

**UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMISOARA
FACULTATEA DE MECANICA
CATEDRA DE MASINI HIDRAULICE**

ING. ILARE BORDEASU

**EROZIUNEA CAVITATIONALA ASUPRA
MATERIALELOR UTILIZATE IN CONSTRUCTIA
MASINILOR HIDRAULICE SI ELICELOR NAVALE.
EFECTE DE SCARA.**

TEZA DE DOCTORAT

**BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA**

CODUCATOR STIINTIFIC

ACAD. PROF.DR. DOC.ING. IOAN ANTON

TIMISOARA

1997

**UNIVERSITATEA
POLITEHNICA
TIMISOARA
618.449
366 #**

CUVANT INAINTE

Eroziunea cavitationala continua sa fie o permanenta preocupare a oamenilor de stiinta si mai ales a producatorilor de echipamente hidromecanice, nave maritime si fluviale, datorita distrugerii organelor aflate in contact cu fluidul cavitant.

Acest fenomen este studiat de colectivul Catedrei de Masini Hidraulice, al Facultatii de Mecanica din Timisoara, de peste 35 ani, facand obiectul multor contracte de cercetare si teze de doctorat.

Data fiind complexitatea sa, prin dependenta de foarte multi factori caracteristici materialului si fluidului cavitant, obtinerea unor materiale nedestructibile prin eroziune cavitationala ramane, inca, de domeniul visului. De aceea, majoritatea studiilor sunt orientate spre stabilirea unor materiale cu rezistente la cavitate cat mai mari, analiza si corelarea tuturor marimilor ce influenteaza aceste rezistente.

In cadrul acestei teze, ce constituie o continuitate a cercetarilor in domeniul eroziunii, se prezinta elemente noi si originale legate de comportarea materialului la distrugerea prin cavitate creata in laborator, precum si o metoda originala de corelare a rezultatelor experimentale obtinute in diverse aparate vibratorii.

Pentru realizarea obiectivelor propuse s-a proiectat si executat un aparat vibrator cu cristale piezoceramice (T2), performant, ce respecta normele americane ASTM [120] si s-a uzat de unele rezultate obtinute, pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel (T1), de domnii .C.P.I. ing. I. Potencz si dr.ing. A.F. Kuzman.

In realizarea noului aparat am fost ajutat de dl. ing. Matiu Andrei, Directorul intreprinderii "S.C. STIMEL S.A.", sustinator permanent al Catedrei de Masini Hidraulice, prin sponsorizarea intregii lucrari practice.

De asemenea, de mare ajutor in realizarea si punerea in functiune a aparatului T2 mi-au fost: d-nii ing. A. SEST, ing. GH. CRACIUNESCU si familia LACATUSU de la "S.C. ELECTROTIMIS S.A."; d-nii ing. D. VIDRASCU, ing. LAZUGA si M. ANGHEL de la "S.C. STIMEL S.A."; d-nul Conf. dr. ing. C. MUNTEANU.

In stabilirea naturii constituintilor structurali, indicatiile pretioase am primit de la dl. Prof. dr. ing. I. MITELEA si colegii de la Catedra de Stiinta Materialelor.

Sfaturile, colaborarea placuta si sprijinul necontenit oferit, pe intreaga perioada de elaborare a tezei, de dl. Prof. dr. ing. M. POPOVICIU, seful Catedrei de Masini Hidraulice, m-au facut sa simt putere si incredere in ceea ce fac.

Insa, cel mai mare merit in formarea mea ca dascal si cercetator, in gandirea intregii lucrari, proiectarea si realizarea aparatului, il are conducatorul acestei teze dl. Acad. Prof. Dr. Doc. Ing. IOAN ANTON.

Tuturor le multumesc si le raman recunascator.

Multumesc colegilor de catedra si tuturor celor care au fost alaturi de mