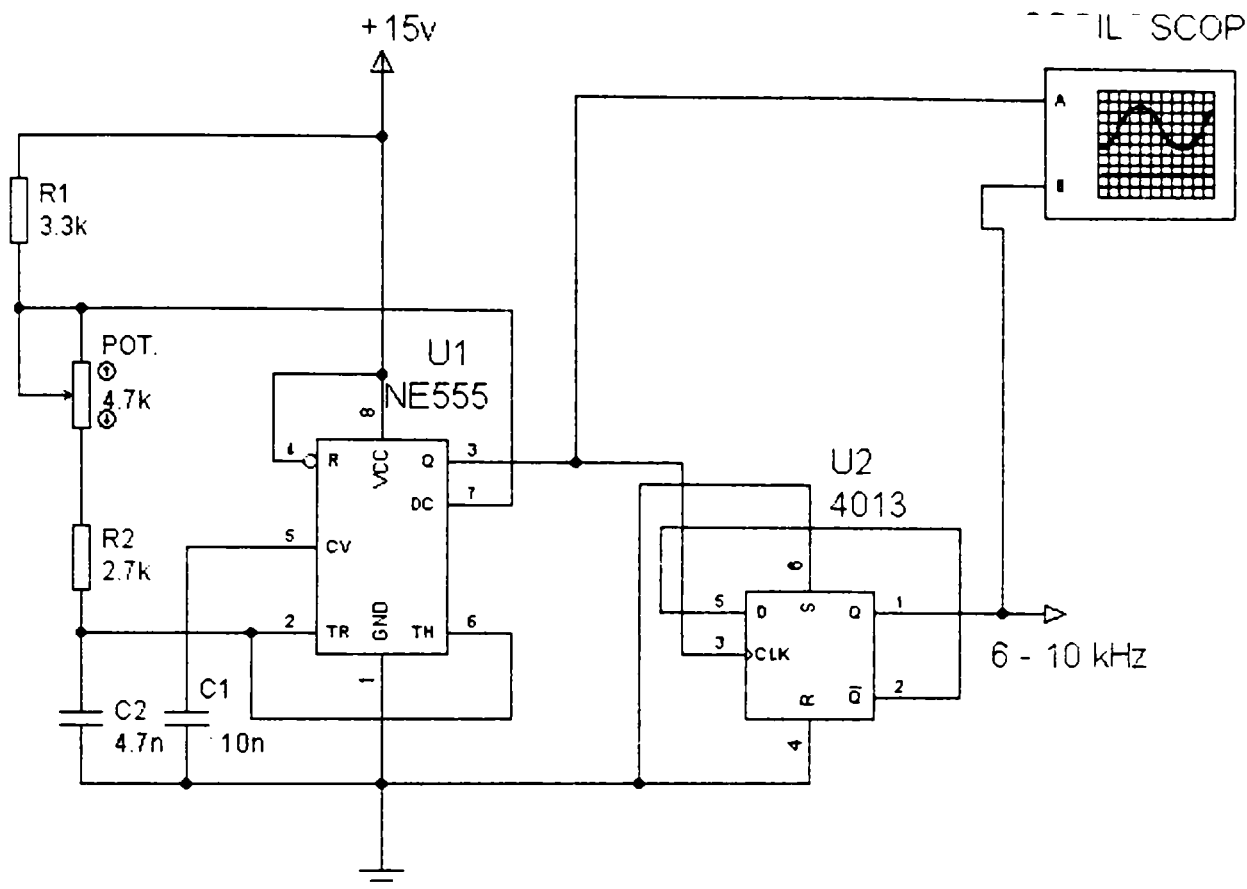


Fig.5.7 Generator de semnal dreptunghiular cu frecvență variabilă
între 6 și 10 kHz (schema simulare pe calculator)

Circuitul integrat de tip NE555 funcționează într-o configurație de oscilator de relaxare (astabil). Condensatorul C_2 se încarcă și se descarcă periodic, între $\frac{2}{3} \cdot V_+$, respectiv $\frac{1}{3} \cdot V_+$, unde V_+ este tensiunea de alimentare a circuitului. Perioada unui ciclu de încărcare – descărcare este determinată prin relația :

$$T = (2 \cdot R_B + R_A) \cdot C_2 \cdot \ln 2 \quad (1.1)$$

unde : $R_A = R_1$ iar $R_B = R_2 + R_{pot}$ [100]

Forma semnalului pe C_2 este reprezentată în **figura 5. 8** :

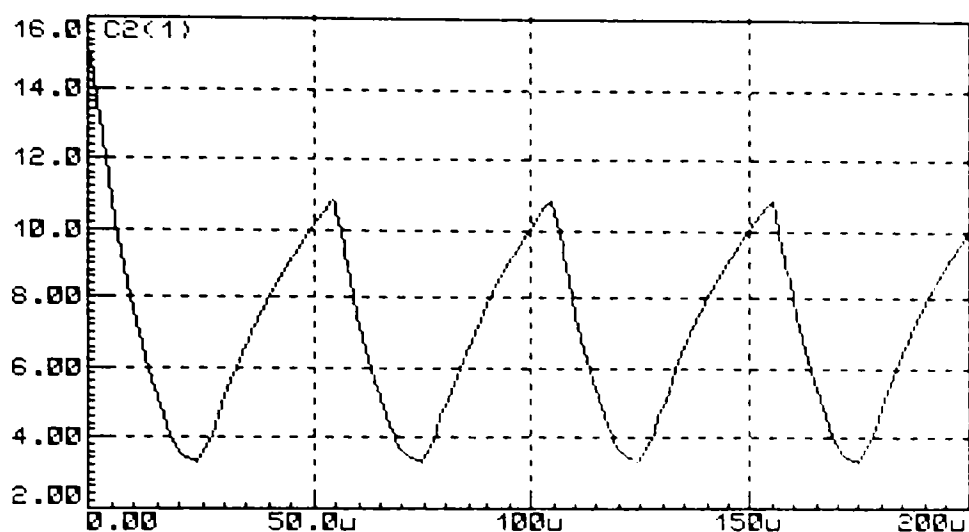


Fig. 5.8 Semnalul la bornele capacitatiei

Se observă că perioada de repetiție a semnalului este de circa $50 \mu s$, care ar corespunde unei frecvențe de circa 20 de KHz, adică de doua ori frecvența maximă pe care dorim să o obținem. Semnalul produs este aplicat însă unui circuit de tip CD4013, în configurație de bistabil de tip T, care divizează cu 2 frecvența produsă de NE555 (U1). [139]

S-a adoptat această soluție deoarece deși circuitul 555 produce la ieșirea sa un semnal dreptunghiular, factorul de umplere al acestuia nu este egal 0.5, adică semnalul nu este simetric în timp. Acest fapt este evidențiat în **fig. 5.9**, care prezintă vizualizarea simultană pe ecranul osciloscopului virtual a semnalului de la ieșirea lui NE555 (partea de sus a imaginii), respectiv la ieșirea divizorului U2 (jos)

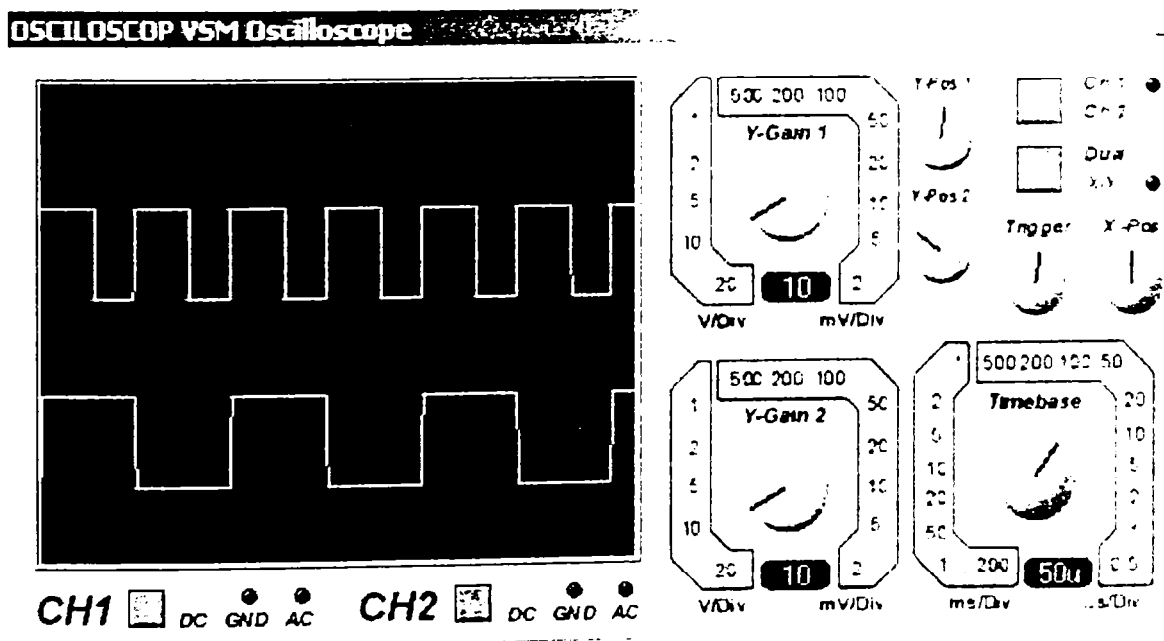


Fig.5. 9 Oscilogramele semnalelor produse

Se observă că la ieșirea lui U2 se obține un semnal perfect simetric, indiferent de forma semnalului aplicat la intrare, iar această simetrie nu este afectată de frecvența de lucru. Acest lucru este necesar pentru funcționarea corectă a etajului de putere. În cazul unui semnal de comandă asimetric, tranzistoarele de putere funcționează într-un mod dezechilibrat și apare o componentă continuă a tensiunii de ieșire care modifică punctul de funcționare al amplificatorului final. De asemenea, semnalul generat va conține în acest caz și o componentă, semnificativă din punct de vedere al nivelului, pe frecvența $2f_0$, care nu poate fi rejectată suficient de către circuitul acordat al rezonatorului și s-ar produce o alterare a formei semnalului de la ieșire.

Cu ajutorul potențiometrului "POT", al cărui buton este accesibil operatorului, se poate varia frecvența generată de către acest montaj, între aproximativ 6 și 8,5 KHz. Blocul oscilator se alimentează de la o singură tensiune, V+, care poate fi cuprinsă între 8 și 15 V, dar este necesar ca aceasta să fie stabilizată pentru a asigura o stabilitate cât mai bună a frecvenței generate. Curentul consumat este de ordinul miliamperilor, deci un consum de putere deosebit de mic.

In urma realizării practice a circuitului oscilator au apărut mici diferențe în valorile rezistențelor care determina frecvența de lucru. Aceste diferențe se datorează în mare parte dispersiei tehnologice a parametrilor circuitului 555. Schema concreta a blocului oscilator (inclusiv circuitul de stabilizare al tensiunii de alimentare al acestuia) este prezentată la Anexa 5, împreună cu oscilograma semnalului măsurat la ieșirea acestuia. Tot la Anexa 5 este prezentat desenul de execuție al plăcii din circuit imprimat, desen în care se poate vedea și modul de amplasare al componentelor.

5.3.3 Amplificatorul de putere

În vederea asigurării unui curent sinusoidal suficient de intens prin bobina rezonatorului este necesar un circuit amplificator electronic de mare putere. Înaintea realizării unui amplificator la scara reală de putere (500 W) am considerat ca ar fi mai bine să experimentez un model funcțional de putere mai mică, pentru a putea stabili fără riscuri materiale prea mari, ce probleme pot apărea în cadrul acestui proiect.

Am optat pentru un amplificator tranzistorizat, funcționând în clasa B (sau în contratimp). În **fig. 5.10** este prezentată o schemă de principiu a unui astfel de amplificator:

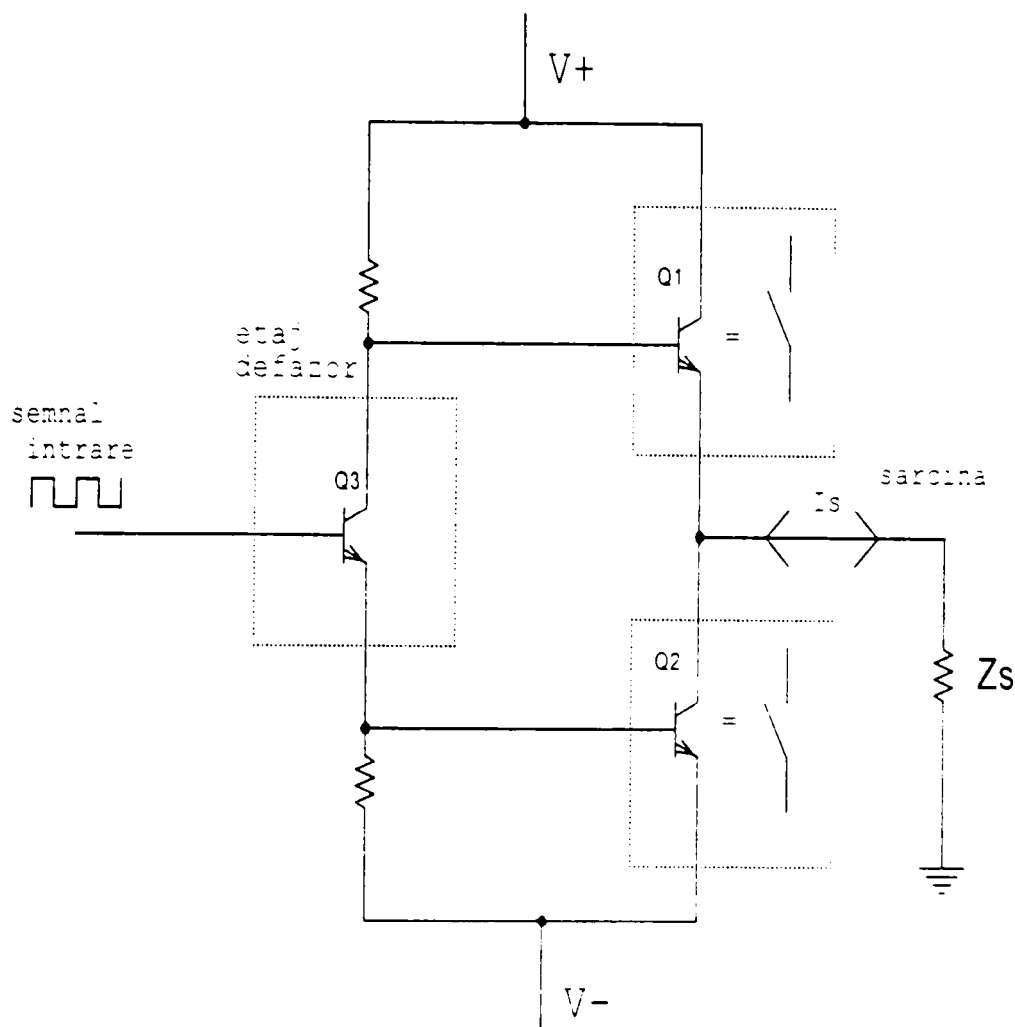


Fig. 5.10 Schema de principiu al unui amplificator in contratimp

Daca admitem că semnalul aplicat la intrare are o formă dreptunghiulară și o amplitudine suficient de mare pentru a cauza intrarea în saturație a tranzistoarelor, se poate considera că cele două tranzistoare finale se comportă asemenea unor comutatoare electrice, având doar doua stări posibile:

- tranzistor blocat = contact deschis
- tranzistor saturat = contact închis

Datorita etajului defazor, stările celor două tranzistoare sunt întotdeauna complementare, adică ele nu pot fi deschise amândouă simultan (de aici și denumirea consacrată de etaj final în contratimp).

Atunci când semnalul de la intrare este la nivelul sau ridicat, Q3 este deschis, fapt care duce la deschiderea lui Q2. In acest timp Q1 rămâne blocat, deoarece are o tensiune negativa in baza. Prin rezistenta de sarcina va circula un curent al cărui sens va fi dinspre masa înspre V-. După ce semnalul de la intrare revine la nivel coborât, Q3 se blochează, fapt care duce la blocarea lui Q2 dar și la deschiderea lui Q1. Acum curentul circulă în sens invers prin sarcină, de la V+ înspre masă, după

care lucrurile se repetă identic pentru următoarele cicluri ale tensiunilor de intrare. Se observă că prin sarcină circulă un curent alternativ a cărui frecvență este dictată de semnalul de comandă de la intrare, dar la un nivel de putere mult mai mare, putere care depinde de caracteristicile constructive ale montajului folosit, de tensiunile de alimentare și de valoarea impedanței sarcinii. [32, 137]

Pentru început am ales o schema de amplificator cu valori concrete, [142], dar mai simplă, a cărei comportare am studiat-o cu ajutorul calculatorului. Trebuie arătat ca este vorba de un amplificator de audiofrecvență, care a fost pus să lucreze în regim de comutație:

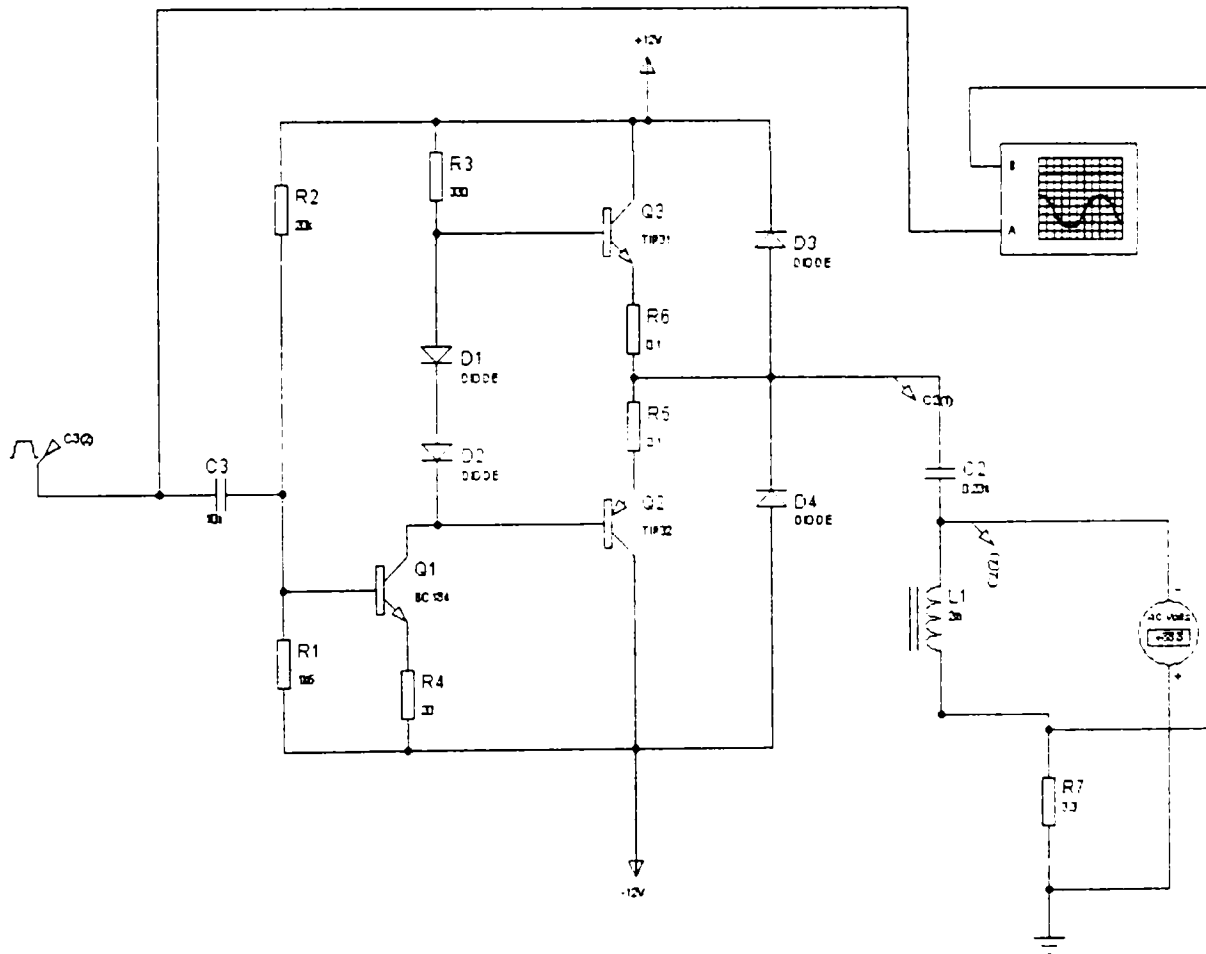


Fig. 5.11 Schema de simulare a amplificatorului final (simplificat)

După cum se poate vedea în figura 5.11, s-a folosit un generator virtual de semnal, în locul oscilatorului prezentat anterior, programat să genereze un semnal dreptunghiular cu frecvența de 7 KHz, amplitudinea de 5 Vv și un factor de umplere de 0.5. Din fig. 5.12 se poate vedea că deși semnalul de comandă nu este sinusoidal, totuși curentul prin bobina L1 are o formă perfect sinusoidală. Acest lucru

se datorează faptului că valorile lui L1 și C2 au fost dimensionate în așa fel încât să rezulte un circuit oscilant serie cu frecvență de rezonanță la 7 KHz. Din același motiv, voltmetrul conectat la bornele bobinei măsoară o valoare efectivă de 26,3 V deși, dacă am lua în considerare doar valorile tensiunii de alimentare a montajului, ar rezulta o tensiune maximă de circa 7.5 Vef. (vezi fig. 5.13).

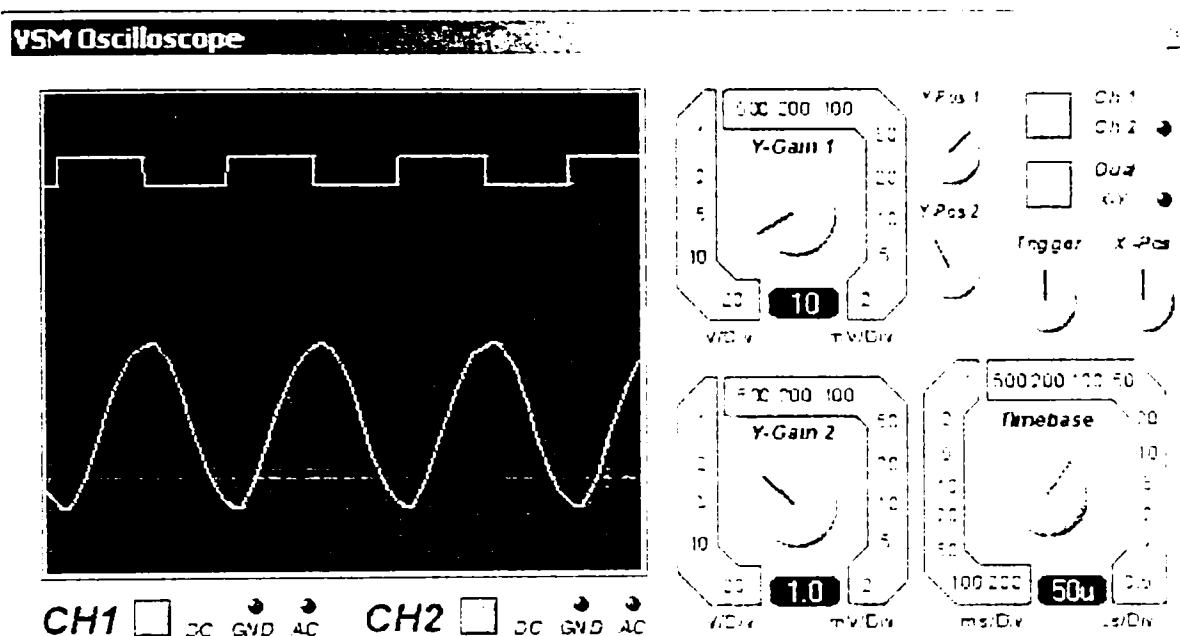


Fig.5. 12 Forma de undă a tensiunii la ieșirea amplificatorului (sus) și a curentului prin bobina L1

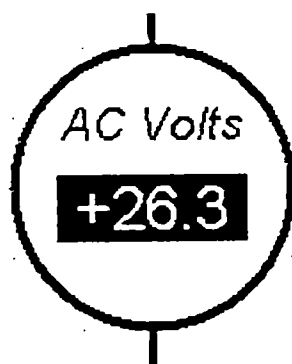


Fig. 5.13 Tensiunea efectivă, determinată

În cazul în care circuitului i se aplică un semnal al cărui frecvență diferă de frecvența de rezonanță se observă o scădere puternică a tensiunii de la bornele lui L1 și a curentului prin aceasta, cu toate că forma acestora rămâne încă sinusoidală dacă frecvența de lucru nu se modifică prea mult. Dacă diferența față de frecvența de rezonanță a grupului L1 și C2 este prea mare, se poate modifica valoarea lui C2.

Acest lucru este posibil dacă vor fi folosite mai multe condensatoare fixe de valoare mai mică, legate în paralel în așa fel încât să se obțină valoarea necesară acordului pe frecvență.

În ceea ce privește randamentul unui asemenea sistem precizez următoarele aspecte : Teoretic, randamentul al trebui să fie unitar, dar apar totuși anumite pierderi apărute mai ales pe timpul comutării tranzistorelor dintr-o stare în cealaltă. Pentru a minimiza aceste pierderi este necesară folosirea unor tranzistoare cât mai rapide. Alte pierderi apar datorită faptului că tensiunea de saturație a unui tranzistor real nu este nulă așa cum am presupus inițial. Cu toate aceste pierderi se poate conta pe randamente în funcționare foarte bune, fapt care are ca efect secundar și o reducere sensibilă a disipației termice și permite o construcție mai fiabilă și mai compactă. [32]

Cu toate că este foarte atractivă, folosirea unui astfel de amplificator în regim de comutație, ridică totuși o problema majoră : reglajul puterii . Acesta nu se mai poate face prin modificarea nivelului de la intrare (ca și la un amplificator audio) deoarece sistemul trebuie să lucreze în clasa D. O soluție prin care s-ar putea controla puterea de ieșire ar fi modificarea tensiunii de alimentare cu ajutorul unui element reglabil. Acest lucru nu ar putea fi prea greu de realizat, ținând cont de faptul că o mică modificare a tensiunii de alimentare ar duce la o modificare a puterii după o lege pătratică:

$$P = \frac{U^2}{Z_s} \quad (1.2)$$

unde Z_s este impedanța sarcinii.

Trebuie precizat că amplificatorul folosit în practică are o schema mai complicată, **vezi Anexa 5**, conținând un număr mult mai mare de componente (inclusiv un circuit integrat de tip LM741-amplificator operațional) care au scopul de a optimiza performanțele electrice (în special viteza de lucru) și de a asigura protecția acestuia în caz de suprasarcină. Această schemă, deși a fost testată în practică cu rezultate foarte bune, este mult prea complicată pentru a putea fi simulată pe calculator. În Anexa 5, am prezentat schema reală, cu valori concrete, a circuitului amplificator de putere, precum se desenul de cablaj și de dispunere al pieselor. De asemenea sunt prezentate și două oscilograme obținute prin măsurarea semnalului de la intrare, respectiv de la ieșirea amplificatorului de putere. [136, 137, 140]

Tot în figura din Anexa 5 este reprezentat, încadrat cu linie punctată, și circuitul de adaptare al bobinei de sarcină (circuit care asigură și protecția etajului final).

La testarea funcțională a aparatului s-a măsurat o putere electrică de circa 50W fără să apară o încălzire notabilă a tranzistoarelor finali ai amplificatorului, fapt care susține ideea utilizării unui etaj de mare putere realizat pe principiul funcționării în regim de comutație (clasa D) .

5.3.4 Blocul de alimentare

Blocul de alimentare are rolul de a asigura alimentarea aparatului cu energie electrică, la parametri necesari. Schema electrică a circuitului de alimentare este prezentată în **fig. 5.14** :

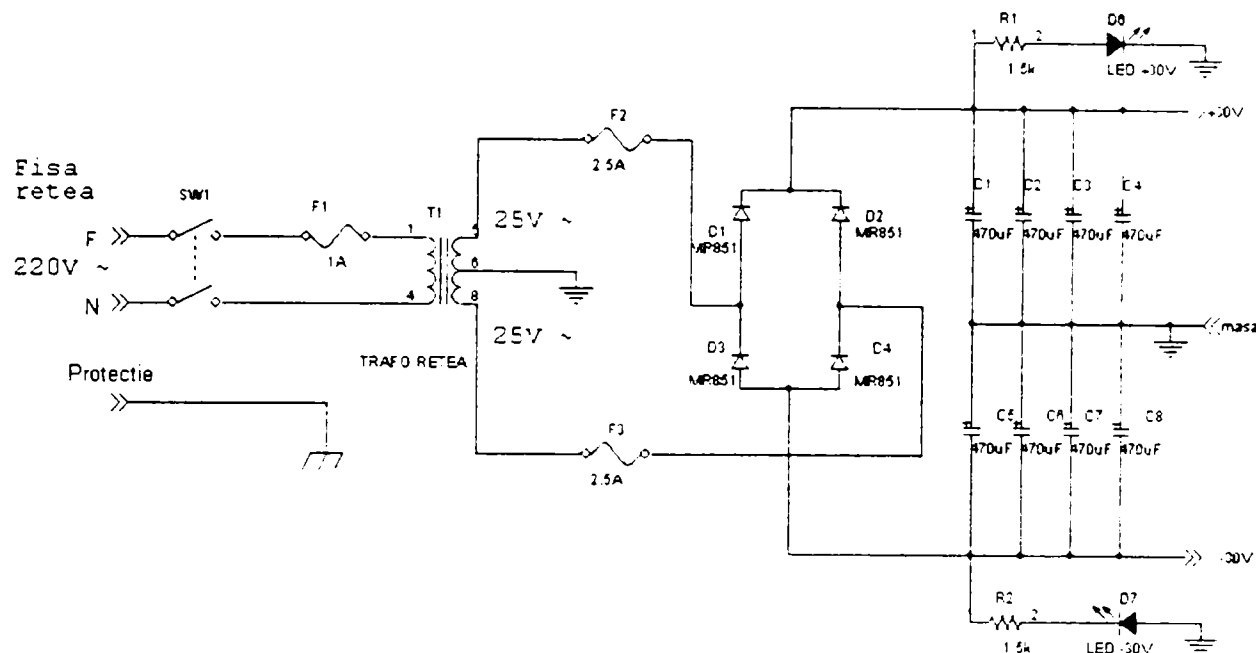


Fig. 5.14 Schema electrică a blocului de alimentare al aparatului

Se observă ca racordarea aparatului la rețeaua de alimentare cu energie electrică se face prin intermediul unei fișe de tip "shuco", prevăzută cu contact suplimentar de protecție. Comutatorul SW1, montat pe panoul aparatului, permite pornirea și oprirea instalației. Transformatorul de rețea, T1, are rolul de a furniza la bornele înfășurării secundare, sub forma diferențială, două tensiuni alternative cu valoarea de circa 25V (valoare efectivă). Siguranțele fuzibile F1, în primar, respectiv F2 și F3 în secundar, au rolul de a proteja instalația în cazul unor scurt-circuite sau suprasarcini periculoase. [137]

Cele două tensiuni alternative sunt redresate cu ajutorul unei punți redresoare formate din diodele semiconductoare D1 – D4. Se obțin astfel două tensiuni continue cu valorile de +30 și -30V necesare alimentării amplificatorului de putere. Grupurile de condensatoare C1 - C4 și C5 - C8 au rolul de a filtra tensiunea continuă și de a atenua pulsațiile cu frecvența de 100 Hz care apar în urma redresării bialternante. Din tensiunea de +30V se alimentează și blocul oscilator, prevăzută cu un etaj de stabilizare propriu, la valoarea de 12V. Consumul maxim estimat al aparatului este de 80 W, fapt care a fost luat în calcul la alegerea transformatorului de rețea, precum și

la dimensionarea celorlalte elemente de circuit. Cele două diode luminescente, D6 și D7, sunt montate pe panou și au rolul de a semnaliza prezența celor două tensiuni principale de alimentare. O a treia diodă, figurată în schema blocului oscilator, semnalizează prezența tensiunii stabilizate de +12V. Majoritatea componentelor din blocul de alimentare sunt amplasate pe o placă din circuit imprimat al cărei desen este prezentat în cadrul Anexei 5. Pe aceeași placă se află amplasate și componentele necesare protecției amplificatorului final precum și adaptării cu sarcină a acestuia. (vezi schema amplificator din **Anexa 5**).

5.3.5 Descrierea și utilizarea aparatului

Întreaga instalație este realizată sub o formă compactă, ușor de transportat și de manevrat. Rezonatorul din nichel și bobina acestuia constituie un subansamblu separat, și sunt montate pe un suport special construit în acest scop, în atelierul mecanic al Catedrei de Mașini Hidraulice.

Partea electronică a instalației este realizată sub forma unui aparat compact, denumită "**Generator de Curent de Înaltă Frecvență**", fiind montată pe un șasiu metalic și prevăzută cu un panou frontal pe care sunt montate elementele de comandă și control ale acesteia. Deoarece s-a considerat că instalația are un caracter experimental și didactic, s-a optat pentru o realizare de tip "open frame", adică cu capac de protecție din sticlă fapt care permite observarea elementelor constructive precum și un acces facil la diferitele puncte din schema electrică a acestuia.

Dimensiunile de gabarit (în mm) ale aparatului sunt specificate în **fig. 5.15**

Instalația se alimentează de la o priză monofazată a rețelei de energie electrică (220V c.a.). Pentru eliminarea riscului de accidentare prin electrocutare, este absolut obligatorie folosirea unei prize de rețea prevăzută cu contact de protecție.

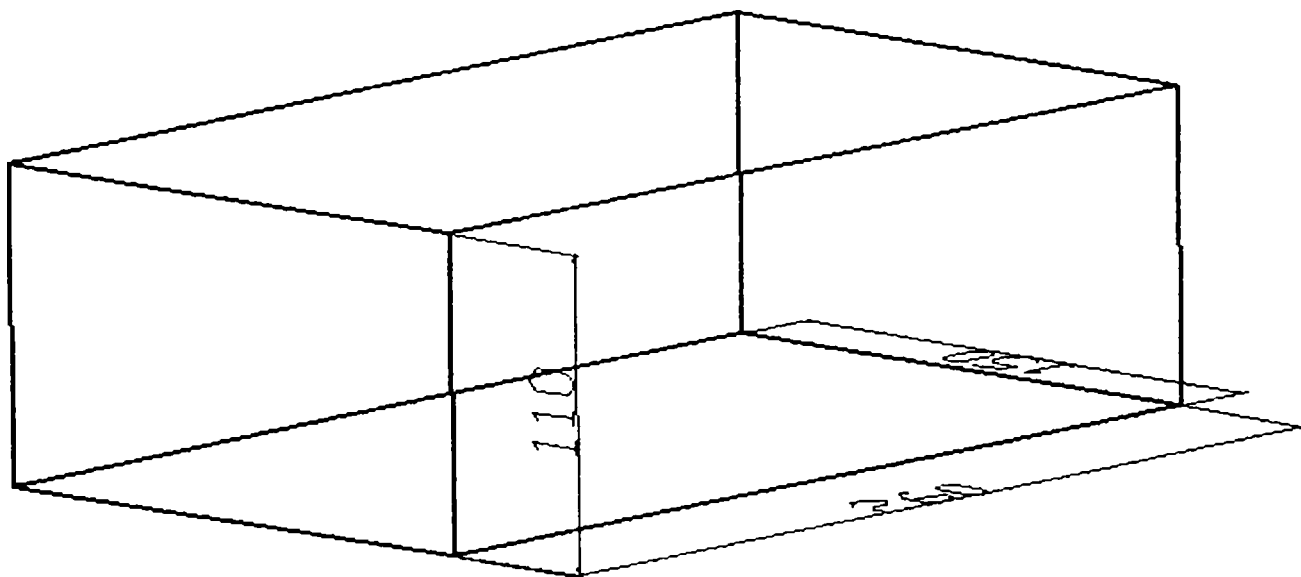


Fig. 5.15 Dimensiuni de gabarit ale generatorului de curent

Elementele de reglaj și control necesare operării aparatului sunt dispuse pe panoul frontal al aparatului. Aspectul acestuia este redat în **figura 5.16**. Pornirea și oprirea instalației se face prin intermediul unui comutator de rețea (*PORNIT-OPRIT*). Pe panou au fost montate un număr de trei indicatoare luminoase (*LED*), de culoare verde, care au rolul de a indica prezenta celor trei tensiuni interne necesare bunei funcționări a aparatului. În cazul în care se constată faptul că ele nu luminează normal, se impune verificarea tehnică atentă a aparatului. **Singurul reglaj necesar din partea operatorului este cel al frecvenței de lucru a oscilatorului, pentru a permite funcționarea generatorului exact pe frecvența de rezonanță a tubului de nichel utilizat.** Cu ajutorul butonului unui potențiometr, se poate varia frecvența de lucru între 6 și aproximativ 8 KHz. Aparatul este prevăzut cu o mufă, de tip **BNC**, pentru a permite conectarea sa (*optional*) la un frecvențmetru, cu scopul determinării și urmării cât mai precise a valorii frecvenței sale de lucru.

Conectarea bobinei rezonatorului la aparat se face printr-un conector special. O a doua mufă **BNC**, inscripționată "**osciloscop**", permite conectarea unui osciloscop catodic la bornele sarcinii, pentru a putea urmări forma și amplitudinea semnalului în timpul funcționării (se recomandă folosirea unei sonde de osciloscop cu atenuare 10:1 deoarece amplitudinea semnalului este de circa 150 V_{vv}).

Aparatul poate fi lăsat să funcționeze și fără sarcină (bobina), dar conectarea și deconectarea acesteia trebuie să se facă doar atunci când instalația este oprită. Se va evita legarea în scurtcircuit a bornelor de ieșire ale generatorului, precum și folosirea unor alte bobine de sarcină, deoarece acest fapt poate duce la distrugerea părții electronice. Aparatul trebuie ferit de umezeală precum și de contactul cu apă sau alte lichide. În cazul constatării unor anomalii în funcționarea sa, se va apela la serviciile unui tehnician autorizat. Siguranțele fuzibile vor fi înlocuite doar cu altele de aceeași valoare iar intervențiile în interiorul aparatului vor fi făcute doar după deconectarea acestuia de la rețea. În cazul efectuării unor măsurători în timpul funcționării aparatului se va evita atingerea părților aflate la tensiunea rețelei (primarul transformatorului).

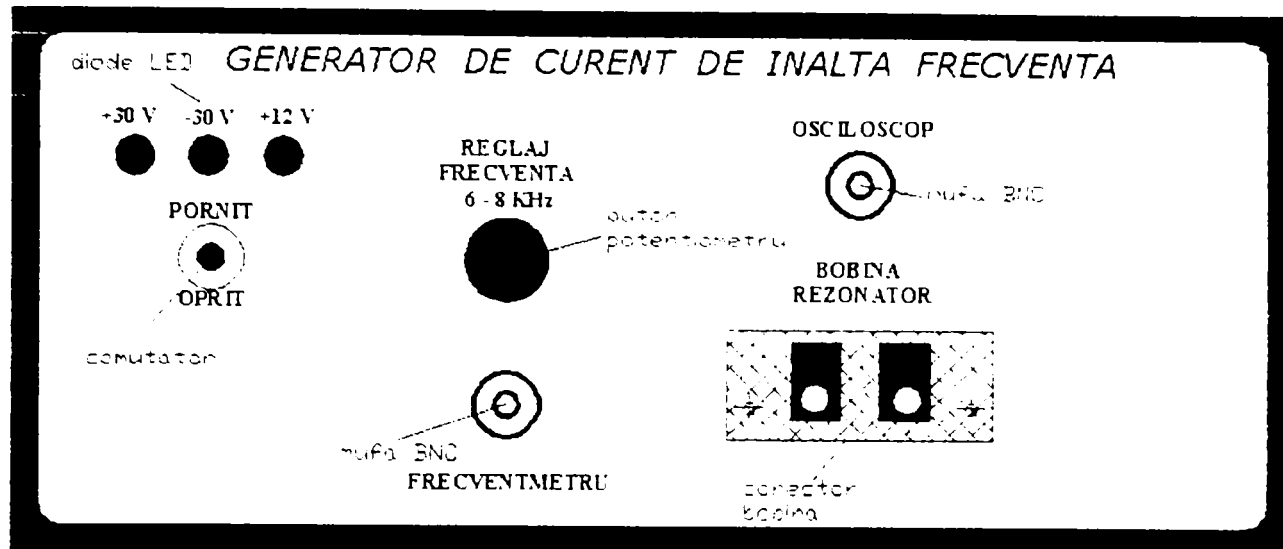


Fig.5.16 Dispunerea elementelor de control și aspectul panoului frontal al aparatului

5.3.6 Date tehnice principale

- Dimensiuni gabarit [mm]:

L = 260
l = 150
h = 110
- Masa [kg]: $m = 5$
- Tensiunea de alimentare: $U = 210-240V / 50 \text{ Hz}$
- Putere absorbită : $P = \text{max. } 80W$
- Frecvența generată $f = 6000-8000\text{Hz}$
- Putere electrica la ieșire $P = 50W$
- Amplitudine de ieșire fără sarcina: $A_{\text{fără sarcină}} = 55V_{\text{v}}$
- Amplitudine de ieșire cu sarcină: $A_{\text{sarcină}} = 150V_{\text{v}}$
(la rezonanță)

CAP.5- PRECIZĂRI ȘI CONCLUZII

Studiul și elaborarea acestei instalații experimentale s-a făcut în mare parte pe calculator. Analiza și simularea funcțională a diferitelor blocuri electronice s-a făcut cu ajutorul sistemului de programe " PROTEUS VSM ".

În faza de proiectare a montajelor electronice s-a folosit sistemul ORCAD, atât în procesul de descriere a schemelor electrice (ORCAD CAPTURE), cât și în faza de elaborare a documentației de execuție a circuitului imprimat (ORCAD LAYOUT), precum și programul TRAXMAKER.

Pentru proiectarea panoului frontal al aparatului a fost utilizat sistemul AUTOCAD, iar în elaborarea documentației scrise s-a folosit sistemul OFFICE 2000, precum și programul ADOBE-PHOTOSHOP (pentru prelucrarea imaginilor).

În cadrul testării funcționale a aparatului s-a folosit un multimetru digital de tip MY-65 precum și un osciloscop digital de tip HAMEG (HM407), conectat la calculator. (vezi oscilogramele din anexa 1)

Sistemul de fixare al tubului de Ni și proba de încercare cu piesa de prindere au fost executate în atelierul mecanic al Catedrei MH, iar încercările au fost făcute în LMHT.

Rezultatele obținute în urma testării practice a acestei machete funcționale, sunt foarte încurajatoare, mai ales din punct de vedere al performanțelor părții electronice.

Deoarece nu s-a folosit nici un fel de procedeu de premagnetizare a tubului de Ni, oscilațiile mecanice ale acesteia, deși sesizabile, nu au o amplitudine mare.

În cazul folosirii tuburilor din nichel compacte se poate conta pe un randament energetic foarte mic, (sub 10%), fapt care necesită folosirea unui sistem electronic de foarte mare putere (500-700W) precum și a unui sistem complicat de răcire forțată.

Un alt dezavantaj major al acestui sistem, îl reprezintă gradul ridicat de poluare sonoră datorită frecvenței audibile de funcționare. Singurul avantaj notabil al tubului din nichel îl constituie faptul că nu sunt casante, și pot asigura vibrații cu amplitudini mari, fără a se distruge.

O alternativă tentantă o constituie folosirea în locul tubului din nichel a unor rezonatoare din ferita, (vezi fig. 5. 3), utilizate pe scară tot mai largă în ultima perioadă. Acestea funcționează pe o frecvență ultrasonoră (20 – 40 KHz) și au un randament foarte ridicat (în jur de 80%), fapt care ar duce la o scădere a puterii instalației cu până la 10 ori . Datorită pierderilor foarte mici se poate simplifica sistemul de răcire (- un simplu ventilator).

De asemenea, instalația de premagnetizare nu mai este necesară deoarece rezonatoarele respective sunt premagnetizate din fabricație.

Singura problemă mai dificilă care apare în cazul folosirii feritelor constă în proiectarea și executarea unei piese de legătură între rezonator și proba care urmează să fie încercată. Această piesă are o geometrie destul de complicată deoarece trebuie să asigure o concentrare a energiei ultrasonore spre capul de prindere al probei, asigurând totodată o amplitudine cât mai mare a oscilației acestuia.

ANEXA 5

- **SCHEME ELECTRICE,**
- **OSCILOGRAME,**
- **ILUSTRĂȚII,**
- **DESENE,**
- **LISTA COMPONENTELOR ELECTRONICE
ETC.**

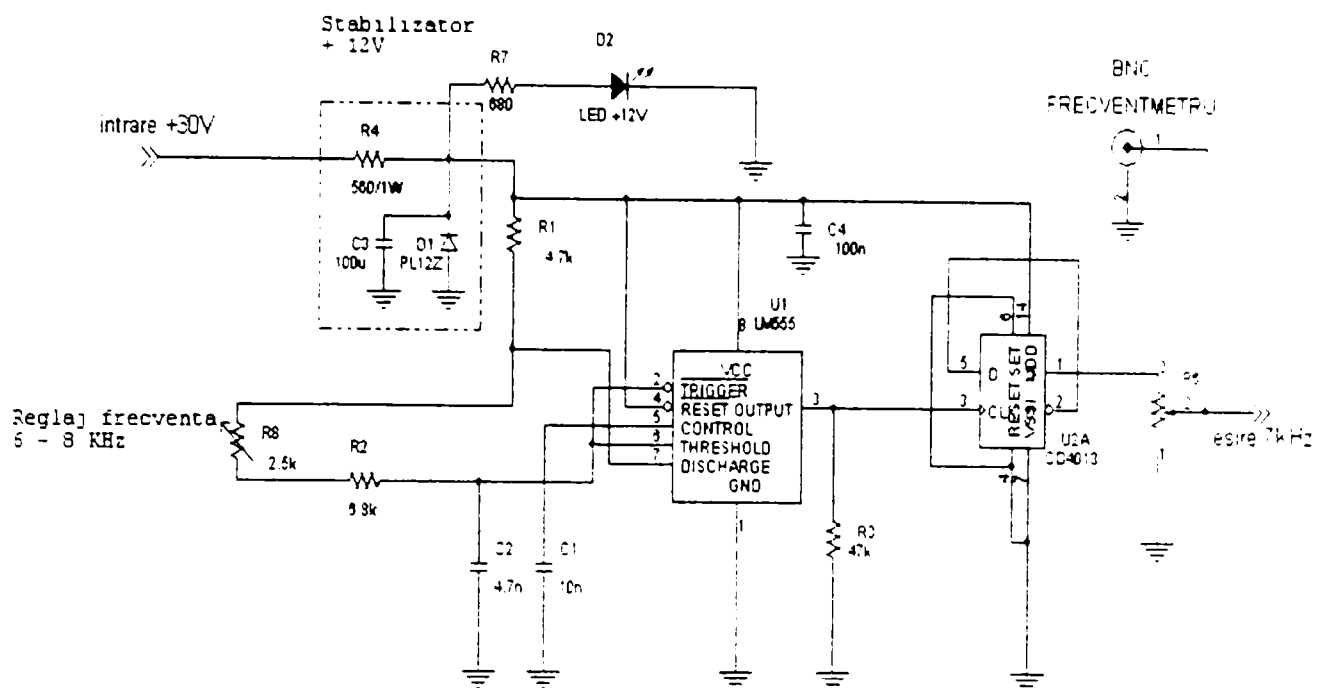


Fig. 5.1 Schema circuitului oscilator și a stabilizatorului de +12V

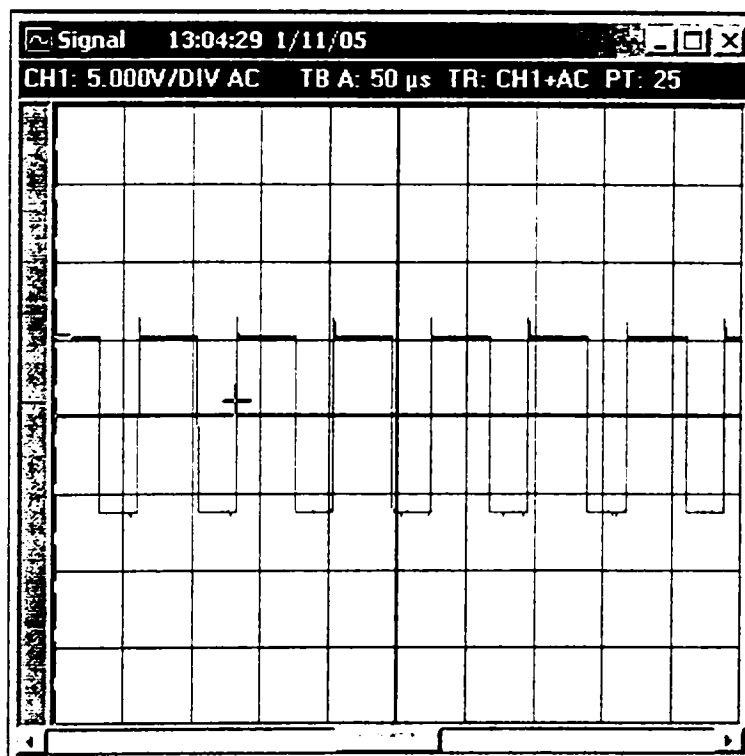


Fig. 5.2 Semnal masurat cu osciloscopul la iesirea circuitului LM555

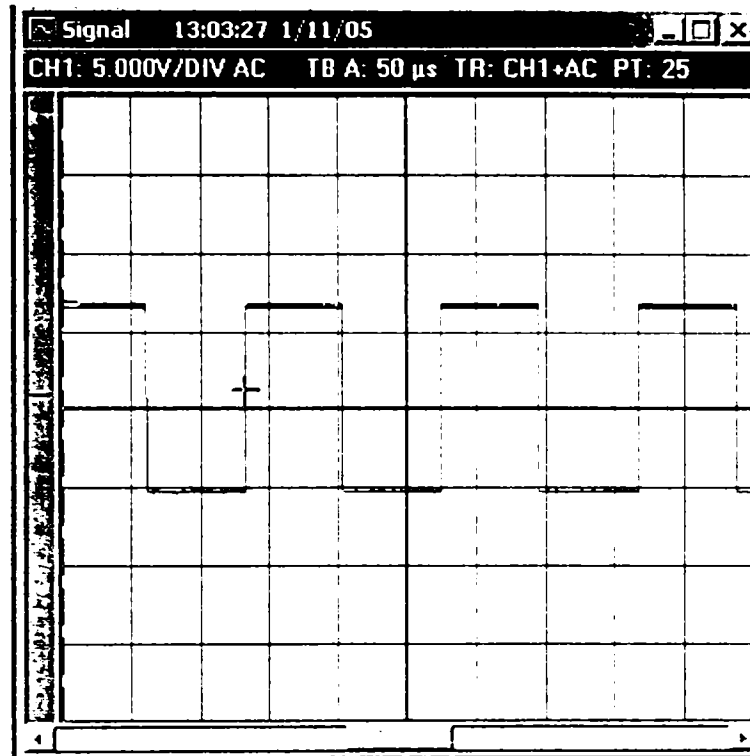


Fig. 5.3 Semnalul măsurat cu osciloscopul la ieșirea blocului oscilator (ieșire CD4013)

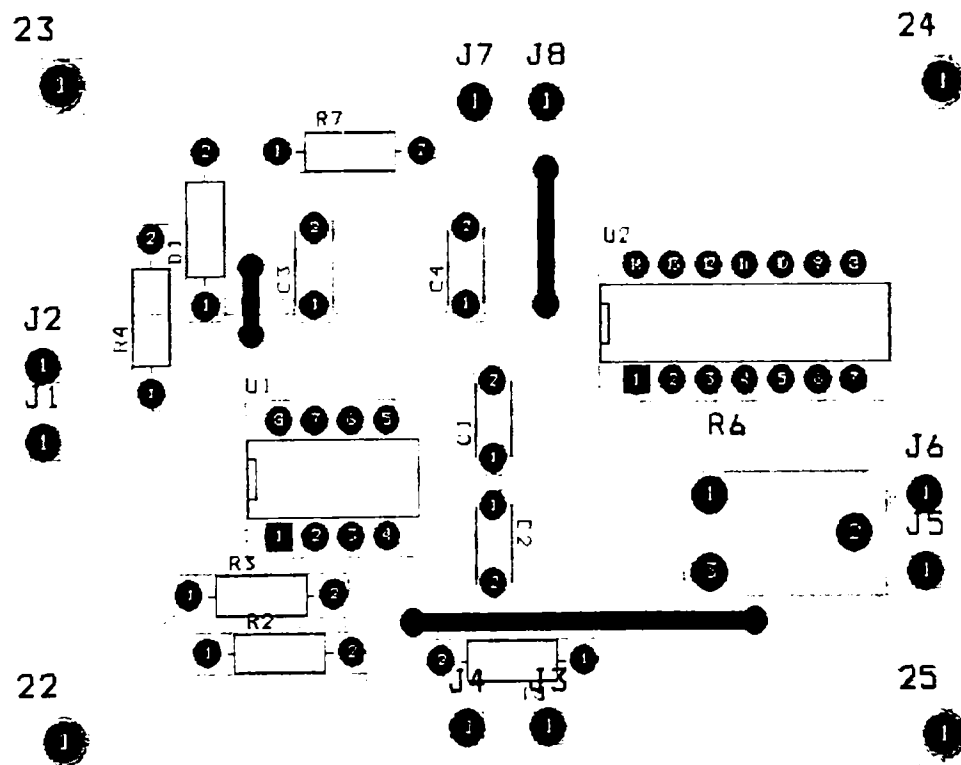


Fig. 5.4 Desenul de cablaj și dispunerea pieselor din blocul oscilator și stabilizator de +12V

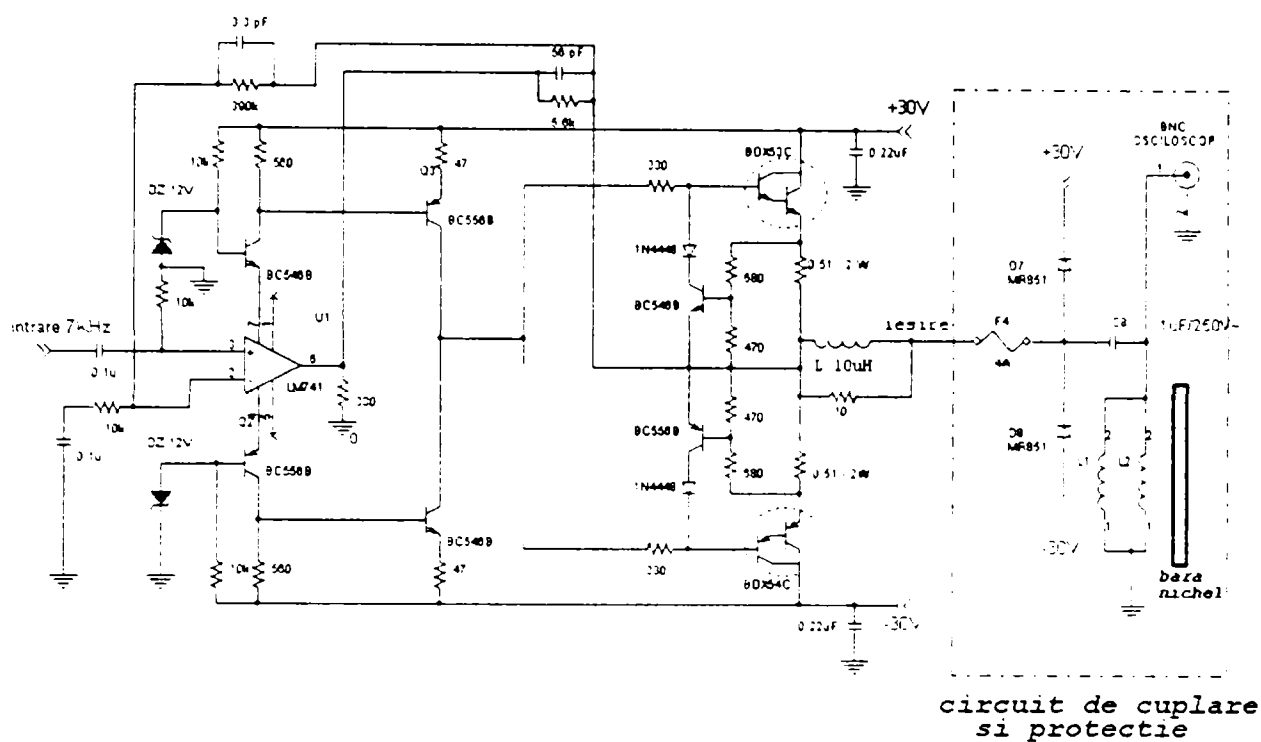


Fig. 5.4 a Schema amplificator de putere + circuit de adaptare si protectie

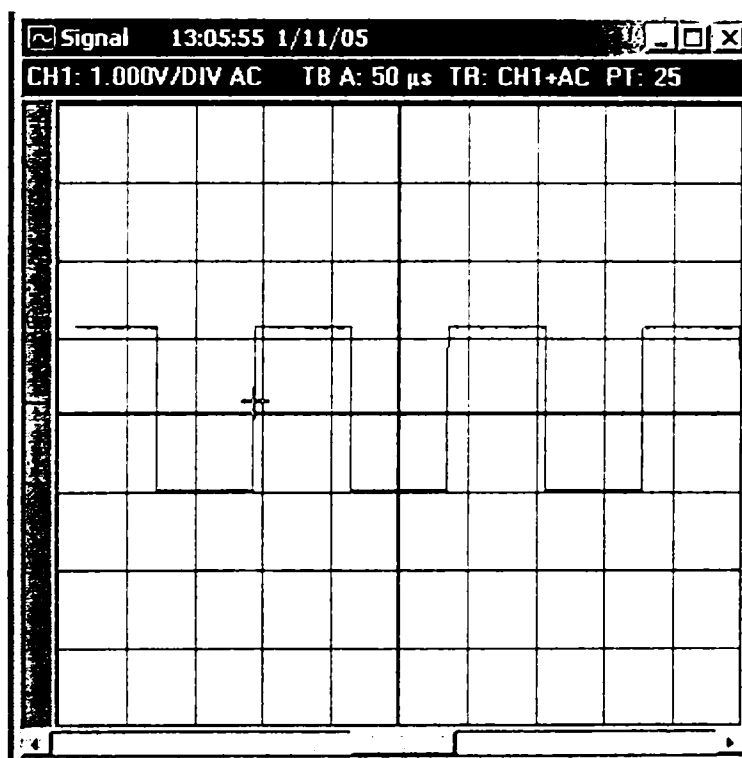


Fig. 5.5 Semnalul masurat cu osciloscopul la intrarea amplificatorului de putere

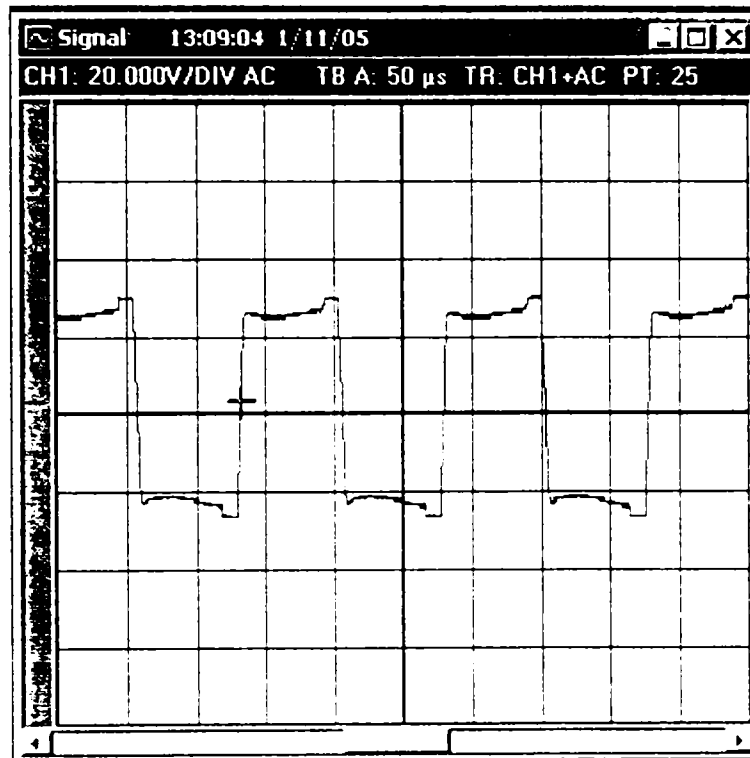


Fig. 5.6 Semnalul măsurat cu osciloscopul la ieșirea amplificatorului de putere

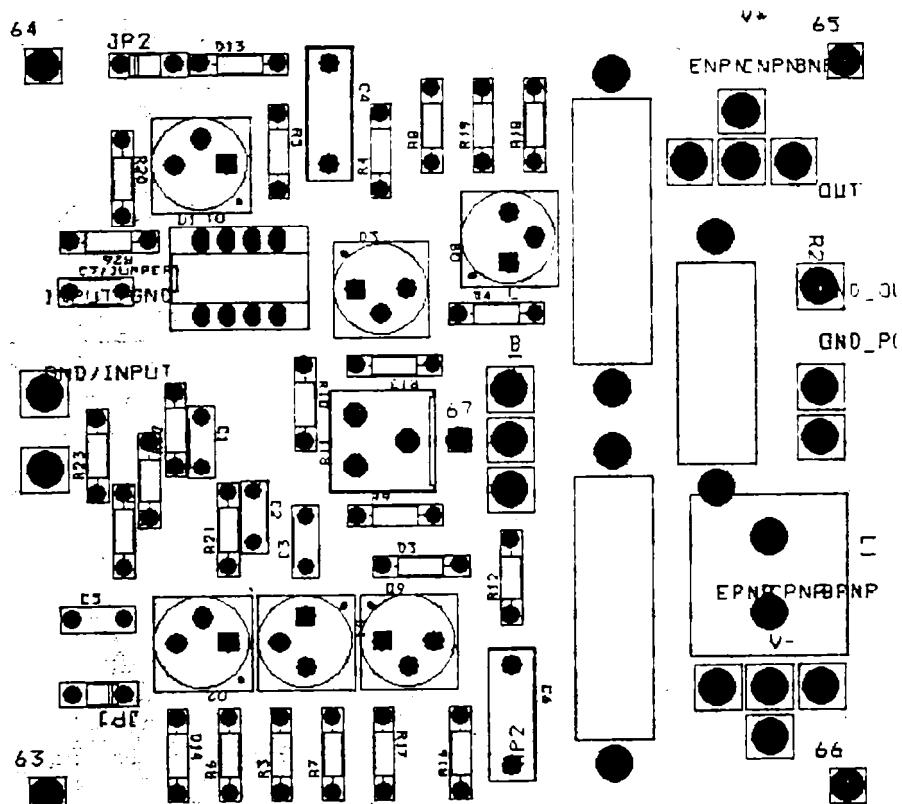


Fig. 5.7 Desen circuit imprimat amplificator de putere și amplasare piese

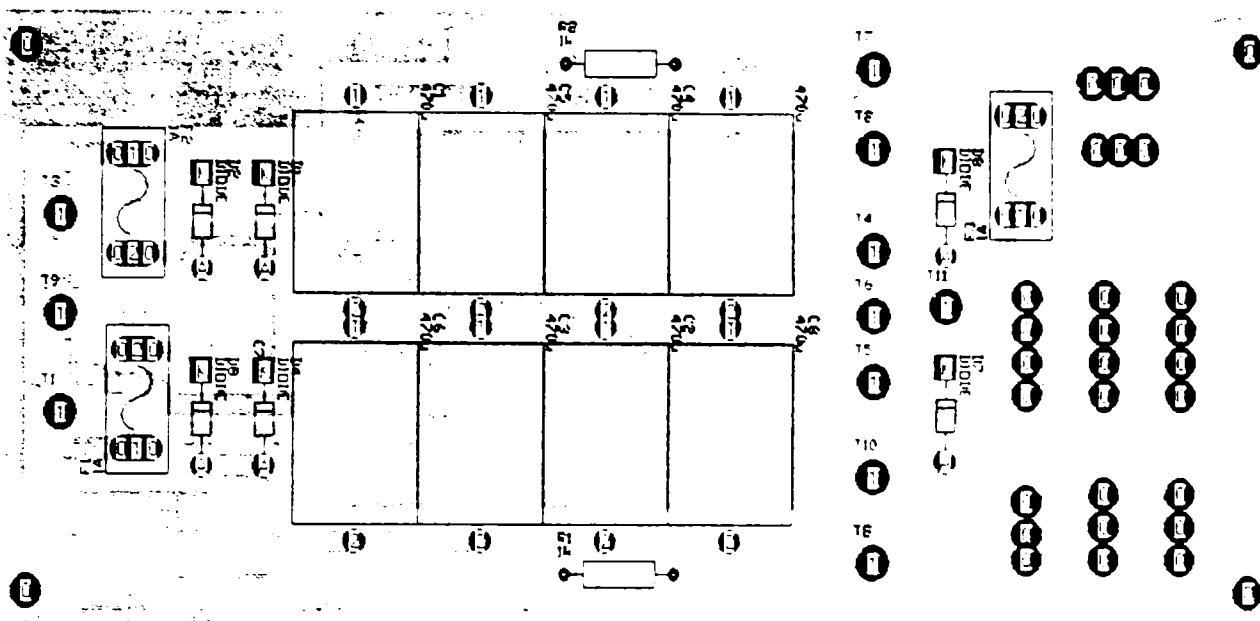


Fig. 5.8 Desen circuit imprimat și dispunere piese bloc alimentare și circuit de adaptare și protecție

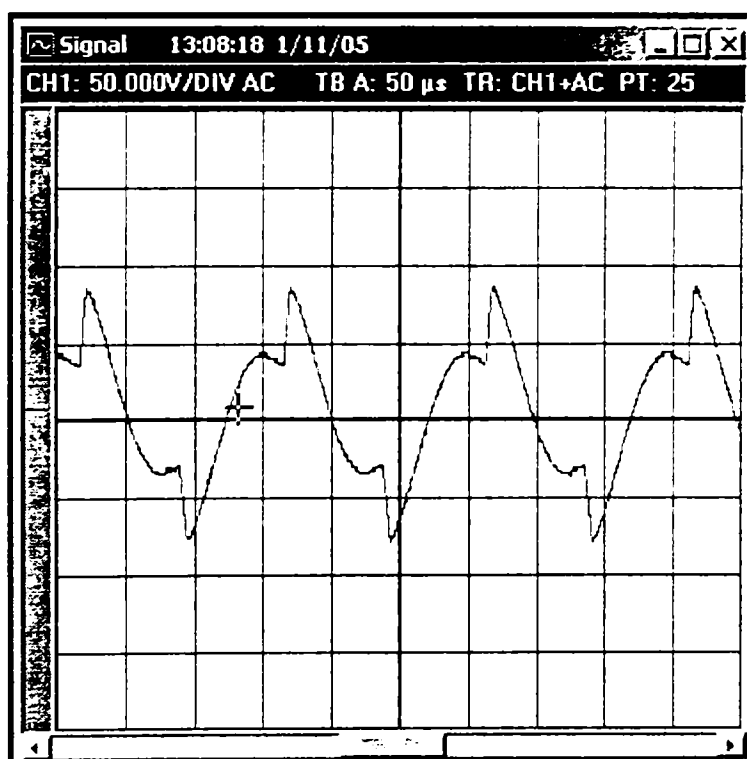


Fig. 5.9 Oscilograma tensiunii la bornele bobinei de sarcină. Forma semnalului nu este chiar sinusoidală deoarece este afectată chiar de fenomenul de magnetostricțiune (invers).

LISTA COMPONENTELOR ELECTRONICE FOLOSITE***Bloc oscilator si stabilizator +12V***

Nr.	Buc.	Tip componenta	
-----	------	----------------	--

1	1	C1	10n
2	1	C2	4.7n
3	1	C3	100u
4	1	C4	100n
5	1	D1	PL12Z
6	1	D2	LED +12V
7	1	BNC	conector
8	1	R1	4.7k
9	1	R2	6.8k
10	1	R3	47k
11	1	R4	560/1W
12	1	R6	1K
13	1	R7	680
14	1	R8	2.5k
15	1	U1	LM555
16	1	U2	CD4013

Bloc de alimentare si adaptare

Nr.	Buc.	Tip componenta	
-----	------	----------------	--

1	8	C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7,C8	470uF
2	4	D1,D2,D3,D4	MR851
3	1	D6	LED +30V
4	1	D7	LED -30V
5	1	F1	1A
6	2	F2,F3	2.5A
7	2	R1,R2	1.5k
8	2	SW1,SW2	SW SPST
9	1	T1	TRAFO RETEA

Amplificator de putere si circuit de adaptare si protectie

Nr.	Buc.	Tip componenta	
-----	------	----------------	--

1	1	C1	3.3 pF
2	1	C2	56 pF

3	2	C4	0.22uF
		C6	0.22uF
4	2	C7	0.1u
		C5	0.1u
5	1	C8	1uF/250V~
6	2	D1	DZ 12V
7	2	D3	1N4448
		D4	1N4448
8	2	D7	MR851
		D8	MR851
9	1	F4	4A
10	2	L1	1mH (bobina rezonator)
		L2	1mH (bobina rezonator)
11	1	BNC	conector
12	3	Q1	BC546B
		Q4	BC546B
		Q8	BC546B
13	3	Q2	BC556B
		Q3	BC556B
		Q9	BC556B
14	1	Q6	BDX54C (tranzistor Darlington de putere, PNP , 80V, 60W)
15	1	Q7	BDX53C (tranzistor Darlington de putere, NPN , 80V, 60W)
16	2	R3	560
		R4	560
17	4	R5	10k
		R6	10k
		R23	10k
		R26	10k
18	2	R8	47
		R7	47
19	3	R12	330
		R13	330
		R20	330
20	2	R18	680
		R16	680
21	2	R19	470
		R17	470
22	1	R21	5.6k
23	1	R22	390k
24	1	R25	10
25	1	U1	LM741
26	1	2W	0.51/2 W
27	1	2W	0.51/2W

CAPITOLUL 6

CONSIDERAȚII FINALE, CONTRIBUTII ORIGINALE, PROBLEME DE VIITOR

Teza a abordat o temă de mare importanță pentru funcționarea și durata de viață a mașinilor hidraulice.

6.1. Implicațiile fenomenului de cavitație asupra exploatării și duratei de viață a mașinilor hidraulice.

În urma realizării unui studiu documentar privind fenomenul de cavitație și cercetând literatura de specialitate în acest domeniu a rezultat :

- Complexitatea fenomenului ;
- Procesul dinamic al fenomenului;
- Modul de apariție a eroziunii cavitaționale pe elementele active ale mașinilor hidraulice.

S-au prezentat succint considerațiile teoretice asupra fenomenului de cavitație, ecuația care descrie dinamica bulei cavitaționale în lichide vâscoase și incompresibile, mecanismele de distrugere cavitațională și posibilitățile de diminuare a degradării cavitaționale a materialelor folosite în construcția mașinilor hidraulice.

S-a făcut o prezentare a unor cercetări importante privind distrugerile cavitaționale asupra unor oțelurilor folosite la fabricarea elementelor active ale mașinilor hidraulice.

S-au scos în evidență cercetările efectuate pe diverse materiale: oțeluri carbon de calitate, oțeluri aliate, oțeluri inoxidabile și s-a făcut ordonarea rezistenței la cavitație a acestor materiale după masa de material erodat și viteza de eroziune la cavitație. Deoarece studiul "in situ" al distrugerii cavitaționale a elementelor active ale mașinilor hidraulice este laborios și greu de efectuat s-a folosit modelarea și simularea în laborator a degradării prin cavitație, metodă utilizată și acceptată de toți cercetătorii care s-au ocupat de acest fenomen.

S-au prezentat diverse instalații de laborator folosite la studierea degradării prin cavitație a materialelor :

- Tunele hidrodinamice;
- Aparat cu disc rotitor imersat în lichid,
- Aparat vibratorii magnetostrictive și piezo electrice.

În cercetările pe care le-am efectuat am folosit aparatul vibrator magnetostrictiv existent în LMHT.

Durata de viață a unei mașini hidraulice, precum și funcționarea sa la parametrii impuși este dependentă de mărimea și numărul de zone deteriorate prin eroziune cavitațională. Din literatura studiată a reieșit faptul că în timpul de funcționare al turbinei 20- 25 ani se necesită intervenții privind refacerea zonelor

distruse cavitațional, prin operații de sudare. Dacă frecvența intervențiilor pentru recondiționare este mică atestă că materialul folosit are o bună rezistență cavitațională. Rezistența la distrugere cavitațională depinde de mai mulți factori și anume :

- Proiectarea și tehnologia de fabricație a produsului;
- Calitatea, natura și starea structurală a materialelor folosite, în special la fabricarea paletelor rotoarelor de turbină;
- Parametrii energetici funcționali și de exploatare ai mașinii: P, H, H_s, Q, n, D.

Simularea în laborator a degradării prin cavitație și modelarea ei pune la dispoziția cercetătorului date tehnice și economice privind funcționarea și durata de viață a mașinii hidraulice.

6.2. Tehnologia și metodologia de cercetare a rezistenței la cavitație a materialelor.

Un material rezistent la cavitație va trebui să îndeplinească concomitent mai multe cerințe privind :

- caracteristicile chimice prin care se urmărește mărirea rezistenței la coroziune și oxidare;
- caracteristici fizice-termostabilitate, conductivitate termică și electrică bună;
- caracteristici structurale – care induc rezistență mare la rupere, o bună tenacitate și o ridicată limită la oboseală.

Există studii pertinente privind folosirea unor oțeluri aliate cu Cr, Mo, a unor oțeluri inoxidabile martensito- austenitice și a unor oțeluri inoxidabile martensitice.

Aceste oțeluri au fost folosite în stare tratată termic prin care li s-a asigurat fie o structură bainito-martensitică, fie structură martensitică sau o structură complexă martensită, austenită, ferită.

- Nu am găsit în literatura de specialitate tratată influența diferitelor variante de tratamente termice efectuate pe oțeluri inoxidabile austenitice sau martensitice și ca atare în cercetările efectuate am urmărit evidențierea rezistenței cavitaționale prin aplicarea a trei variante de tratament termic.
- Deasemenea la reparația prin sudare a zonelor degradate nu am găsit în literatura de specialitate cercetări privind rezistența cavitațională a zonei influențată termic, motiv pentru care mi-am propus să fac investigații în această zonă.

Metodologia de cercetare a rezistenței la eroziune cavitațională a oțelurilor austenitice și martensitice alese și tratate în diverse variante tehnologice a fost cea cu aparate vibratorii.

6.3. Materiale selectate pentru cercetări ale rezistenței cavitaționale din grupa oțelurilor inoxidabile.

S-au analizat normele și standardele de fabricație ale oțelurilor inoxidabile austenitice și martensitice care pot fi folosite la turnarea rotoarelor de turbină.

În conformitate cu SR EN 10283 /99 se folosesc ca oțeluri martensitice cele care conțin Cr; Cr - Ni; Cr - Ni - Mo, sau Cr - Ni - Cu. Din această grupă s-a ales pentru cercetare oțelul GX4CrNi13-4.

Din grupa oțelurilor inoxidabile austenitice sunt recomandate pentru turnarea rotoarelor de turbină calitățile Cr - Ni; Cr - Ni - Mo. Din această grupă am ales pentru cercetare oțelul inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10.

Pentru aceste oțeluri SR EN 10283 /99 indică.

- **Tratamentul termic clasic (călire + revenire** la oțelul martensitic, **călire de punere în soluție** la oțelul austenitic);
- Caracteristicile mecanice după aceste tratamente;
- Proprietățile fizice;
- Condițiile de sudare.

Luând în considerare prevederile normelor în primă etapă s-a aplicat la **oțelul inoxidabil austenitic GX5CrNi19-10:**

- **Călirea de punere în soluție** ($1050^{\circ}\text{C}/30\text{ min/}$ răcire în apă) și s-au determinat caracteristicile mecanice la temperatura ambiantă. De asemenea s-a făcut analiza metalografică și s-a stabilit că după acest tratament oțelul are structură austenitică cu unii grăunți maculați și o granulație $G=6$, conform ASTM. (fig. 2.2)

- **Nitrurare gazoasă**, după ciclogramă complexă (fig. 2.3) cu temperaturi de nitrurare: treapta I - $500^{\circ}\text{C}/25\text{h}$ și treapta II- $520^{\circ}\text{C}/28\text{h}$, răcire în atmosfera de nitrurare până la 170°C după care s-a continuat răcirea în aer.

- **Sablare și nitrurare.** S-a folosit o instalație de sablare cu nisip a probelor. Sablarea s-a făcut la presiunea de 4-6 bar, timpul de atac 75s, unghiul de atac 45° , granulația nisipului $50\ \mu\text{m}$.

- **Simularea sudării** zonelor degradate prin cavitație. S-a folosit procedeul de sudare electric manual cu electrozi înveliți realizând o îmbinare multistrat. S-au folosit electrozi Selectarc 18.8 Mn cu diametrul 2,5 mm respectiv 3,2 mm. S-au depus trei straturi anticavitaționale cu preîncălzire la 120°C și cu o energie termică de 10.130- 15.000J/cm².

Proba de încercare la cavitație s-a prelevat încât suprafața ei de atac să conțină zona influențată termic-ZIT.

Variantele de tratament termic cât și încărcarea prin sudare s-au făcut pe probe care au fost tratate inițial prin călire de punere în soluție. Probele folosite au fost de forma și dimensiunile necesare încercării la cavitație pe aparatul vibratoriu din LMHT.

Oțelul inoxidabil martensitic GX4CrNi13-4 a fost supus următoarelor variante de tratamente termice:

- **Călire** 1050⁰/ 1h / apă, **revenire** 650⁰ C/ 3h / aer. După acest tratament oțelul are caracteristicile mecanice impuse de standard și o structură formată din martensită de revenire cu carburi fin distribuite și o granulație G=5, conform ASTM.
- **Nitrurarea gazoasă** a oțelului martensitic. S-a aplicat nitrurarea gazoasă conform ciclogramei: -treapta I – 550⁰ C/24h și treapta II- 570⁰C/25h, răcire în atmosfera de nitrurare până la 170⁰ C după care s-a continuat răcirea în aer. (anterior oțelul a fost supus tratamentului termic de călire și revenire).
- **Sablarea și nitrurarea gazoasă** a oțelului martensitic s-a aplicat după tratamentul de călire/revenire, folosind aceeași instalație și parametrii indicați la oțelul inoxidabil austenitic.
- **Simularea sudării** zonelor degradate prin cavitație s-a făcut, prin depunere pe o bară paralelipipedică a straturilor de sudură tampon și anticavitaționale. Pentru stratul tampon s-a folosit electrodul de 3,2mm Selectarc 18.8 Mn, iar pentru straturile anticavitaționale electrodul de 4mm UTP 730, folosind procedeul de sudare electric manual cu electrozi înveliți. Energia termică introdusă este: la straturile tampon 10.350 – 15.000 J/cm² respectiv 11.520-16.900 J/cm² la straturile anticavitaționale. Proba de cavitație a fost prelevată ca să cuprindă la suprafața activă zona influențată termic.

6.4. Cercetări asupra rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile GX5CrNi19-10 și GX4CrNi13-4 tratate termic în diverse variante tehnologice și sudate.

Probele fabricate din cele două mărci de oțeluri și tratate termic în diverse variante tehnologice și respectiv sudate au fost supuse la atac cavitațional folosind un aparat magnetostrictiv cu tub de nichel.

Se prezintă în detaliu modul de funcționare al instalației și metodologia de încercare a probelor, respectând condițiile impuse de standard G 32-85 [123]. Rezultatele încercărilor la cavitație pentru fiecare calitate de oțel și variantă tehnologică au fost prelucrate și reprezentate grafic scoțând în evidență cei doi parametri caracteristici degradării cavitaționale: $m_a(t)$ – masa erodată și $v(t)$ – viteza eroziunii cavitaționale.

După 165 min de atac cavitațional oțelul austenitic GX5CrNi19-10 are parametrii degradării cavitaționale indicați în fig. 6.1 și fig.6.2.

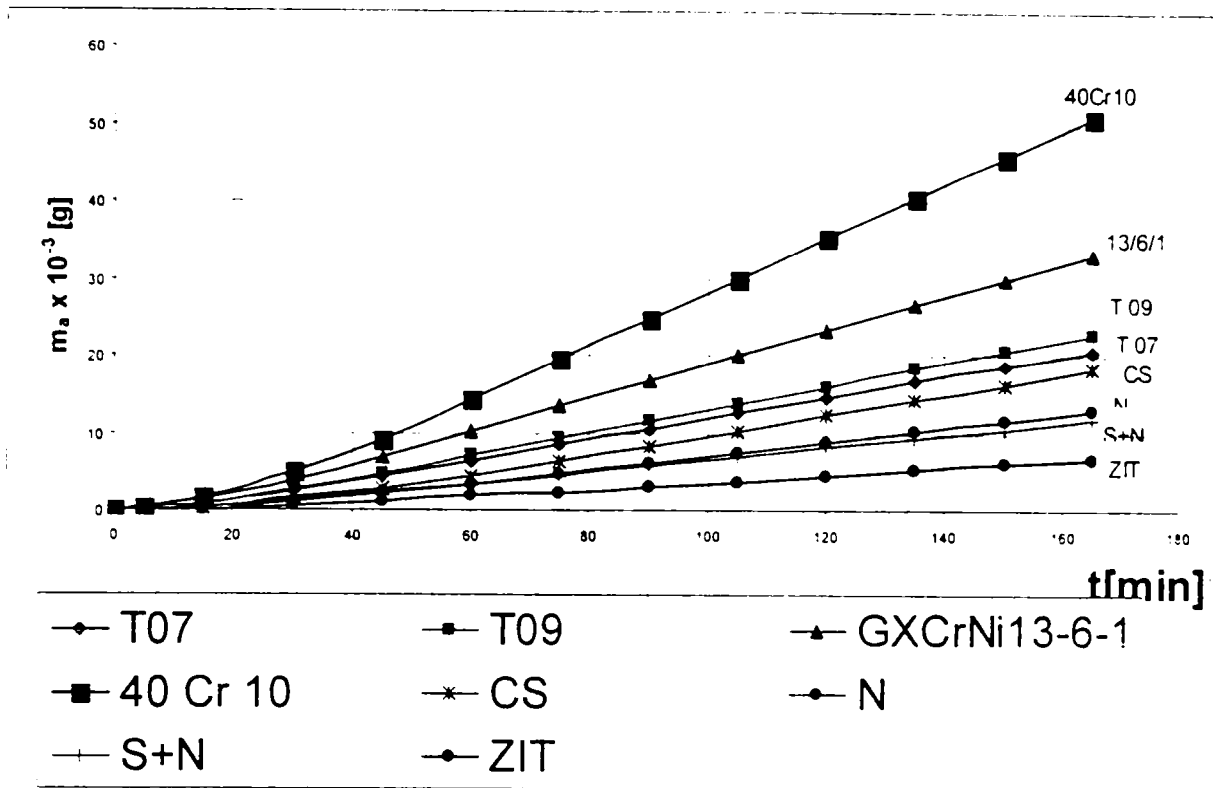


Fig.6.1. Compararea maselor erodate- oțel austenitic.

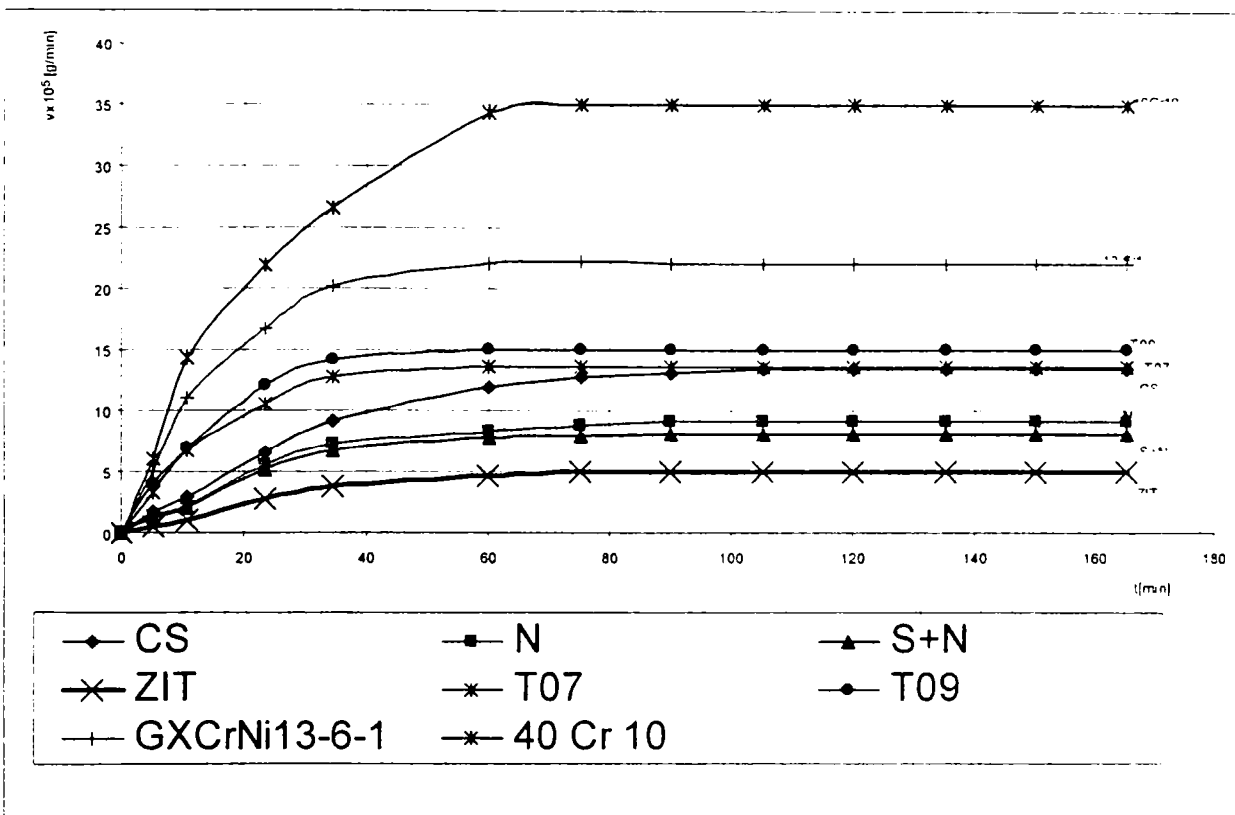


Fig.6.2. Compararea vitezelor de eroziune- oțel austenitic.

După 165 min de atac cavitațional oțelul martensitic GX4CrNi13-4 are parametrii degradării cavitaționale indicați în fig. 6.3 și fig.6.4.

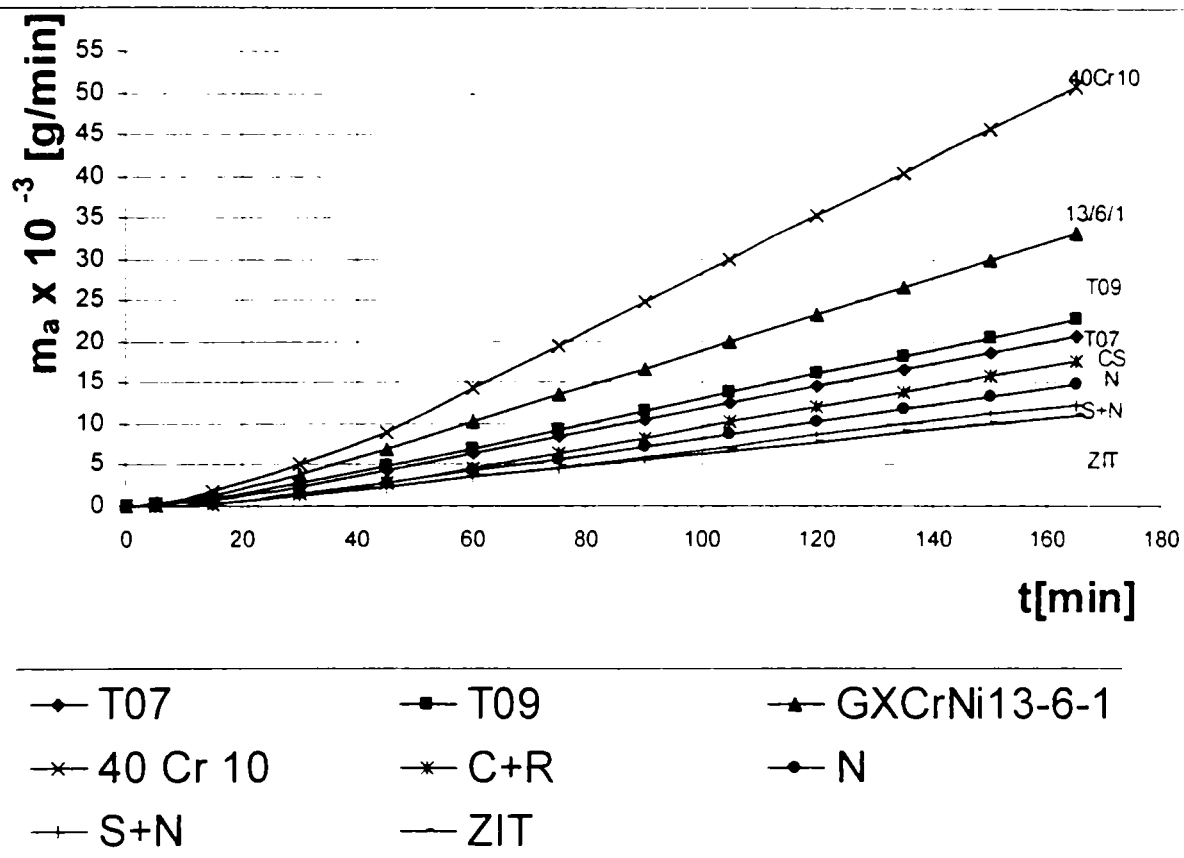


Fig. 6.3. Compararea maselor erodate- oțel martensitic

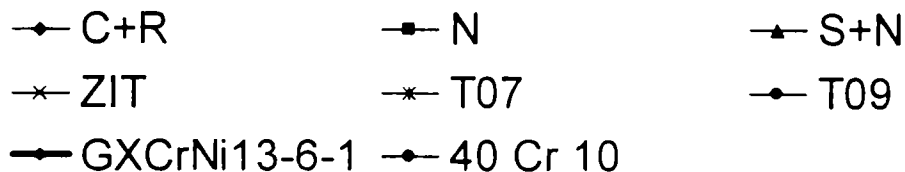
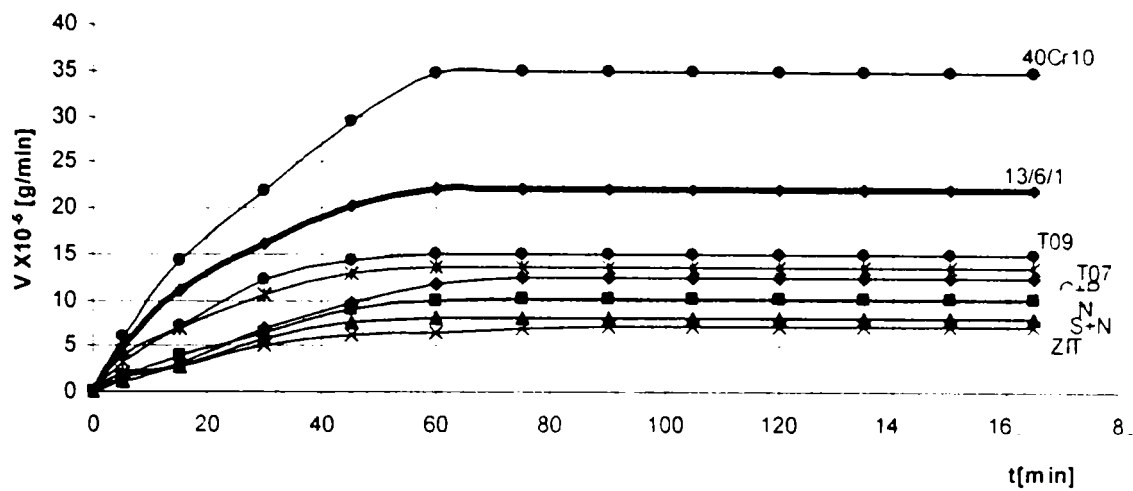


Fig. 6.4. Compararea vitezelor de eroziune- oțel martensitic

- Cele două oțeluri cercetate prezintă o rezistență cavitațională bună față de oțelurile din aceeași clasă (13/6/1, T09, T07) și excelentă comparativ cu oțelul de referință 40Cr10.
- Oțelurile martensitice în oricare din variantele tehnologice de tratament termic prezintă o mai bună rezistență cavitațională decât cele austenitice.
- Varianta de tratament termic care dă cea mai bună rezistență la cavitație, atât pentru oțelul austenitic cât și pentru cel martensitic este cea de călire de punere în soluție urmată de sablare și nitrurare gazoasă respectiv călire și revenire urmată de sablare și nitrurare gazoasă.
- În cazul reparării prin sudură a zonelor degradate prin cavitație s-a demonstrat că procedeul și regimul de sudare folosit este corespunzător iar materialele de adaos prezintă o rezistență la cavitație deosebit de ridicată în ZIT-ul sudurii.

Probele încercare din cele două mărci de oțeluri aflate în diverse stări de tratament termic și respectiv cele încărcate prin sudare au fost supuse unor metode de investigații în scopul de a evidenția fenomenele care au loc la distrugerea cavitațională.

S-au realizat analize macroscopice și analize microscopice și s-au evidențiat modul cum se propagă distrugerea prin cavitație, respectiv modificările de granulație și structură a straturilor deteriorate prin cavitație. **PLANȘA 6.1**

Analizele macroscopice s-au realizat cu un microscop stereo la diverse mărimi și s-au scos în evidență următoarele zone degradate cavitațional:

- o zonă centrală puternic erodată și cu apariții de microfisuri și fisuri;
- o zonă adiacentă celei centrale cu eroziuni mai slabe;

- o a treia zonă cu erodări puternice și cu microfisuri;
- o a patra zonă mai puțin atacată cavitațional.

Totodată se evidențiază și microdesprinderi de microgrăunți și crearea de porozități.

Aceste zone cu microfisuri și desprinderi de microgrăunți se întâlnesc la ambele oțeluri cercetate indiferent de varianta tehnologică de tratament termic aplicată.

Probele care au fost sablate și nitrurate prezintă mai puține microfisuri și mai puține desprinderi de microgrăunți cristalini, fapt care atestă buna lor rezistență la cavitație.

La probele sudate respectiv ZIT – ul lor prezintă la ambele oțeluri o sporită rezistență cavitațională.

Dat fiind faptul că oțelul martensitic a fost sudat cu strat tampon, comportarea ZIT – ului acestor oțeluri este similară cu cea a oțelurilor austenitice.

Analiza metalografică s-a realizat pe suprafața rezultată prin secționarea longitudinală a probelor încercate la cavitație.

Problele au fost înglobate în material plastic, supuse prelucrării și atacului metalografic conform normelor în rigoare (fig.3.45)

S-au făcut investigații comparative în trei zone ale probei A – neafectată de cavitație, B și C – afectate de cavitație (fig. 3.46) .

Analiza metalografică scoate în evidență următoarele aspecte:

I) OȚELUL AUSTENITIC

- în zona neafectată de cavitație o structură austenitică omogenă cu unii grăunți maculați cu granulație G=6;
- în zonele afectate cavitațional apar microfisuri la limitele de grăunți, desprinderi și expulzări de grăunți;

Se remarcă în zona afectată de cavitație o finisare de granulație și precipitări complexe la limita și în interiorul grăunților austenitici (Planșa 1 fig. 1-4).

- la probele **nitrurate gazos** apare un strat de nitruri de Fe și nitruri ale elementelor de aliere cu o grosime până la 0,1 mm;
- între stratul nitrurat și materialul supus nitrurării apare un strat de tranziție cu precipitate de nitruri în grăunții cristalini.

Mecanismele erodării cavitaționale constau în topiri zonale, crearea de microfisuri, modificări structurale dar cu o intensitate mai mică decât în cazul călirii de punere în soluție.(Planșa 2 fig. 1-5)

- **sablarea și nitrurarea** oțelului austenitic indică apariția unor microasperități ale suprafeței create de sablare și o finisare a granulației de o adâncime de câțiva microni și un strat nitrurat bine conturat în special pe asperitățile create de sablare (Planșa 3 fig. 1-3).

În cazul probelor încercate la cavitație din **zona influențată termic** apar:

- creșteri dendridice ale grăunților și numeroase precipitări de carburi fine intergranulare, cu o finisare a granulației (Planșa 4 Fig. 1-4)

Mecanismul de degradare prin cavitație a acestor probe este similar cu cel de la probele tratate prin călire de punere în soluție dar de intensitate mai mică.

II) OȚELUL MARTENSITIC

- în zona neafectată de cavitație prezintă o structură formată din martensită de revenire cu numeroase precipitări de carburi fine în acele de martensită; (Planșa 5 fig. 1)
- în zonele afectate de cavitație se observă apariția de microfisuri, desprinderi și expulzări de grăunți, în special în zona centrală a atacului cavitațional; (Planșa 5 fig. 2-4)
- **nitrurarea gazoasă** aplicată după călire și revenire atestă apariția unui strat de nitruri cu grosimi până la 0,1 mm, un strat de tranziție și structura corespunzătoare călirii și revenirii

Erodarea se realizează prin expulzarea de grăunți cristalini și modificarea

- precipitatelor în stratul nitrurat. Apar mai puține microfisuri și expulzări de microgrăunți. (Planșa 6 fig. 5)
- **tratamentul de sablare și nitrurare** produce finisare a granulației pe adâncimi de câțiva microni fără a crea asperități pe suprafața probei. (Planșa 7 fig. 1-5)

În urma atacului cavitațional apare o finisare de faze și precipitate.

- Prin tratamentul de **sablare și nitrurare gazoasă** se creează un microstrat durificat care mărește rezistența la cavitație a oțelului.
- Probele **încărcate prin sudare** dat fiind prezența stratului tampon care este format din oțel inoxidabil austenitic are o rezistență cavitațională asemănătoare cu ZIT-ul probelor analizate la oțelul austenitic. (Planșa 8 fig. 1-5)

Probele încercate la cavitație aflate în diverse stări de tratament termic au fost supuse încercărilor de microduritate.

ÎNCERCĂRI DE MICRODURITATE

S-au făcut încercări de microduritate HV0,2 și HV0,1 în cele trei zone considerate A, B și C. A- zona afectată de cavitație, B- zona de început de cavitație, C- zona centrală de cavitație. Investigația s-a făcut cu pas de 0,1 mm pe adâncimi de până la 1,2 mm (fig. 3.47)

S-a făcut prelucrarea măsurătorilor și s-a reprezentat variația microdurității pe adâncimea zonei supuse cavitației.

S-au reprezentat în graficele 3.48- 3.55 variațiile de microduritate în cele trei zone de măsurare pentru cele trei variante de tratament termic și respectiv pentru ZIT-ul probelor încărcate prin sudare.

Măsurătorile de duritate efectuate scot în evidență următoarele aspecte în funcție de varianta de tratament termic aplicat:

- La oțelul austenitic în urma călirii de punere în soluție apare în zona afectată de cavitație o ușoară scădere a durității de la 200 la 185

HV0,2, situație care este în deplină concordanță cu investigația metalografică. (fig.3.48 A)

Aplicarea **nitrurării gazoase** produce la oțelul austenitic o creștere de duritate pe adâncimii de până la 0,1 mm de la 185 la 370 HV0,2, iar la cel martensitic o creștere de la 300 la 370 HV0,2. Creșterea de duritate este în concordanță cu starea structurală și justifică mărirea rezistenței la coroziune.

În zonele afectate de cavitație microduritatea se apropie de cea dată de tratamentul aplicat inițial, situație normală deoarece prin cavitație s-a distrus stratul nitrurat. (fig.3.48 B, C)

Sablarea și nitrurarea gazoasă provoacă o creștere a durității în straturile superficiale și anume:

- La **oțelul austenitic** în zona neafectată cavitațional apar durități de 450 HV0,2 iar în zonele afectate de cavitație microduritatea este la nivelul de 270 HV0,2, ceva mai mare decât cea obținută prin călirea de punere în soluție; (fig.3.49 A, B, C)
- La **oțelul martensitic** apar în straturile superficiale durități de 1000 HV0,1 care variază pe adâncime stabilindu-se la duritatea de 300 HV0,1, corespunzătoare stării de tratament termic inițial aplicat oțelului; (fig.3.53 A)
- În zonele afectate de cavitație variația de microduritate se situează în aceleași limite ca și în zona neafectată de cavitație și variațiile de duritate sunt în deplină concordanță cu modificările structurale prezentate în capitolul anterior. (fig.3.53 B, C)

La **probele încărcate prin sudare** măsurătorile de microduritate au scos în evidență următoarele aspecte :

- La oțelul austenitic GX5CrNi19-10, în zona neafectată de cavitație (A) pe adâncimi de până la 0.8 mm, duritățile sunt aceleași ca la oțelul supus numai tratamentului termic de călire de punere în soluție, 180 – HV0,2. (fig.3.51 A)
- În zonele afectate de cavitație B și C se constată ecrusări ale oțelului de 240 – HV0,2 în zona B, iar în zona C – cea mai puternică atacată cavitațional, duritatea ajungând în stratul superficial 330 – HV0,2 (Obs. : ecrusare neelucidată în faza actuală a cercetărilor, dar se presupune că prin procesele complexe induse de cavitație în straturile adiacente apar stări tensionale, care ar justifica acest gradient de duritate).
- la adâncimi mai mari de 0,7 mm, duritatea 190 – HV0,2 este aceeași ca și la materialul tratat termic numai prin călirea de punere în soluție.
- la oțelul martensitic GX4CrNi13-4, în zonele neafectate de atacul cavitațional – A și în zonele de tranziție, zonele – B, duritățile 220–HV0,2 sunt identice cu cele ale oțelului supus numai tratamentului termic de călire și revenire.
- se constată o ușoară creștere a durității la 285–HV0,2, valori în concordanță cu cele analizate la cercetarea metalografică a ZIT- ului oțelului GX4CrNi13-4, încărcat prin sudură cu straturi tampon și straturi anticavitaționale (Paragraf 3.5.3.8).

Analiza metalografică și încercările de duritate au scos în evidență influența calității oțelului și a variantelor de tratament termic și a ZIT-ului probelor sudate asupra rezistenței lor cavitaționale.

CONCLUZIILE PRINCIPALE privind rezistența la cavitație a oțelurilor încercate sunt:

- dintre toate variantele tehnologice de tratament termic aplicate celor două calități de oțeluri, tratamentul termic de călire de punere în soluție pentru oțelul austenitic GX5CrNi19-10, respectiv călire și revenire în cazul oțelului martensitic GX4CrNi13-4, urmate de **tratamente de sablare și nitrurare gazoasă conferă oțelurilor cea mai mare rezistență la eroziune cavitațională.**
- încercările experimentale la cavitație pe probele confecționate din oțelul austenitic GX5CrNi19-10 și martensitic GX4CrNi13-4, au arătat că **oțelul martensitic are rezistență la eroziune cavitațională în variantele tehnologice de tratament termic de călire și revenire, respectiv sablare și nitrurare,** recomandându-l cu prioritate la turnarea rotoarelor de turbină hidraulică.
- ZIT-ul probelor sudate ale ambelor oțeluri are o bună comportare la cavitație ceea ce atestă faptul că procedeul și tehnologia de sudare folosită sunt compatibile.

Studiul tehnico-economic privind costurile cu reparația la cavitație, făcut în conformitate cu normele în vigoare și cu „Devizul 4.3” aplicat la un agregat de la CHE PF I a fost pus în evidență în tab.6.1.

Tabelul 6.1.

Nr. crt.	Cheltuieli	Valoare [€]	
		Oțel martensitic	Oțel austenitic
1	Materii prime și materiale	7.988	6.607
2	Manoperă	19.882	19.882
3	Cheltuieli cu CAS 24,5 %(2) și protecție socială 11,6% (2)	7.177	7.177
4	Cheltuieli comune unității 74% (2+3)	20.023	20.023
5	Total cost compartiment (1+2+3+4)	55.070	53.689
6	Cheltuieli indirecte 25%(5)	13.767	13.422
7	Total (5+6)	68.837	67.112
8	Beneficiu 10% (7)	6.883	6.711
9	Total(7+8)	75.720	73.823
10	TVA 19 % (9)	14.386	13.667
11	Total general (9+10)	90.106	87.850
12	Total rotunjit	90.000	88.000

Compararea rezultatelor obținute din studiul tehnico-economic asupra celor două mărci de oțeluri tratate în diverse variante tehnologice sunt evidențiate în tab. 6.2.

Concluzia finală a studiului tehnico-economic atestă că oțelurile martensitice sunt mai rentabile pentru fabricarea prin turnare a rotoarelor turbinelor hidraulice.

Diferența de costuri cu intervențiile la cavitație și cu materialele, între cele două rotoare, cel turnat din oțel austenitic GX5CrNi19-10 și cel turnat din oțel martensitic GX4CrNi13-4, variază între 20.000 și 110.000 Euro în funcție de varianta de tratament termic aplicată.

Tabelul 4.2. Compararea rezultatelor obținute din calculele efectuate pentru oțelul austenitic și martensitic

Tratament termic	MARTENSITIC GX4CrNi13-4				AUSTENITIC GX5CrNi19-10				(*) $\Delta C_T = C_T(M) - C_T(A)$ [milioane] €
	K	Nr intervenții	Costuri		K	Nr. intervenții	Costuri		
			C_{Totale} [milioane] €	$C_{Reducere}$ [%]			C_{Totale} [milioane] €	$C_{Reducere}$ [%]	
C+R	1	17	1,530	bază	X	X	X	X	0,406
CS	X	X	X	X	1	22	1,936	bază	0,198
N+ SUDAT	1,6	11	1,013	34	2,7	9	0,815	58	0,109
S+N +SUDAT	1,6	10	0,925	40	2,7	9	0,816	58	0,109

NOTA:

- K- coeficientul indicelui relativ al rezistenței la eroziune cavitațională
- $C_{Reducere}$ (%) –reducerea C_{Totale} prin aplicarea diferitelor variante de tratament termic
- (*) ΔC_T – reprezintă diferența dintre costurile totale ale celor doua mărci de oțel; $\Delta C_T = C_T(M) - C_T(A)$

Studiul tehnico-economic recomandă ca să se folosească prioritar la turnarea rotoarelor de turbină cu puteri mai mari de 1MW oțeluri mantensitice GX4CrNi13-4 tratat termic prin varianta: călire + revenire + sablare + nitrurare gazoasă.

6.5. Proiect tehnic și de execuție al unui aparat vibrator pentru încercări la cavitație.

În capitolul 5 am efectuat cercetări privind proiectarea și realizarea unui aparat vibrator magnetostrictiv al cărui generator de ultrasunete este construit utilizând componente semiconductoare.

Din punct de vedere constructiv un generator cu magnetostricțiune poate fi realizat folosind dispozitive electronice, fie tuburi electronice, fie tranzistoare.

Tuburile electronice sunt folosite încă, mai ales la aparatele vibratorii de mare putere ($P = 500W$ în cazul aparatului existent în laborator), având avantajul robusteții electrice.

Totuși, **dezavantajele** care le prezintă sunt majore.

Din cauza faptului că nu se produc pe scară largă, tuburile electronice au devenit la ora actuală deosebit de scumpe și dificil de înlocuit în caz de defectare.

Prin urmare, concluzia pe care am desprins-o a fost că vechiul sistem este depășit din punct de vedere tehnologic.

Totodată dispozitivele semiconductoare au devenit din ce în ce mai atractive, atât din punct de vedere al prețului de cost, cât și al performanțelor electrice, astfel încât, astăzi se preferă utilizarea acestora chiar și în cazul aparatelor vibratorii industriale de mare putere.

Mi-am propus, în primă fază, o abordare teoretică a unui aparat vibrator cu generatorul din componente semiconductoare, cu realizarea practică la o scară redusă de putere a unui generator de ultrasunete.

S-a realizat instalația de laborator având în schema bloc a generatorului următoarele componente: oscilator reglabil, blocul circuitelor de alimentare, amplificatorul de putere și bobina rezonator [cap. 5, fig. 5.6].

În această fază s-a păstrat sistemul de tuburi rezonatoare din nichel pe frecvența de rezonanță de aproximativ 7 KHz.

Am reușit, în acest fel, fără riscuri materiale prea mari să verific fezabilitatea acestei noi concepții desprinzând concluzii asupra performanțelor cât și asupra problemelor care pot apărea în cazul realizării unei instalații la scară industrială.

La testarea funcțională a aparatului s-a măsurat o putere electrică de aproximativ 50W fără să apară o încălzire notabilă a tranzistorilor finali ai amplificatorului.

Întreaga instalație este realizată sub o formă compactă, ușor de manevrat și transportat, de mici dimensiuni [vezi fig. 5.15].

Singurul reglaj necesar din partea operatorului este al frecvenței de lucru a oscilatorului, pentru ca acesta să funcționeze exact pe frecvența de rezonanță a tubului de nichel utilizat.

Rezultatele testării practice a acestei instalații sunt foarte încurajatoare din toate punctele de vedere: electric, mecanic, electronic.

La testare s-a folosit un multimetru digital de tip MY-65 și un osciloscop digital de tip HAMEG (HM 407), conectat la calculator și a căror oscilogramă le-am redat în Anexa 1.

În concluzie, prin proiectarea tuturor părților componente ale generatorului, prin realizarea, asamblarea lor și testarea acestui generator la scară redusă,

rezultă că noua concepție este fiabilă. Verificându-i fezabilitatea și reținând concluziile și corecturile pentru abordarea la o scară de mai mare putere, se poate afirma cu certitudine, că realizarea unui generator magnetostrictiv de mare putere este, în acest moment, un lucru facil de realizat și va constitui o provocare și o preocupare viitoare.

6.6. Contribuții proprii la studiul fenomenului de cavitație

Prin studiile și cercetările efectuate în cadrul acestei teze de doctorat, consider că mi-am adus modeste contribuții și anume:

- Prezentarea sintetică a literaturii de specialitate privind fenomenul de cavitație a permis evidențierea unei metodologii noi de cercetare, prin care se evidențiază modificările de structură și de proprietăți ale materialului.
- S-a perfecționat metodologia aplicată cercetării rezistenței la cavitație a materialelor.
- S-au aplicat diferite variante tehnologice de tratament termic la oțeluri inoxidabile austenitice și martensitice la două mărci reprezentative.
- S-au făcut cercetări privind parametrii tehnologici ai variantelor de tratare termică: nitrurarea gazoasă, sablare (durificare prin sablare), urmată de nitrurare gazoasă.
- Aceste variante tehnologice s-au aplicat oțelurilor în stare inițială de călire de punere în soluție la oțelurile austenitice respectiv călire volumică și revenire la oțelurile martensitice.
- S-au făcut cercetări privind reparația prin sudură a zonelor din palete distruse cavitațional.
- S-au făcut cercetări privind procedeul de sudare, tehnologia de sudare și materialul de adaos.
- S-a precizat pentru fiecare marcă de oțel regimul de sudare, electrozii de sudare și modul de realizare a straturilor tampon și a celor anticavitaționale.
- S-au efectuat cercetări a rezistenței la cavitație în zona influențată termic, a reparației prin sudură, situație care nu am întâlnit-o studiată în literatura de specialitate.

S-a folosit o metodologie clasică de determinare a rezistenței la cavitație a oțelurilor cercetate.

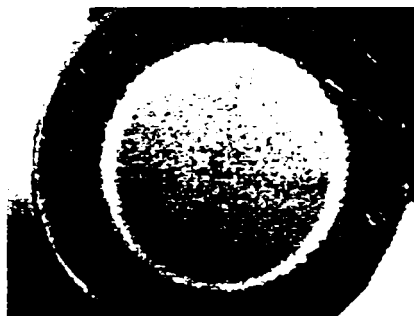
S-au prelucrat datele experimentale și s-au trasat variația parametrilor principali ai degradării prin eroziune cavitațională, viteza de eroziune cavitațională $v(t)$ și $m_a(t)$ masa de material erodat.

- S-a făcut o comparație a rezultatelor obținute pe aceste oțeluri, cu oțeluri din aceeași familie sau cu oțeluri slab și mediu aliate și s-a constatat că în toate variantele tehnologice se obține o mărire a rezistenței la cavitație.
- Cea mai bună rezistență la cavitație se obține prin tratamentul de sablare și nitrurare clasică atât la oțelurile inoxidabile austenitice, cât și la cele martensitice.
- Rezistența la cavitație a zonei influențată termic la cele două mărci de oțel (atât la oțelurile austenitice, cât și la cele martensitice) este foarte bună, situație scoasă în evidență prima dată prin cercetări proprii.
- S-a aplicat o metodologie specială de investigație a materialelor degradate prin cavitație, urmărind obținerea unor date noi asupra mecanismului distrugerii materialului.

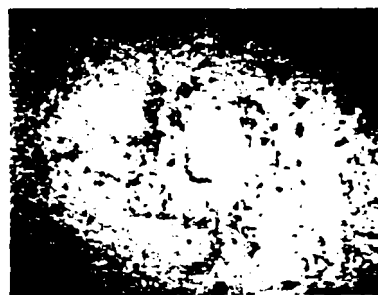
Analizele metalografice optice realizate pe secțiunea longitudinală și transversală a probelor încercate la cavitație, precum și măsurătorile de microdurate efectuate în aceste zone, au scos în evidență **mecanismul de producere a cavitației prin topiri în microzone, prin stări tensionale, termice și mecanice care au provocat microfisuri, desprinderi de grăunți cristalini, modificări de faze în substraturi și expulzarea de material prin craterele formate.**

PLANȘA 6.1 OȚEL MARTENSITIC GX4CrNi13-4

MACROSTRUCTURA



(C + R) MO 10X
Fig. 1



(C + R + N) MO 20X
Fig. 2

MICROSTRUCTURI



Fig.1 (C+R) MO 500X

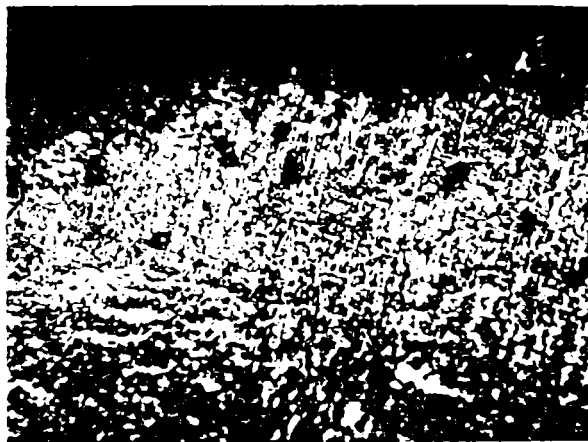


Fig.2 (C+R+N) O 5



Fig.3 (C+R+S+N) MO500X

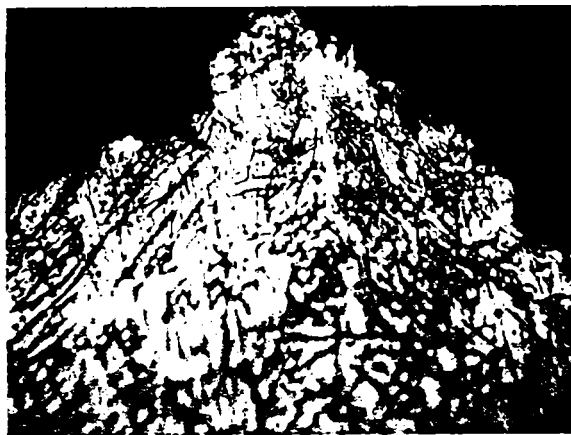


Fig. 4 (C+R+SUDAT) MO500X

- De asemenea, s-a evidențiat faptul că varianta de tratament termic care induce în straturile superficiale tensiuni de compresiune și faze structurale noi și finisări ale granulației (sablare și nitrare gazoasă), conferă materialului o mărită rezistență la cavitație.
- Analizele structurale și cele de microduritate în zona influențată termic a reparațiilor prin sudură a zonelor degradate a scos în evidență, modificări de structură și de durități, prin care se explică buna rezistență la cavitație a acestei zone.
- S-a prezentat o metodologie modernă de evaluare tehnico-economică privind rezistența la cavitație a oțelurilor inoxidabile austenitice, și martensitice, tratate în diverse variante tehnologice și s-au scos în evidență costurile necesare măririi rezistenței la eroziune cavitațională, cât și a intervențiilor pentru reparații a zonelor cavitaționale pe durata de exploatare a mașinii hidraulice de 22-25 ani.
- În cadrul metodologiei aplicate în studiul tehnico-economic am folosit pentru prima oară în forma definită în cap. 4.1, pentru calculul costurilor, coeficientul **K – coeficientul indicelui relativ al rezistenței la eroziune** cavitațională, care ia în considerație rezistența la cavitație natura materialului și variantele tehnologice de tratament termic.
- S-a evidențiat că fabricarea rotoarelor de turbină din oțelurile inoxidabile martensitice prezintă un indice tehnico-economic mai bun. Aplicarea variantei tehnologice – sablare, nitrurare la ambele oțeluri are un indice tehnico-economic mai bun și se recomandă aplicarea în practică.
- S-a proiectat, executat și experimentat un aparat vibrator cu componente semiconductoare, necesar cercetărilor de laborator a rezistenței cavitaționale a materialelor.

În cadrul proiectului sunt date detalii privind executarea diverselor părți componente a aparatului și necesarul de materiale pentru executarea aparatului vibrator, care are următoarele **date tehnice** :

- Dimensiuni gabarit [mm]: $L = 260, l = 150, h = 110$
- Masa [kg]: $m = 5$
- Tensiunea de alimentare: $U = 210-240V / 50 \text{ Hz}$
- Putere absorbită : $P = \text{max. } 80W$
- Frecvența generată $f = 6000-8000\text{Hz}$
- Putere electrica la ieșire $P = 50W$
- Amplitudine de ieșire fără sarcina: $A_{\text{fără sarcină}} = 55V_{\text{v}}$
- Amplitudine de ieșire cu sarcină: $A_{\text{sarcină}} = 150V_{\text{v}}$
(la rezonanță)

6.7. Direcții posibile de continuare a cercetărilor rezistenței la cavitație a materialelor

Dat fiind complexitatea fenomenelor degradării prin cavitație a materialelor folosite la fabricația mașinilor hidraulice este necesar de a face cercetări mai ample privind tratamentul termic, privind finețea cercetărilor structurale și mărirea posibilităților conducerii automate a încercărilor.

Consider că se pot aborda și se pot face cercetări în continuare în trei direcții:

1. La calitățile de materiale cercetate se impune folosirea și a altor tehnologii de tratare termică, cum ar fi: durificarea superficială cu energii concentrate și tratamente termomecanice.
2. Elucidarea mecanismelor degradării prin cavitație impune folosirea unor metode mai moderne de investigație: analize metalografice electronice, iradierea cu raze „X”, analiza cu flux de electroni, spre a se evidenția modificările structurale în diverse etape ale degradării prin eroziune cavitațională.
3. Folosirea noului aparat vibrator pentru cercetările rezistenței la cavitație, dat fiind fiabilitatea sa ridicată și posibilitățile mari de reglare a parametrilor încercării. În viitor, s-ar putea automatiza aceste încercări laborioase prin achiziționarea și prelucrarea rezultatelor folosind calculatorul.

CHAPTER 6

FINAL CONSIDERATIONS, ORIGINAL CONTRIBUTIONS, FUTURE PROBLEMS

The approached a very important theme for the function and lifetime duration of hydraulic machines.

6.1 The cavitations phenomenon implications above the exploitation and lifetime duration of hydraulic machines.

As a conclusion of a documentary study regarding the cavitations phenomenon and examine the literature in this area resulted:

- The phenomenon intricacy
- The dynamic processes of the phenomenon
- The appearance mode of cavitations erosion on active elements of the hydraulic machines.

The theoretical consideration about the cavitations phenomenon were seceded presented, the equation that describes dynamic in viscous liquids of the cavitations, the cavitations destruction mechanisms and the diminution possibilities of cavitations degradation of used materials in hydraulic machines construction.

It was made a presentation of some important investigations regarding the cavitations destructions about the tools used to the manufacture of active dements for hydraulic machines.

There were revealed the studies that were affected on different materials: carbon steels, allied steels, stainless steels and was made the resistively ordure to these materials cavitations took after the cradled material mass and the cavitations erosion speed. Because this study "in situ" of the cavitations destruction of the active elements of hydraulic machines is very hard in making it, it was used for cavitations degradation the laboratory molted and simulated. This method is used and accepted by all the researchers in domain.

There were presented different laboratory installations used to the degradation through materials cavitations study.

- Hydrodynamic tubes
- Devices with runner in liquid
- Vibratory devices magnetostrictive and piezo-electrical

The researches were effectuated with the Vibratory devices magnetostrictive.

The hydraulic machine lifetime, as well as its operation under the imposed depends on the size and number of areas damaged by cavitations erosion.

The studied literature revealed the fact that a turbine functions 20-25 years and it needs interventions regarding the improvement of the areas cavitation destroyed, through welding operations. If the frequency of interventions for reestablishment is small shows that the material used has

a good cavitations resistance. The resistance to cavitations destruction depends on a lot of factors, as:

- The manufacturing, design and the technology of the product
- The quality, the nature and the structural state of the used materials, specially in the manufactured blades of turbine runners.
- The functional energetically parameters and the machine exploitation: P, H, Hs, Q, n, D.

The laboratory simulation of the degradation through cavitations and its molted offers to the researches technical and economical dates regarding the function and the lifetime of a hydraulic machine.

6.2 The technology and the methodology of resistance research to the materials cavitations

A resistant material to cavitations must complete in the same time a lot of conditions regarding:

- The chemical characteristics through which the resistance size to corrosion and oxidation is in view.
- The physical term stability characteristics, thermal conductivity and good electrical.
- Structural characteristics which create a high breaking resistance, a good tenacity and a high tired level.

There are studies regarding the using of some alloyed steels with Cr, Mo, of some martensitic-austenitic stainless steels and of some martensitic stainless steels.

These steels were used into a thermal treated state through which they were given a bainite-martensitic structure and a martensitic structure or a martensitic, austenitic, protected complex structure.

In the studied literature it was not found the influence of different ways thermal treatments made on stainless martensitic or austenitic steels and as a consequence in the researches we wanted to show the cavitations resistance by using three variants of thermal treatment.

Also, to the welding re-improvement of the cavitations resistance of the thermal influenced are lottery messing, so I started to make researches in this area.

The researches methodology of resistance to cavitations erosion of austenitic and martensitic steels chosen and traded in different technological variants was that with vibratory devices.

6.3 Selected materials for cavitations resistance researches belonging to the stainless steel group

The norms and standards of fabrication of austenitic and martensitic stainless steel that can be used in casting rotor turbines have been analyzed.

According to SR EN 10283/99 the martensitic steels in usage are the ones that contain Cr; Cr- Ni, Cr-Ni-Mo, or Cr-Ni-Cu. In this group the chosen steel for research is GX4CrNi13-4.

In the austenitic stainless steel group the Cr-Ni; Cr-Ni-Mo are recommended for casting rotor turbines. In this group we chose for research the austenitic stainless steel GX4CrNi19-10.

For these steels the SR EN 10283/99 indicates:

- Classical thermo treatment (quenching +tempering in martensitic steels, solution heat treatment in austenitic steel);
- Mechanical characteristics after these treatments;
- Physical properties
- Welding conditions.

Considering the norms' foresights in the first stage it was applied to:

I.THE AUSTENITIC STAINLESS STEEL GX5CRNI19-10:

- **Solution heat treatment** (1050 C degrees/30 min/water cooling) and the mechanical characteristics were determined at ambient temperature. Also the metallographic analysis established that after this treatment the steel has austenitic structure with macles in some grains and a granulation G=6, according with ASTM [123] (fig. 2.2)
- **Gassed nitrating**, as in the complex cyclograma (fig. 2.3) with the nitrating temperatures: step I-500 C degrees/25 h and step II-520 C degrees/28 h nitrating atmosphere cooling up to 170 C degrees and continued in air.
- **Sand-blasting and nitrating**. A sand-blasting installation was used. The sand-blasting was done at a pressure of 4-6 bars, for 75 s, at an attack angle of 45 degrees and sand granulation of 50 mm.
- **Welding simulation** of the degraded thru cavitations areas. The manual electric welding with covered electrodes method was used. Selectrac 18, 8 Mn with thermal energy of 10130-15000 J/cm² settled.

The cavitations trial was mode so that its attack will contain the thermal influenced zone –ZIT. The samples were manufactured from the thermal influenced area.

The thermal treatment options as well as the charging thru welding were made on probes initially treated thru solution heat treatment. The probes used had the necessary shape and dimensions for cavitations trials on the vibratory devices from LMHT.

THE MARTENSITIC STAINLESS STEEL GX4CRNI13-4

was submitted to these thermal treatments:

- **Quenching** 1050 C degrees/1 h/water,- **tempering** 650 C degrees/3 h/air. After this treatment the steel has the mechanical characteristics required by standards and a structure formed from tempered martensite. With fine carbides uniform distributed and a granulation G = 5, ASTM.
- **Gassed nitrating** of martensitic steel. The gassed nitrating was applied in conformity with the cyclorama – step 1-550 C degrees/24 h and step 2 – 570 C degrees / 25 h cooling in nitrating atmosphere up to 170 C degrees, continued in air.
- **Sand-blasting and gassed nitrating** of the martensitic steel was applied after the quenching / tempering treatment, using the same installation and parameters indicated in austenitic stainless steel.
- **Welding simulation** in the areas affected by cavitations was made through sedimentation on a parallelepipedical beam of the buffer and anticavital welding layers. For the buffer layer the 3.2 mm Selectarc, 18.8 Mn electrode was used and for the anticavital layers the 4 mm UPT 730 electrode using the wrapped electrodes manual electric welding technique. The induced thermal energy is: buffer layers 10350-15000 J/cm² and 11520-16900 J/cm² on the anticavital layers. The cavital test was sampled to contain on the active surface the thermal influenced zone.

The samples were manufactured from the thermal influenced area.

6.4. Researches on the stainless steel cavitations resistance GX5CrNi19-10 and GX4CrNi13-4 thermally treated indifferent technological varieties and welded.

The samples from the two brands of steel, thermally treated in many ways and welded were submitted to cavital attack using a vibratory magnetosrictive devices with a Ni tube.

The detailed operations are shown, following the G32-85[123] standard.

The cavitations trial results for each steel quality have been graphically represented, showing the two main parameters of cavitations degrading: Ma (t)-eroded mass and V (t)-speed of cavital erosion.

After 165 minutes of cavital attack the austenitic steel GX5CrNi19-10 has the cavitations degrading parameters indicated in fig 6.1 and 6.2

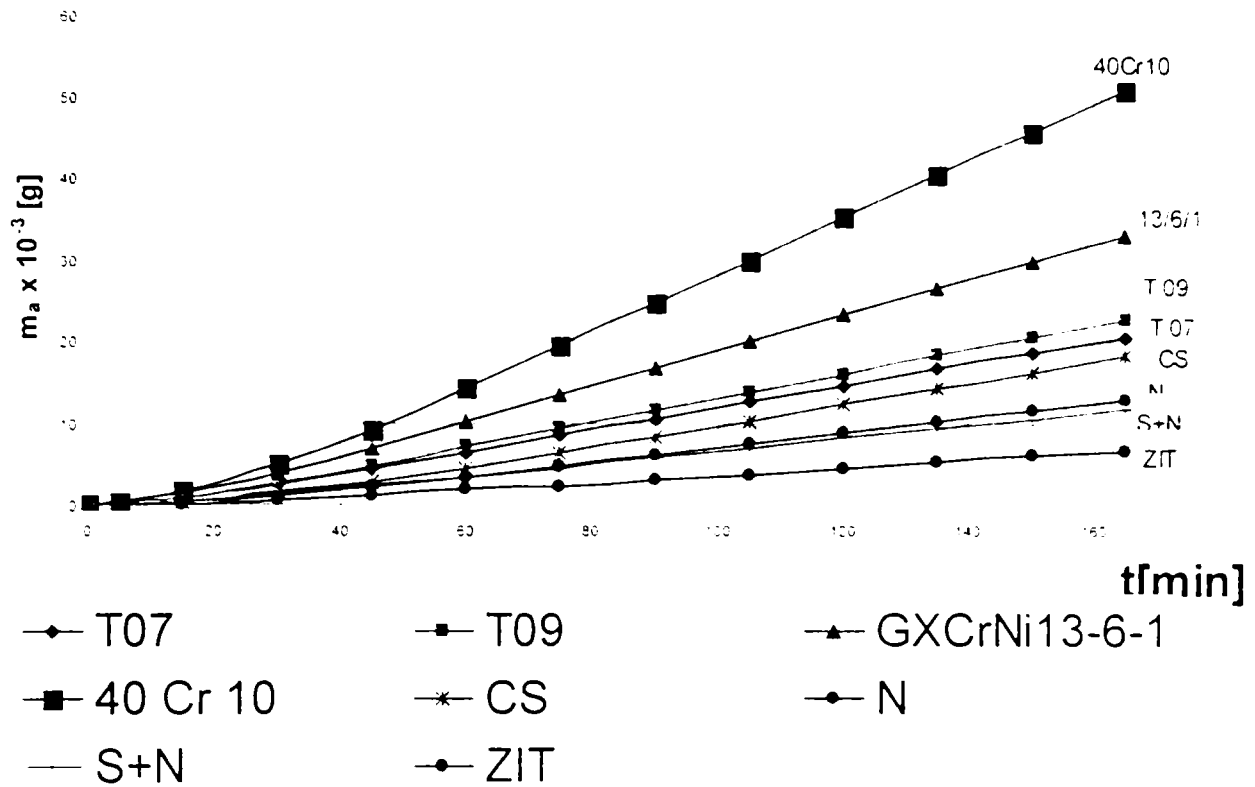


Fig.6.1. Eroded mass- austenitic steel

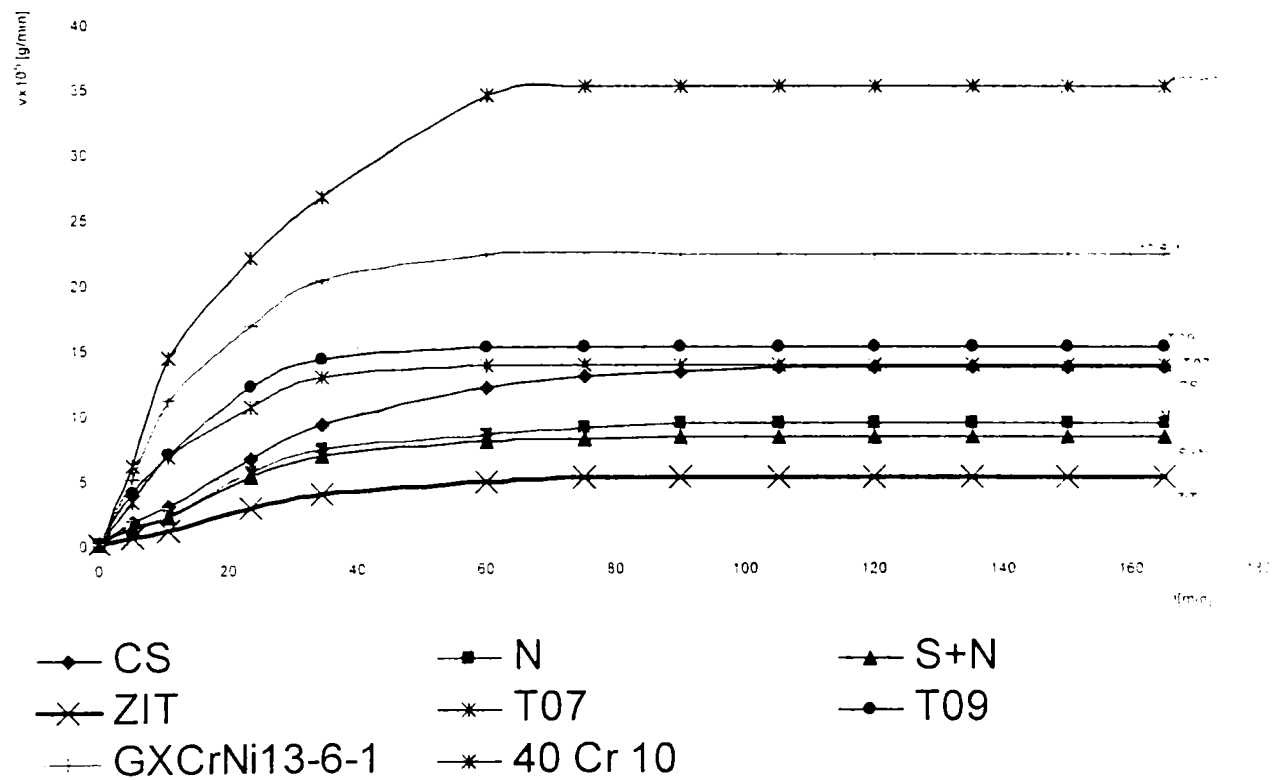


Fig.6.2. Erosion velocity- austenitic steel

After 165 minutes of cavitation attack the austenitic steel GX4CrNi13-4 has the cavitations degrading parameters indicated in fig 6.3 and 6 4

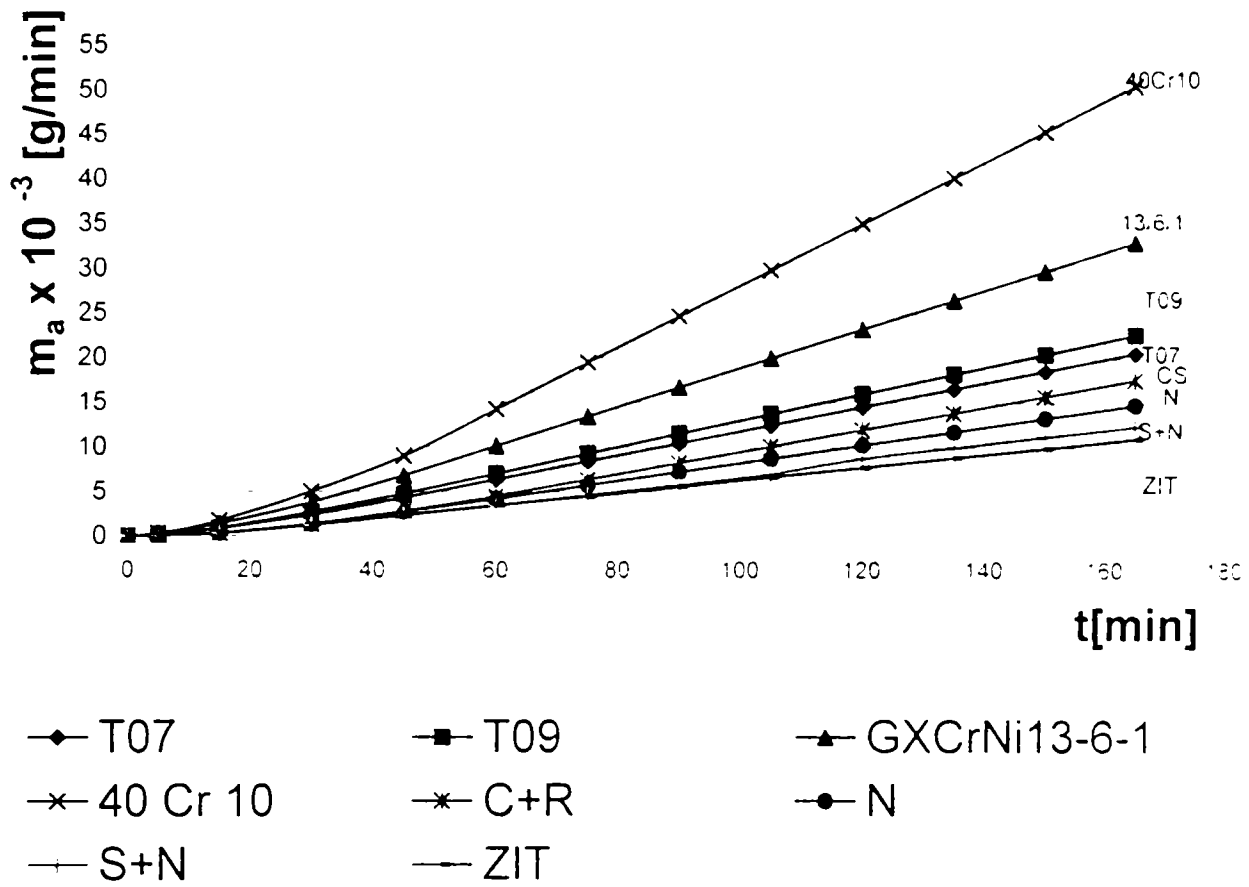


Fig. 6.3. Eroded mass – martensitic steel

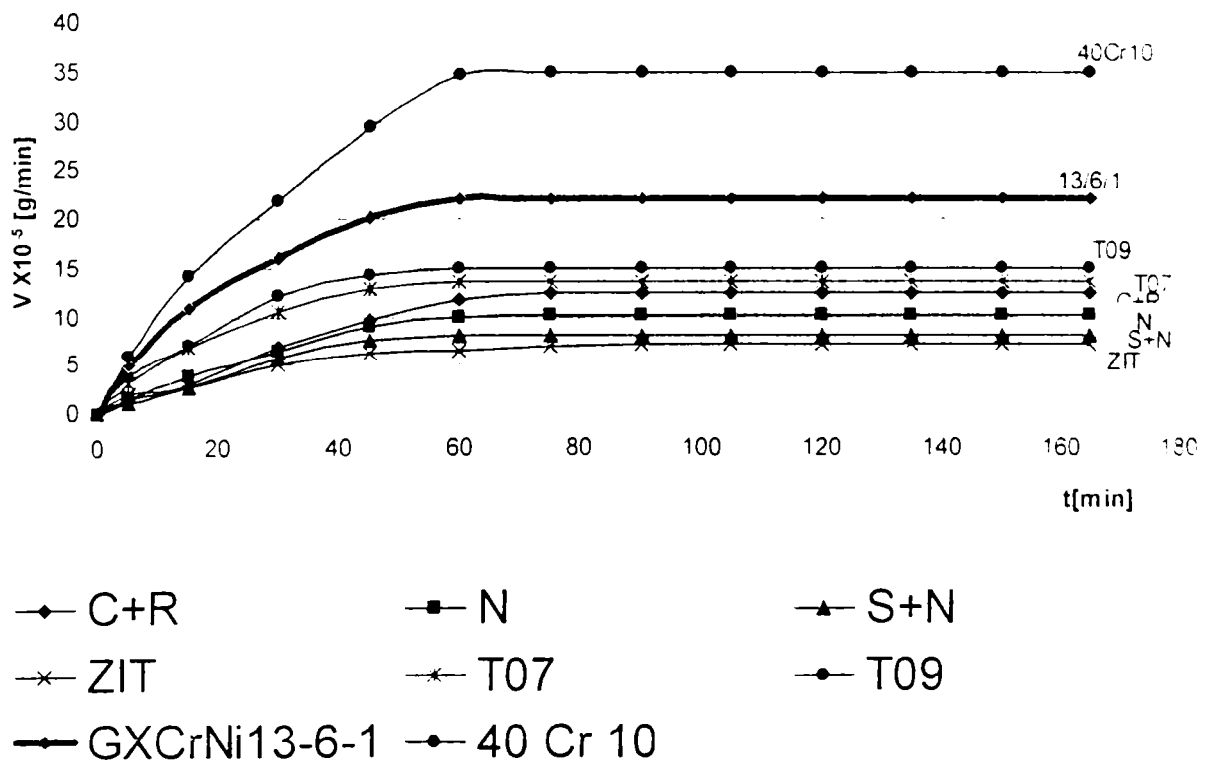


Fig. 6.4. Erosion velocity - martensitic steel

- The two researched steels present a good cavitation resistance compared with steels from the same class (13/6/1, T09, T07) and excellent comparing with the reference steel 40Cr10.
- The martensitic steels, in every technological ways of treatment present a good cavitation resistance, compared with austenitic steels.
- The best thermal treatment for cavitation resistance both for austenitic and martensitic steel is the solution heat treatment followed by **sand-blasting and gassed nitrating**, and quenching/tempering for the martensitic steel, followed by **sand-blasting and nitrating gassed**.
- In the case of welding repair of the areas degraded thru cavitations it has been proven that the welding proceeding and regime used are satisfying and the added materials show a high cavitations resistance in the ZIT welds.

The probes from the two brands of steel situated in different statuses of thermal treatment, respectively the ones charged by welding were submitted to investigation measures to single out the events that take place in cavitation destruction.

After many macro and microscopic analysis the propagation of cavitations destruction was pointed out, respectively the grain and layers structure deterioration thru cavitations. **Design 6.1**

The macroscopic analysis was made with a stereo microscope on different sizes, and the following cavitations degraded zones appeared:

- A central highly eroded area with micro cracks and cracks;
- An adjacent area to the central with weak eroding;
- A third area with strong eroding and micro cracks;
- A fourth area less attacked by cavitations.

Also micro detachments and micro grains are obvious and creating freckles.

These micro crack and detachment zones are met in both steels inquired indifferent of the technical variant of thermal treatment.

The probes that have been sand-blasted and nitrated show less micro cracks and less crystalline micro grains, which shows their good resistance to cavitations.

The welded probes, respectively their ZIT shows at both steels a raised cavitation resistance.

Because the martensitic steel was welded with a buffer layer, the ZIT behavior is similar to the austenitic steels.

The metallographic analysis was done on the resulting surface thru longitudinal sectioning of the probes tested for cavitations.

The probes were warped in plastic materials, yielding to processing and metallographic attack in conformity with today's norms (fig.3.45)

Comparative investigations were made in three areas of the probe A-not affected by cavitations, B and C-affected by cavitations.

The metallographic analysis shows the next aspects:

I. Austenitic steel

- In the area unaffected by cavitations, a homogenous austenitic structure with some macles in some grains, with $G=6$;

- In the areas affected by cavitations micro cracks appear on a granular level, detachments and grain exclusions, In the area affected by cavitations appears a grain finish and complex precipitation off and in the austenitic grains. (**Design 1, fig 1-4**)

- To the **gassed nitrating** probes appears an iron nitrating and nitrates of the adding elements with a thickness till 0,1 mm;
- Between the nitrating level and the submissive nitrating material appears a transition level with nitrates and nitrating precipitations in crystalline grains

The mechanism of cavitation erosion consists in a melted area, the micro cracks creation, structural modifications with a smaller intensity that in the case of the solution heat treatment. (**Design 2 fig 1-5**)

- **Sand-blasting and nitrating** austenitic steel indicate the appearance of micro asperities on the surface by sand-blasting, a grain finishing of a few microns and a well shaped nitrated level especially on the asperities created by sand-blasting alloy (**Design 3 Fig.1-3**)

In the cavitation testes from **the thermal influenced area** are appearing:

- The dendrite growth of the grains and a large number of fine-grained smooth carbon precipitations with a finish grain. (**Design 4 fig.1-4**)

The cavitation degrading mechanism of these testes is similar with the heat treatment solution tests, but with a low intensity.

II. Martensitic steel.

- The area unaffected by cavitations presents a structure formed from tempered martensite with a large number of smooth carbons precipitations in those of martensite; (**Design 5 Fig. 1**)
- In the cavitation affected areas we can observe the appearance of the micro cracks, detachments and grain expulsions, especially in the central area of the cavitations attack; (**Design 5 Fig. 2-4**)
- **Gassed nitrating** applied after quenching and tempering shows the appearance of a nitrating level with a depth up to 0, 1 mm, a transition level and structure accordingly with temper and quenching.

The erosion is realised through the expel of crystalline grains and the modification:

- Of the precipitations in the nitrating level. In this case there are lesser micro cracks and micro grains expelling (**Design 6 Fig. 5**)
- **The sand-blasting and nitrating** treatment makes a grained finish on a depth up to a few microns without creating roughness on the tested surface (**Design 7 fig. 1-5**)

As a consequence of the cavitation attack a finished and precipitated phase appears.

- Through the **sand-blasting and gassed nitrating** treatment is creating a hardened micro level witch enlarges the cavitation resistance of the steel
- The probes (testes) **charged through welding**, because of the tampon level which is formed by stainless austenitic steel has a cavitation

resistance like the testes analyses on the austenitic ZIT steel. (**Design 8 fig. 1-5**)

The cavitational testes being in different thermal treatment were put under the micro hardness tries.

There were made micro hardness HVO,2 and HVO,1 tries, and those tree tries was considerate A,B and C. A –cavitations affected area, B- beginning area.

The processing of the measurements has been done and the representation of the micro hardening variation on the deepness of the area which is constrained to the cavitations.

In graphics 3.48-3.55 are Shawn the micro hardening variations in the three areas measured for the three variants of thermal treatment and for the ZIT of the samples charge red by welding.

The hardening measurement shows the following aspects for each applied variant of thermal treatment.

For the austenitic steel. after the chilling by localization in the solution tempering, there appears a decrease of the hardening from 200 to 185 HV0.2 in the area affected by the cavitations; this situation is in total conformity with the metallographic investigation. (**Figure 3.48A**)

The application of the gas nit riding produce for the arsenic steel, an increase of the hardening a depths from 0.1mm from 185 to 370 HV0.2. The increase of the hardening is in conformity with the structural state and justifies the growth of resistance at corrosion.

In the areas affected by cavitations the micro hardening approaches the one given by the treatment which was applied initial, a normal situation because through cavitations the nitride layer was destroyed (**fig. 3.48 B, C**)

The sand-blasting and the gas nitruring produce an increase of hardening in the superficial layers; precisely for:

- austenitic steel in the unaffected area appears hardenings of 450 HV0.2 and in the affected areas there is micro hardening at the level of 270 HV0.2 a little bigger than the one obtained from the chilling by putting in solution (**fig. 3.49 A, B, C**)
- at the martensific steel appear in superficial layers, hardening of 1000 HV0.1 which varies on depth establishing at the hardening of 300 HV0.1, corresponding the initial thermal treatment state applied to steel (**fig. 3.53 A**)
- in the affected areas, the micro hardening variations it is between the same limits as the unaffected area and the variations of the hardening are in total conformity with the structural modifications shown in the previous chapter (**fig. 3.53 B, C**)

For the charged by welding, the measurements for the micro hardening have shown the following aspects:

- for the austenitic steel GX5CrNi19-10, in the area unaffected by cavitations (A) on depths of maximum 0.8mm, the hardenings are the same as far the steel constrained only by the thermal treatment of chilling by putting in solution, 180 HV0.2 (**fig. 3.51 A**)
- in the areas B and C which are not affected by cavitations are found cold-hardening of the steel of 240-HV0.2 in area B, and in the superficial layer 330-HV0.2 (Note: unclarified cold-hardening in the actual study but it is assumed that [**fig. 3.51 B, C**] through complex processes

induced by cavitations in the adjacent layers appear stress states which justify this hardening gradient).

- At depth bigger than 0.7mm the hardening 190-HV0.2 is the same as the one for the thermal treated material only by chilling by putting in solution.
- at the martensitic steel GX4CrNi13-4, in the areas unaffected by the cavitational attack A and in the transition areas, areas-B. hardenings 220-HV0.2 are identical with the areas of the steel which was constrained only by the thermal treatment of chilling and recovering (**fig. 3.52 B, C**).
- it is observed a light increase of the hardening at 285-HV0.2 values in conformity with the ones unlisted at the metallographic study of the ZIT of the GX4CrNi13-4 steel, charged by welding with plug layers and anticavitalational layers (photo 3.5.3.8) (**fig. 3.55 C**)

The metallographic analyses and the hardening tries have shown the inflation of the ZIT of the staples welded over their cavitalational resistance.

The principal conclusion regarding the resistivity at the cavitations of the steel, are:

- for all the variations of technological treatment applied to the two forms of steel, the thermal treatment of chilling by putting in solution for the austenitic Gx5CrNi 19-10 steel, and quenching/tempering (of chilling and recovering) in the case of martensitic GX4CrNi13-4 steel. followed by treatments of sand-blasting and gas nitrogen gives to steel the biggest resistance at cavitalational erosion.
- the experimental study for cavitations on the samples made out of austenitic steel GX5CrNi19-10 and martensitic steel GX4CrNi13-4, have shown that the martensitic steel has the bigger resistance for cavitalational erosion in all technological variants of thermal treatment applied and it is highly recommended for casting all rotors of hydraulic turbine.
- The ZIT of both welded samples of steel has good behavior ay cavitations which stand for the fact that the process and the technology of welding are compatibly.

The techno-economical study regarding the casts for the cavitations repairing made in conformity with the laws and with applied to a combiner from CHE PFI which is shown in **table 6.1**.

Table 6.1.

Nr. crt.	Costs	Value [€]	
		Martensitic steel	Austenitic steel
1	Energy and materials	7.988	6.607
2	Manpower	19.882	19.882
3	Costs with CAS 24,5 %(2) and social protection 11,6% (2)	7.177	7.177
4	Unit's common costs 74% (2+3)	20.023	20.023
5	Compartment total costs (1+2+3+4)	55.070	53.689
6	Indirect costs 25%(5)	13.767	13.422
7	Total (5+6)	68.837	67.112
8	Benefice 10% (7)	6.883	6.711
9	Total(7+8)	75.720	73.823
10	TVA 19 % (9)	14.386	13.667
11	Total general (9+10)	90.106	87.850
12	Total rotundity	90.000	88.000

The comparison of the results obtained from the techno-economical study over the two marks of treated steel in several technological variants. These are shown in **table 6.2**. The final conclusion of the techno-economical study states that the martensitic steel is more economic for the fabrication by casting of runner of hydraulic turbine.

Table 6.2

Heat Treatment	MARTENSITIC GX4CrNi13-4				AUSTENITIC GX5CrNi19-10				(*) $\Delta C_T = C_T(A) - C_T(M)$ [millions] €
	K	Interventions no.	Costs		Interventions no.	K	Costs		
			C_{totals} [millions] €	C_{Reducers} [%]			C_{totals} [millions] €	C_{Reducers} [%]	
Q+T	1	17	1,530	base	X	X	X	X	0,406
ST	X	X	X	X	1	22	1,936	base	0,198
N+ WELDING	1,6	11	1,013	34	2,7	9	0,815	58	0,109
S+N + WELDING	1,6	10	0,925	40	2,7	9	0,816	58	0,109

The difference of cost with the intervention at cavitations and with materials, between the two runners, the one castled from austenitic steel GX5CrNi19-10 and the one castled from martensitic steel GX4CrNi13-4, varies between 20.000 and 110.000 euro, according to the variant of thermal treatment applied.

The technical-economical study highly recommends that the martensitic steel GX4CrNi13-4 thermal treated through the variant: quenching/tempering + sand-blasting + gas nitrating, should be used for casting of runners of turbine with power bigger than 1MW.

6.5 Technical and execution project of a vibrating device for trying cavitations

In the fifth chapter we made research regarding the design and realization of a vibrating device magnetostrictiv five which has it's generator of ultrasounds build by using semi conducting components.

From a constructive point of view, a generator with magnetostrictiv can be made by using electronic devices like electrical tubes or transistors.

The electronic tubes are still used for the vibrating devices of great power ($P=500W$ in the case of the device in the lab) and having the advantage of electrical robustness.

These, the disadvantages are major.

Because they are not largely produced, the electrical tubes are very expensive nowadays and hard to replace if broken.

So, the conclusion is that the old system is overflow, from a technological point of view and the semi conducting devices have become more and more attractive as well as cost and electrical performance, and nowadays they are proffered even for industrial vibrating devices of great power.

First, I propose myself a theoretical approach of a vibrating device with its generator form by semi conducting components, with the practical realization on a low-scale of power of an ultrasounds generator.

The lab installation have been made having in the black sketch of the generator the following components: controlled oscillator, the block of the feeding circuit, the power amplifier and the resonator coil. [chapter5, fig 5.6]

In this stage, the resonating tubes of nickel have been kept on the resonating frequency of approximately 7 KHz.

We managed this way, without great material risks to verify the resistivity of this new conception getting conclusions over the performances and the problems that may appear in the case of making an installation on industrial scale.

At the functional testing of the device an electrical power has been measured of approximately 50W without the presence of a notable heating of the final transistors of the amplifier.

The whole installation is realized under a compact shape, easy to work with and transport it, of small dimensions [see fig. 5.15].

The only setting that the operator should make is that of frequency of working of the oscillator for it to function exactly on the resonance sequence of the used nickel tube.

The results of the practical testing of this installation are very encouraging from all points of view: electrical, mechanical, electronically.

For the testing we used a digital millimeter of MY-65 type and a digital oscilloscope of HAMEG (HM407) type computer connected and its oscilogram are shown in annex 5.

In conclusion by designing all the generator component parts, by realization, by assembling and testing the generator at low-scale results that the new conception is reliable. By verifying it's resistively and resenting the collusions and corrections for a bigger scale of power boarding, it can be made the affirmation that the realization of a magnetostrictive generator of great power it's an easy thing to do and it will be a challenge and a further preoccupation.

6.6 Own Contribution to the Study Of The Cavitations Phenomenon

Trough this doctoral dissertation I consider that I brought my own modest contribution:

- The synthetic presentation of the specialized literature regarding the cavitations phenomenon allowed the pointing –out of a new methodology of research, through witch are pointed out the modification of the structure and property of the material.
- By the applied the domain of the cavitations phenomenon has improved.
- Different variants of thermal treatment were applied to austenitic and martensitic stain ten steels to two representative marks.
- Studies regarding the technological parameter of the thermal treatment variants have been made: gas initialing, sand-blasting (hardening trough sand blasting) followed by gas nit riding.
- These technological variants were applied to steels in initial phase of chilling by putting in solution to austenitic steel and quenching of volume /tempering (chilling and recovering) to martensitic steel.
- Studies regarding repairing by welding of the areas of blades destroyed cavitation have been made.
- Studies were made regarding the welding process, the technology of the welding and the additional material.
- For each mark of steel has been mentioned the welding condition, the welding electrodes and the way of making the plug layers and the anticavital ones.
- Research have been made regarding the rezistance to cavitations in the thermal influenced area, the welding repairing, situation that I haven't met in specialized literature.

A classical methodology of determination of the cavitations of the studied steels has been used.

The experimental data were processed and the variation of the main parameters of the damage trough cavital erosion were traced, the cavital erosion speed $v(t)$ and the erroneous material mass $m_{\text{er}}(t)$.

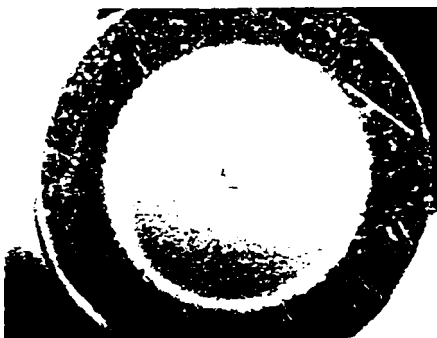
- A comparition of the results obtained on these steels with steels from the same family or with weakly or medium alloyed steels, was made and it was observed that in all technological variants is obtained an increase resistance of cavitations.

- The better resistance to cavitations is obtained by sand blasting treatment and classical gas nitrating for the stainless austenitic steel and for the martensitic ones as well.
- The resistance to cavitations of the thermal influenced area for the two mark of steels (austenitic α martensitic) is very good, situation pointed out for the first time by own research.
- A special methodology was applied for investigation of the damaged materials by cavitations, following getting some data about the destroying of the material.
- The optic methodology analysis made on the longitudinal and transversal section of the tested samples of the cavitations, as well the effectuated micro hardening in these areas, shown the producing mechanism of cavitations by melting in micro areas by stressed, thermal and mechanic states, whit caused casings, breaks of crystalline grains, modification of phase in sub layers and ejection of material thought the formed cones.

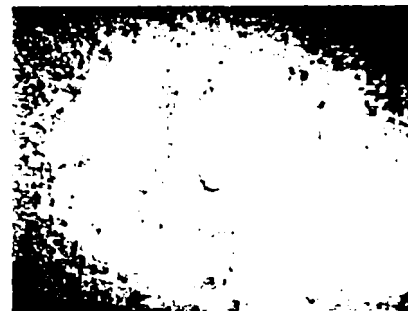
DESIGN 6.1

MARTENSITIC STEEL GX4CrNi13-4

MACROSTRUCTURES



(Q + T) MO 10X
Fig. 1



(Q + T + N) MO 20X
Fig. 2

MICROSTRUCTURES



Fig.1 (Q+T) MO 500X



Fig.2 (Q+T+N) MO 500X

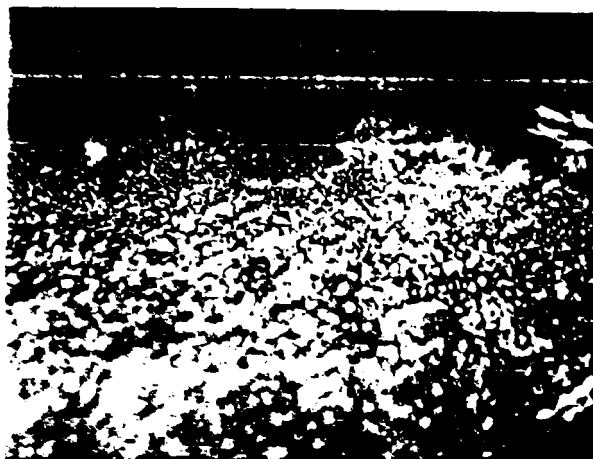


Fig.3 (Q+T+S+N) MO500X



Fig. 4 (Q+T+WELDING) MO500X

Where: Q-quenching
 T-tempering
 S-sand-blasting
 N-gas-nitrating

As well, the fact that the thermal treatment variant was induced, in the superficial layers, tensions of compressing and new structural phases and crystalline refinement (sand blasting and gas nitride) was proved and it gives the material a great resistance to cavitations.

The structural and micro hardening analysis in the thermal influence area of the welding repairing of the damaged areas has shown structural modifications of the hardness witch explain the good resistance of this area to cavitations.

- It was shown a modern methodology of technical-economical evaluation regarding the resistance to cavitations of the stainless austenitic and martensitic steels treated in various technological variants and were shown the costs for increasing resistance to cavitational erosion and for repairing of hydraulic machine of 22-25 years.
- In the methodology applied in the technical-economical study I used for the first time in defined form in chapter 4.1, for the cost calculation, the coefficient K-the coefficient of the relative index of the erosion resistance at cavitations, witch consider the cavitations resistance, the material nature and the technological variants of thermal treatment.

It was shown that the turbine runners of the stainless martensitic steels shown a better technical-economical index. The application of the technological variants sand blasting, gas nitrating for both steels- has a better technical-economical index and the practical application is recommended.

A vibrating device with semiconductors components was designed, executed and experimented, needed for lab research of the cavitational resistance of the materials.

In this project are given details regarding the execution of several component parts of the device and the required materials for the execution of the vibrating device witch has the following technical data:

- Loading gouge size [mm]: L=260, l=150, h=110
- Mass [kg]: m=5;
- Supply tension: U=210-240V/50Hz;
- Absorbed power: P=max80W;

- General frequency: $f=6000-8000\text{Hz}$;
- Electrical power: $P=50\text{Hz}$;
- Range at exit without load: $A_{\text{loud}}=150\text{Vw}$:(at resonance)

6.7 Possible Directions of Continuation the Cavitation Resistance Of The Material Research

Because of the complexity of the cavitations damage of phenomenon used for fabrication of hydraulic machines are required more research regarding the thermal treatment of the fineness research of the structural and the increase of the automatic driving possibility of trying.

I consider there can be made research in three more directions:

1. At the quality treatment of researched materials the usage of other thermal treatment technologies are imposed, like: the superficial hardness with concentrated energies and thermo mechanical treatments.
2. The elucidation of the degradation mechanisms thought cavitations, requires the usage of more modern methods of investigation: electronical and metallographic: analyses-X rayz irradiation; electrons flux analysis. for showing the structural modifications in several degrees of degradation by cavitation erosion.
3. The usage of the new vibrating device for research the resistance at cavitations because of its big reliability and great possibilities of adjustments of the trying parameters. In the future, these tries may be automated by averaging and processing of the results, using the computer

BIBLIOGRAFIE

1. **Amza Gh., și alții** - Sisteme ultraacustice, Editura Tehnica, București 1988.
2. **Anton I.,** - Turbine hidraulice., Editura Facla, Timișoara, 1979.
3. **Anton I.,** - Cavitația, Vol I, Editura Academiei RSR, București, 1984.
4. **Anton I.,** - Cavitația, Vol II, Editura Academiei RSR, București, 1985.
5. **Baciu I., Pădurean I., Bordeășu I.,** - About increasing of estimate precision materials resistance to cavitațional erosion, Editura Orizonturi Universitare, 1999.
6. **Banu M.,** s.a – Analiza structurii materialelor metalice, Editura Tehnica Bucuresti 1991.
7. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Consideration about how the structural constituents influenced the metal destruction, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999.
8. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Durabilitatea cavitațională a unor oțeluri aliate, Analele Facultății de Inginerie, Hunedoara, 1995.
9. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Contribuții în descrierea analitică a caracteristicilor de eroziune cavitațională ale oțelurilor aliate, Analele Facultății de Inginerie, Hunedoara, 1999.
10. **Bordeășu I.,**- Distrugerii cavitaționale, Editura MacroSOFT, Timișoara, 1998.
11. **Bordeășu I.,**- Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, teză de doctorat, Timișoara, 1997.
12. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Rezistența la cavitație a oțelului carbon de calitate OLC45, Analele Facultății de Inginerie, Hunedoara, Tom. I, Fascicula 6, 1999.
13. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Contribuții în descrierea matematică a rezistenței cavitaționale a materialelor, Lucrările științifice ale Universității Petroșani, Vol. III, 1998.
14. **Bordeășu I., Pădurean I.,** - Rezistența la cavitație a oțelului 20 Cr130, Lucrările științifice ale Universității Petroșani, Vol. III, 1998.
15. **Bordeășu I.,** - Le comportament a la cavitation de l'acier carbon categorie I RNR, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice Timisoara, Vol 37 (52), 1992.
16. **Bordeășu I.,**-The cavitation resistance of Higer - Strenght Hull structurall steel D 32, with the surface treated through tthe method of electric sparks, Buletin Științific si Tehnic. Universitatea Tehnică, Timișoara, Vol 38 (52), 1993, p. 134.
17. **Bordeășu I.,** Eroziunea cavitațională a materialelor folosite în realizarea elicelor navale, analele Universității din Oradea, fascicula Mecanică, Oradea, 1992.
18. **Bordeășu I., Anton I.,**- Correlation between cavitation erosion rate with both the parameters of the vibrator apparatus and phisico-mechanical

- properties of the material, Third international symposium on cavitation, vol.II, Grenoble- France, 1998, p.199.
19. **Bordeașu I., Popoviciu M.,** - Durabilitatea cavitațională a oțelurilor folosite în fabricarea pieselor solicitate cavitațional, Analele Universității din Oradea , fascicola Mecanică, Oradea, 1993.
 20. **Bordeașu I., Baya Al., Popoviciu M., Anton L.,** - Contributions Concerning Determination Periods of Cavitation Erosion, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Vol 41(55), fascicola 2, 1996
 21. **Bordeașu I.,** - Acoustic power influence to the erosional cavitation speed. Buletinul științific și tehnic al Universității "Politehnica" Timișoara, Vol 41 (55), 1996.
 22. **Bordeașu I.,**- Contributions concernant la destruction de l'acier inoxydable par érosion cavitationnelle. Buletin Științific, Universitatea Politehnica Timișoara, vol 41 (55), 1996.
 23. **Bordeașu I., Miu V., Popoviciu M.,** - Comparație între comportarea cavitațională a oțelului D - 32 și aliajului de cupru utilizat pentru realizarea elicelor navale, Sesiunea de comunicări științifice a tinerilor absolvenți. Timișoara, 1989.
 24. **Bordeașu I., Popoviciu M.,** - Comportarea cavitațională a oțelului inoxidabil utilizat la elicele navale, Conferința de Masini hidraulice. Vol III, Timișoara, 1990.
 25. **Bordeașu I., Popoviciu M.,** - Comportarea cavitațională a fontei cu grafit nodular. Conferința de Mașini hidraulice, Vol III, Timișoara, 1990.
 26. **Bordeașu I., Popoviciu M., Miu V.,** - Rezistența la cavitație a bronzurilor utilizate pentru elicele navale, Conferința de Masini Hidraulice și Hidrodinamica, Vol III, Timișoara, 1990.
 27. **Bordeașu I., Popoviciu M.,** - Rezistența la cavitație a oțelului naval D – 32 tratat prin metoda alierii cu scânteii electrice, Sesiunea de comunicări științifice "Nouăți în domeniul tehnologiilor și utilajelor pentru prelucrări la cald, Universitatea "Transilvania" Brasov, 1993.
 28. **Bordeașu I., Popoviciu M.,** - Comportarea la cavitație a unor materiale utilizate în construcția aparatelor hidraulice de comandă și reglare, Conferința Internațională de Sisteme Hidropneumatice de Acționare; Vol III, Timișoara, 1995.
 29. **Buzdugan Gh.,** - Rezistența materialelor, Editura Tehnică, București, 1974.
 30. **Cartiș I., Gh.,** - Tratamente Termice. Tehnologie și utilaje Editura Facla. Timișoara-1982.
 31. **Crawford A E.,** - Tehnique de ultrasons, Dunod, Paris, 1959.
 32. **Dănilă, Th., Reus, N., Boiciu, V.,**- Dispozitive și circuite electronice, Editura Didactică și Pedagogică, București-1982
 33. **Deutsch L.,** - Rezistența materialelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
 34. **Dulămiță T., Florian E.,** -Tratamente termice și termochimice. Editura Didactică și Pedagogică, București-1982.

35. **Dumitrescu S., ș. a.** - Calculul elicei, Editura Academiei Române, București, 1990.
36. **Dorey J. M., Rarcadou T.**, - Similitude en erosion de cavitation: Essais sur un roue de pompe en eau et en sodium, Rapport EDF/ DER Departament MachinesCatou. 1993.
37. **English W. J.**, - Air injection as a means of reducing propeller cavitation induced ship vibration, Third international symposium cavitation, vol. I. Grenoble-France, 1998, p. 253.
38. **Frank J. P., Michel J. M.; Nguyen Trong H.**, - An experimental investigation of scale effects in cavitation erosion, International Conference, Cambridge; 1992.
39. **Frank J.P.; ș.a.** - La Cavitation, Mecanismes physiques et aspects industriels, Press Universitaires de Grenoble. 1995.
40. **Gal C., s. a.**- Proiectarea asistată de calculator a ghidurilor de unda pentru ultrasunete, Sesiunea de comunicări științifice a tinerilor absolvenți, Timișoara, 1988.
41. **Garcia R, Hammitt F. G., Nystrom R E.** - Corelation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1960.
42. **Garcia R.**, - Comprehensive Cavitation damage Data for Water and Various Liquid Metals Including Correlation with Material and Fluid Properties Technical Raport Nr. 6, The University of Michigan. 1966.
43. **Geru N., s, a.,** Analiza structurii materialelor metalice. Editura Tehnică, București, 1991.
44. **Geru N.**, - Metalurgie fizică, E.D.P., București, 1981.
45. **Ghersghel D. A. s, a.** - Aparate cu ultrasunete, Editura Tehnică, București, 1984
46. **Georgevici I.**, - Contribuții privind dezvoltarea unor oțeluri inoxidabile Cu transformare martensitică directă, Teză de doctorat, 2003
47. **Grist E.**, - Net Positive Suction Head Requirements for Avoidance of unacceptable Cavitation Erosion in Centrifugal Pumps, Cavitation. Conference, mechanical Engineering, Edinburgh, 1974.
48. **Hammitt F. G., Nath A., De. M. K.** - Erosion of ferrous and aluminim alloys in cavitating venturi, Report No. UMICH 014456-53 - I, University. Michigan, 1980.
49. **Hammitt F. G., De M., He J, Okada T., Sun B-H.**, - Scale effects of cavitation including damage scale effects, Report No. UMICH, 014456 - 75 - I, Conf Cavitation, Michigan, 1980.
50. **Hammitt F.G.**, - Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw Hill International Book Company, 1980.
51. **Hammitt F.G., Bhatt N.R.**, - Cavitation Damage resistance of Hardened Steels, Univ Michigan, 1970 p. I-36.
52. **Hobbs J. M**, - Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.

53. **Hobbs J. M.** , - Vibratory cavitation erosion testing at nel, Confernce Machynery Groop, Edinburgh, 1974.
54. **Hrelescu M.**, - Cercetări asupra alierii oțelului moale în arcul cu elemente care să-i confere metalului depus rezistența la cavitație, Teza de doctorat, Timișoara, 1967.
55. **Iosif, I., Nagy.N.**, - Ultrasunetele si utilizarea lor, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1982
56. **Ito T.**, - An Experimental Investigation into the Unsteady Cavitation of Marine Propellers: IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
57. **Karimi A., Leo W.R** - Phenomenological model for cavitation erosion rate Computation Material Science and Engineering, 95 (1987), 1-14
58. **Karimi A., Heuze J. L.**, - Erosion de cavitation d' alliages amortissants a base de magnese et de cuivre. La Houille Blanche. Nr. 718 - 1992.
59. **Kasai T., Takamatu Y.**, - Cavitation Aspects and Suction Performances of Centrifugal Pumps, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
60. **Knapp R, ș. a.**, - Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs. 1970.
61. **Kuzman A. F., Potentcz I.**, - Rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri indigene, Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, Tom 23(37), Fascicula 1 - 1978.
62. **Kuzman A.F., Potentz I, Trusculescu M., Mitelea I.**, - Rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri indigene. Influența tratamentului termic. Buletinul Științific si Tehnic a Institutului Politehnic, " Traian Vuia" Timișoara, Tom 22 (36), Fascicula 1 - 1977.
63. **Kuzman A.F.**, - Influența unor proprietăți fizice ale lichidului asupra incipientei și eroziunii cavitaționale, Teza de doctorat, Timișoara. 1992.
64. **Louis H., Tai P. T., Wehlage T., Yabuki A.**, - Cavitation erosion prediction by quantification of surface integrity, International Conference, Cambridge, 1992.
65. **Mihailiuk A.J., Revenco V.G., Natarov N.N.**, - Majorarea rezistenței la uzură și coroziune a cuprului prin metoda alierii prin scânteii electrice, Institutul de Fizică al A. S. a R. Moldova, Chișinău, 1992.
66. **Mitelea I., Popoviciu M., Bordeășu I., ș.a.**- La resistance a l'erosion cavitationelle des joints soudes en aciers inoxydables martensitiques, Buletin științific și Tehnic, Universitatea Tehnică Timișoara, Vo1 37 (51), 1992.
67. **Mitelea I., ș.a.**, - Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate, Editura de Vest, Timișoara, 1992.
68. **Mitelea I., Budau V.,** - Studiul metatelor, Îndreptar tehnic, Editura Facla, Timișoara, 1987.
69. **Mitelea I., Radu B.**, - Selecția și utilizarea materialelor ingineresti, Editura Politehnica, Timișoara, 1998.

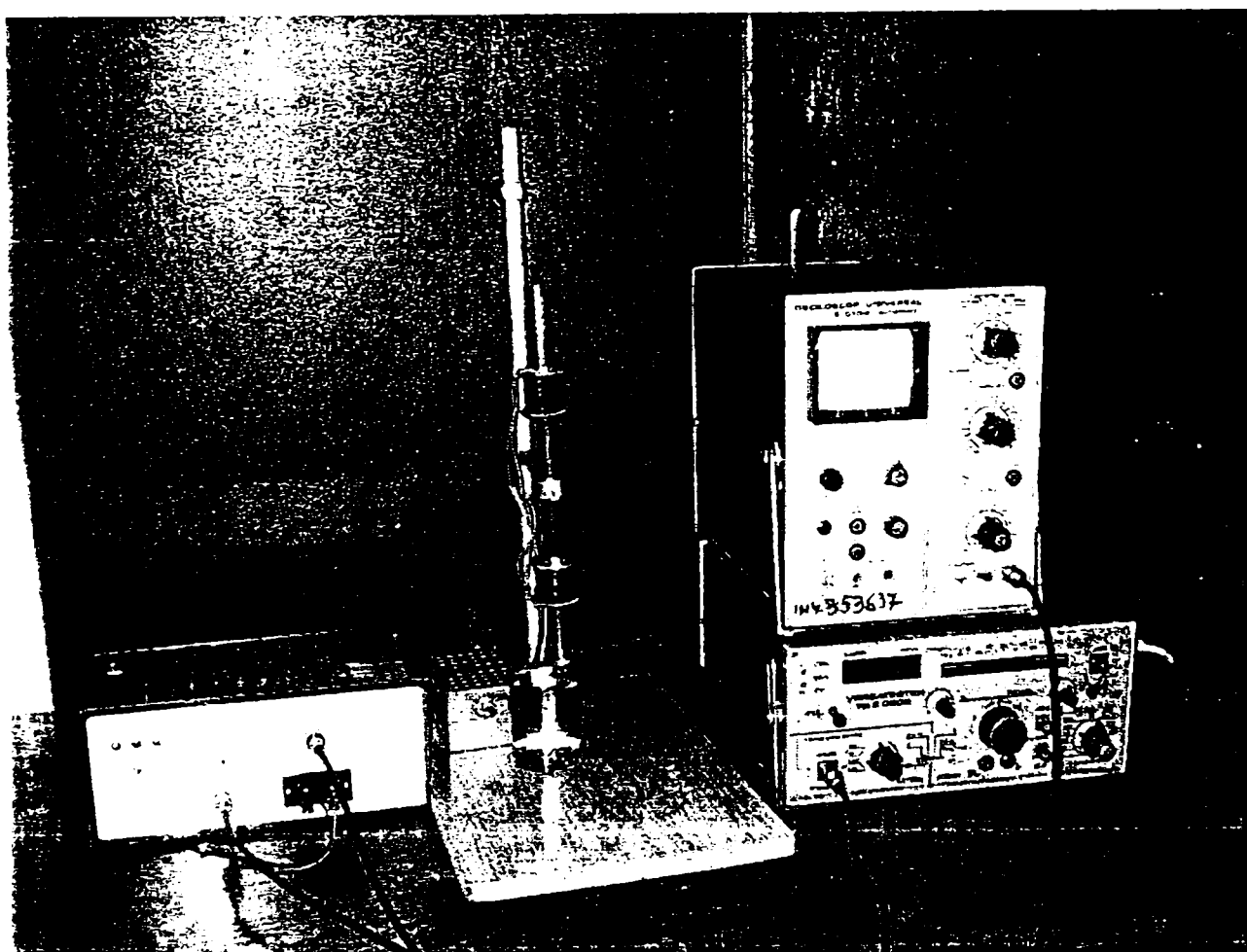
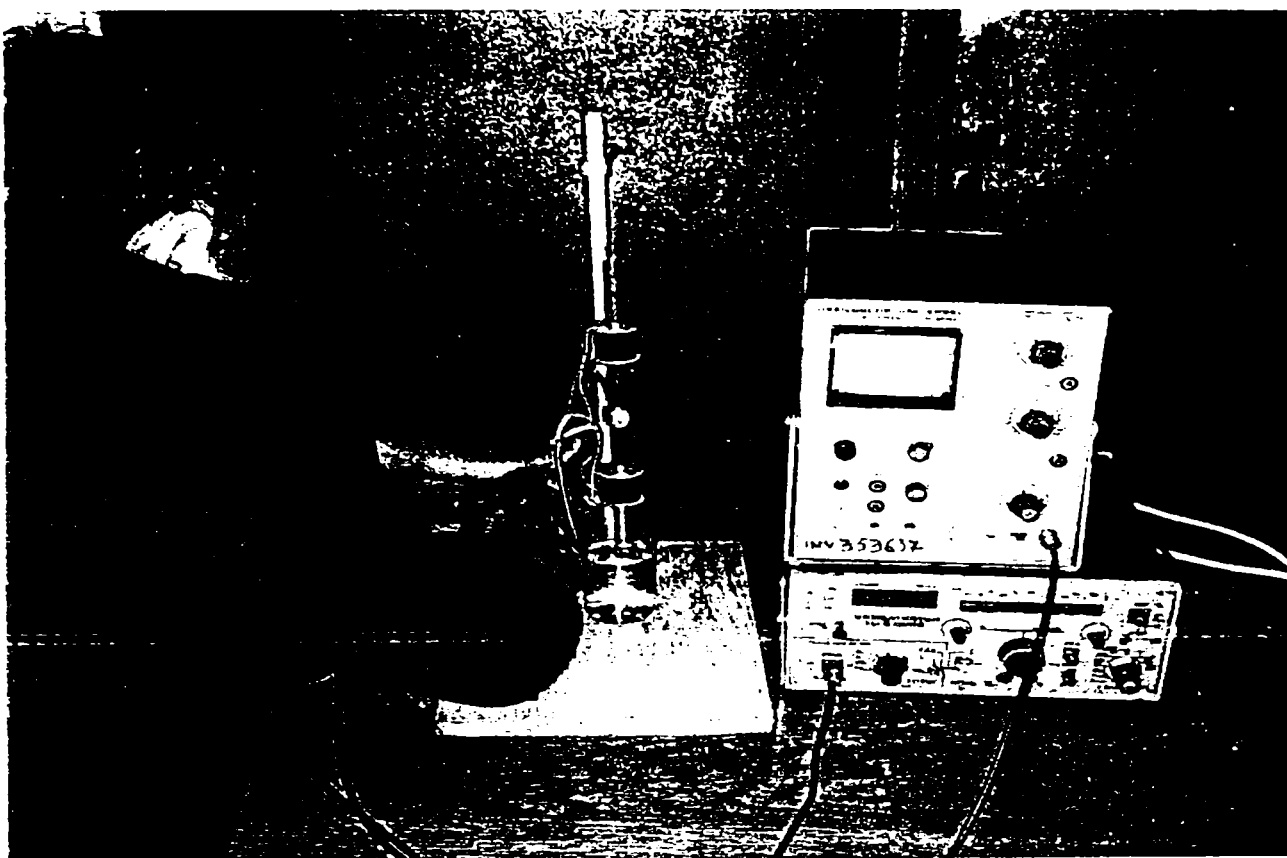
70. **Mitelea I.**, - Studiul metalelor; Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1983.
71. **Pădurean I.**, - Researches upon Cavitation Erosion Resistance of the Heat Treated Stainless Steel GX5CrNi19-10. Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timișoara, Transactions On Mechanics , Tom 50 (64) Fascicola 1, 2005
72. **Pădurean I.**, - Researches regarding the cavitation erosion resistance of the martensitic stainless steel from zones reconditioned by welding, Scientific Bulletin Of The „Politehnica” University Of Timisoara. Transactions On Mechanics , Tom 50 (64) Fascicola 1, 2005
73. **Pădurean I., Bordeășu I.**, - Rezistența la distrugere cavitațională a unor oțeluri durificate, Analele Universității Oradea, Vol. I. Fascicola de energetică, 1999.
74. **Pădurean I., Bordeășu I.**, - Rezistența la eroziune cavitațională a oțelului 40Cr130, Lucrările științifice ale Universității Petroșani, Vol. III, 1998.
75. **Pădurean I.**, Mecanica fluidelor și mașini hidraulice. Fundamente teoretice, aplicații, Editura Eurostampa, Timisoara, 2001.
76. **Okamura T.**, a.o., - Cavitation at low flow rates in centrifugal pumps. Third international symposium on cavitation, vol.I, Grenoble-France. 1998. p 341
77. **Palaev N. L. Edel I. U.**; - Kavitatia v ghidroturbinab, Masinostroenie, Leningrad, 1974.
78. **Perara Fr., Avellan Fr.**, - Cavitation erosion statistical analysis of transient cavities, International Symposium Cavitation, CAV' 95, Deauville. France. 1995.
79. **Popoviciu M.**, - Tehnologia fabricației și montajului mașinilor hidraulice. Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1981.
80. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - Considerații privind unele metode de protejare a suprafețelor metalice supuse la eroziune cavitațională, Sesiunea de comunicări științifice , Concepție, Tehnologie și Management în Construcția de Mașini, Vol VIII, Iasi, 1992.
81. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - Consideration regarding the total duration of vibrator cavitation erosion tests, Third international' symposium on cavitation, vol.II, Grenoble-France, 1998, p221..
82. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, Vol 39(53), Fascicola 1-2, 1994.
83. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - Cavitation erosion of 18MoCrNi13 Steel used for manufacturing the distributor valve, Conferința Internațională de Sisteme Hidropneumatice de Acționare, Vol I, Timișoara, 1995.
84. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Vol II, Timisoara, 1994.
85. **Popoviciu M., Bordeasu I.**, - Durabilitatea cavitațională a oțelurilor folosite pentru fabricarea elicelor navale, Sesiunea de Comunicări Științifice "Noutăți în domeniul tehnologiei și utilajelor pentru prelucrări la cald" Brașov, 1993.

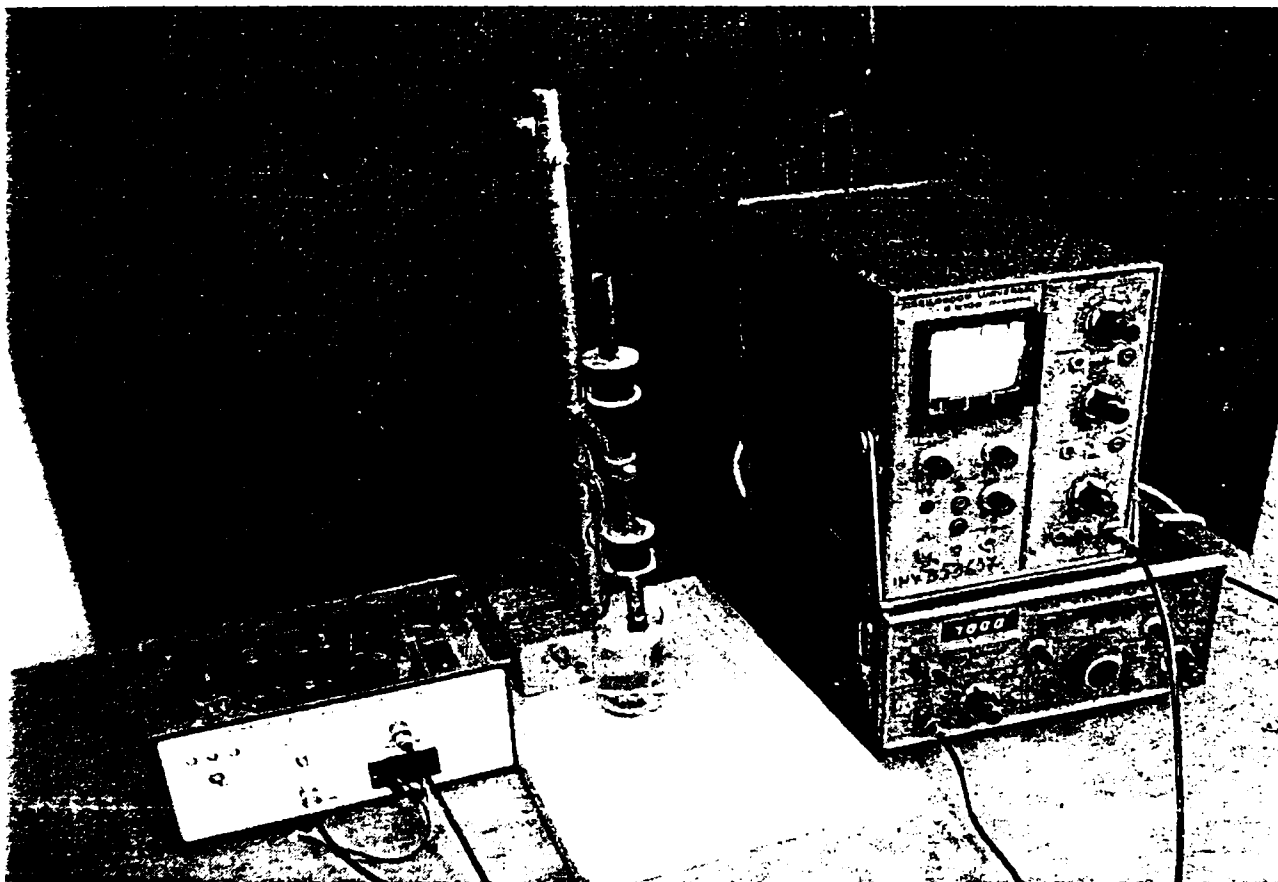
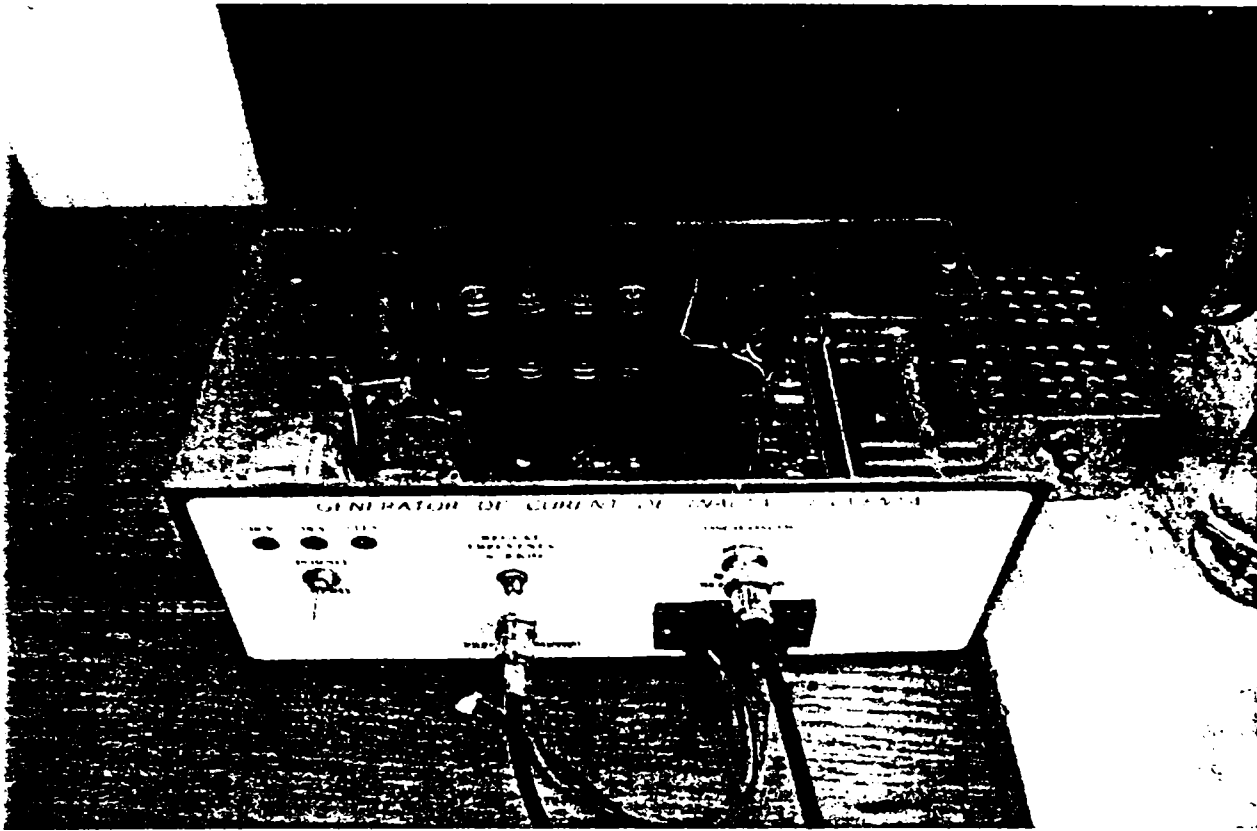
86. **Popoviciu M., Bordeășu I., Miu V.,** - Cercetări cavitaționale asupra oțelului D-32 ecruisat, Conferința de Mașini Hidraulice și Hidrodinamica, Vol III, Timișoara, 1990.
87. **Popoviciu M., Bordeășu I.,** - Comparație între rezistența cavitațională în apa distilată și apa potabilă a unui oțel obișnuit, Conferința de Mașini Hidraulice și Hidrodinamica, Vol III, Timișoara, 1990.
88. **Popoviciu M., Bordeășu I.,** - Comportarea cavitațională a oțelului naval de înaltă rezistență supus la diferite tratamente superficiale; Conferința de Masini Hidraulice, of III, Timișoara, 1990.
89. **Popoviciu M., Bordeășu I.,** - A quantitative method of estimating the cavitation behaviour of materials tested in a magnetostrictive facility. Buletin Științific Universitatea Politehnica "Timișoara", Vol 41 (55), 1996.
90. **Popoviciu M., Bordeășu I.,** - Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationelle. Buletin Științific si Tehnic, Universitatea Tehnică, Timișoara, Vol 40(51): 1993
91. **Popoviciu M., Bordeășu I.,** - Considerations upon the stating of cavitation Average service life of I-TODular Cost from Castings and the copper Allays utilised for naval propellers. Buletinul Științific și Tehnic al Universității "Tehnice", Timișoara, Vo140(51), 1993.
92. **Popoviciu M., Bordeășu I.** - Le comportement a la cavitation des materiaux couramment utilises pour la fabrication des helices navales. Bulatinul Stiintific si Tehnic, universitatea Tehnica Timisoara. Vol 37 (51). 1992.
93. **Popoviciu M., Kuzman A. F.,** -Contributions to the study of cavitation erosion on Kaplan turbine runners, Conference "Hydroforum ", Gdansk. 1985.
94. **Preiser H. S., a.o.,** - Cavitation Damage Research Facilities for High Temperature Liquid Alkali Metal Studies, ASM, Atlantic City, 1964.
95. **Răduță A.,** - Studiul metalelor, Analize și încercări, Litografia Universității Tehnice, Timișoara, 1992.
96. **Sakai L Shima A.,** On a New Representative Equatton for Cavitation DamageResistance of materials, Report No. 385, Tokyo, 1987.
97. **Safta V.,** - Teză de doctorat, Timișoara, 1970.
98. **Saito S., a.o.,** - A new proposal on predicting method of pump cavitation erosion, Third international symposium on cavitation, vol.I, Grenoble-France, 1998
99. **Scheffel M., ș.a.,** - Dispozitive cu ultrasunete, Partea a II a. Editura Tehnică, București; 1989.
100. **Simion, E., Miron, C., Festila, L.,**- Montaje electronice cu circuite integrate analogice, Editura Dacia 1986
101. **Simoneanu R,** - Cavitation pit counting and steady - state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995
102. **Staritkii V. G.,** - Zavisimot Kavitationnoi erozii materialo of ego napriojennago, sostoianiiia. Energomasinostroenie, Z, 1969.

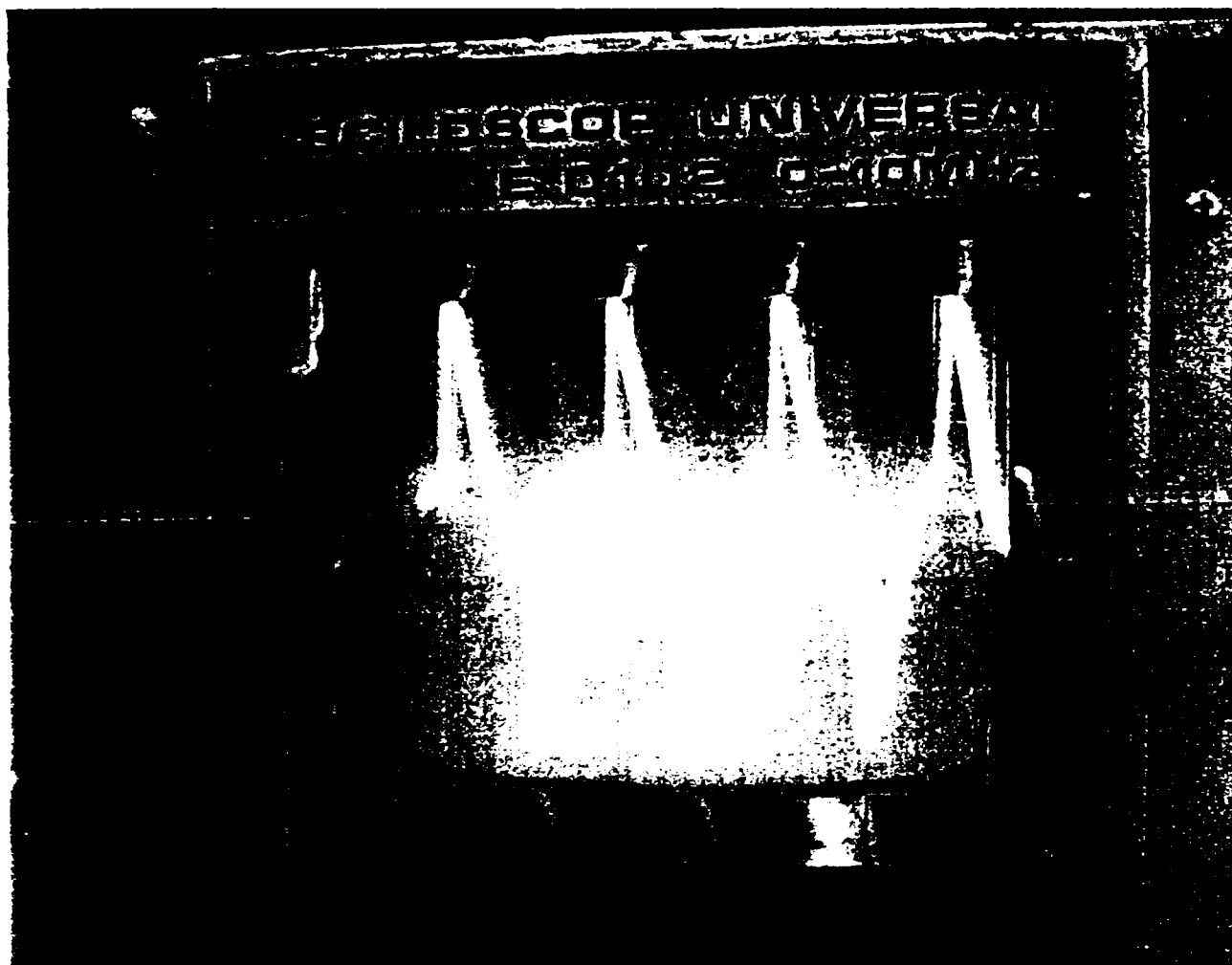
103. **Steller K., Reymann Z., Krzysztoowicz T.**, - Evaluation of the resistance of materials to the cavitation erosion, Proceedings of the fifth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Akad Kiado, Budapest, 1975.
104. **Steller K.**, - Prediction of cavitation damage in hydraulic turbomachinery. Proc of the seventh Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapest, 1983.
105. **Steller K., Steller J.**, - On prediction of cavitation and its erosive effects in hydraulic turbomachinery, Proceedings Conference, Turboinstitut, Ljubliana 1984.
106. **Steller K.**, - Change of the relative material resistance due to the change of cavitation conditions. Proceedings of the sixth Conference on Fluid Machinery, Vol. 2, Budapest, 1979.
107. **Steller K., Bugola R., Steller J.**, - Cavitation Erosion and their erosive effects, 2 -emes, Journees Cavitation, Paris, 1992.
108. **Steller J. K.** - International cavitation erosion test - test facilities and experimental results, 2 - emes Journees Cavitation, Paris, March. 1992.
109. **Steller J. K.**, - International cavitation erosion test - summary of results, international Conference. Cambridge. 1992.
110. **Tănăsescu F.T., ș.a.**, - Agenda Tehnică, Editura Tehnică București. 1990.
111. **Thiruvengadam A., Govinda Rao s., ASCE F.**, -Prediction of cavitation damage. American society of civil engineers. Paper 3308. Vol.127, 1962.
112. **Thiruvengadam A., Preiser H. S.**, - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 - 3, 1963.
113. **Thiruvengadam A.**, -O teorie unitară asupra distrugerii cavitaționale. ASME Seria D Vol. 85sept.1963 pag. 365-376
114. **Thiruvengadam A.**, - Cavitation erosion, Applied Mechanics, Vol 24, Nr. 3, 1971.
115. **Trușculescu M.**, - Studiul metalelor, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977
116. **Trușculescu, M, Ieremia, A.**, -Oțeluri inoxidabile și refractare, Editura Facla, Timișoara, 1981.
117. **Trușculescu M., Demian M.**, - Materialotehnica, Vol.I, Metalurgie structurală. Editura Politehnica, Timișoara-2003.
118. **Trușculescu M., Cucuruz R., Raduță A.**, - Studiul metalelor, Analize și încercări, Litografia Universității Tehnice, Timișoara, 1992.
119. **Udrescu I.**, - Tratamente de suprafață și acoperiri. Editura Politehnica, Timișoara-2000.
120. **Vermeșan G.**, -Tratamente termice-Îndrumător. Editura Dacia Cluj-Napoca, 1987
121. **Wheeler W H.**, Mechanism of Cavitation Erosion. Mechanical Engineering Research Laboratory East Kilbride.
122. *** Cavitation în Hydrodynamics, Symposion London, 1956.
123. * * * Standard method of vibratory cavitation erosion test ASTM , Standard G 32 - 85.
124. *** Registrul naval roman, Reguli pentru clasificarea și construcția navelor maritime, Vol V, București, 1986

125. *** SR EN 10283/1999 Oțeluri turnate rezistente la coroziune
126. . *** STAS 4203-74, Luarea și pregătirea probelor metalografice.
127. *** SR 5000-97, Structuri și constituenți metalografici ale probelor feroase.
128. . *** SR ISO 643-93, Determinarea micrografică a mărimii grăuntelui *feritic austenitic* sau *martensitic*.
129. *** SR ISO 640-95, Încercarea de duritate. Etalonarea mostrelor etalon de duritate pentru verificarea aparatelor de încercare a durtății Vickers HV0.2 la HV100.
130. *** CR 12361/1999, Reactivi pentru oțelurile inoxidabile.
131. *** H.G. 2139/30.11.2004 - " Pentru aprobarea catalogului privind clasificarea și duratele normale de funcționare a mijloacelor fixe" - grupa 2.1.16. - " *Mașini de forță și utilaje energetice*".
132. *** Legea 571/2003 – Codul Fiscal
133. *** Legea 19/2000 — Legea pensiilor și a asigurărilor sociale de stat. (O. 140/01.04. 2000).
134. *** Legea 76/2002 — *Legea fondului de șomaj*. (MO. 103/06.02. 2002).
135. * * *, Linear Integrated Circuits Fundamentals, Design & Application RCA web mit edu/6 101/www/handouts/FT04References.pdf
136. * * *, Linear Applicatin Handbook, National Semiconductor
137. * * *, RCA Designer's Handbook Solid State Power dx doi.org/10 1109/28.536877
138. *** , LM555 Data Sheet, National Semiconductor, www.national.com/ds/LM/LM555.pdf
139. *** ,CD4013 Data Sheet, National Semiconductor, www.datasheetarchive.com/datasheet/pdf/1289.html [8]
140. *** ,LM741 Data Sheet, Fairchild Semiconductor, (www.datasheetarchive.com/datasheet/pdf/5060.html)[9]
141. * * *, Ferrite Cores V2X Series - Magnetostriction Vibrators, TDK www.tdk.co.jp/tefe02/e171.pdf[10]
142. * * *, Power Amplifier Model, Labcenter Electronics, Proteus Simulation Samples [http://www.labcenter.co.uk/\(Proteus\)](http://www.labcenter.co.uk/(Proteus)) www.dse-faq.elektronik.compendium.de/dse-faq.txt - 517k

ANEXE







CURRICULUM VITAE

NUME: PĂDUREAN
PRENUME: IOAN
DATA NAȘTERII: 03.iulie 1958, Mălădia, Jud. Sălaj.
STARE CIVILĂ: căsătorit, un copil.
NAȚIONALITATEA: română.

1.ȘCOLI ABSOLVITE :

1996-2000 **Facultatea de Drept**, Universitatea de Vest Timișoara, secția **Științe Juridice**, cu media 9,01.
1978-1983 **Facultatea de Mecanică** Timișoara, secția Mașini Hidraulice și Pneumatice, cu nota 10 ca **șef de promoție**,
1972-1977 Liceul real-umanist "Mihai Eminescu", Satu Mare.

2.EXPERIENȚĂ PROFESIONALĂ:

sept. 1980-sept.1981 Preparator la disciplina Mecanică.
sept.1981- iun.1983 Preparator la disciplina Turbine Hidraulice, Catedra M.H., I.P."Traian Vuia" Timișoara
sept.1983- sept.1985 Inginer stagiar la Intreprinderea „ELECTROTIMIȘ”, Timișoara.
1985-1990 Asistent universitar suplinitor, Universitatea Politehnica, Timișoara, catedra M.H.
1990-prezent Asistent universitar titular Universitatea Politehnica, Timișoara, catedra M.H.
01.nov. 2001 Doctorand

3.ACTIVITATE DIDACTICĂ:

Seminar Mecanica fluidelor
Laborator Turbine hidraulice, Mecanica Fluidelor, C.H.E., Acționări hidropneumatice.
Proiect Turbine Hidraulice, C.H.E, Tehnologia montării și fabricării mașinilor hidraulice.

4. ACTIVITATE ȘTIINȚIFICĂ:

- **8 Manuale în cod ISBN, la edituri agreate MECD.**
- **2 îndrumătoare de laborator**
- **52 lucrări științifice comunicate:**
 - 28** în Reviste de specialitate
 - 5** în Volumele unor manifestări științifice internaționale
 - 19** în Volumele unor manifestări științifice naționale.

5.ALTE ACTIVITATI:

1985-1987 Șef de atelier M.H.
1986-1989 Director club M.V.
1986-1993 Activitate orar
1986-1991 Practică tehnologică la Reșița și Făgăraș.
1991-2001 Practică tehnologică la S.P.M.
1986-1997 Admitere 11 ani, din care 5 în comisia de admitere
1988-1998 Conducere lucrare de licență –**24 studenți**

Timișoara

Ing. Ioan Pădurean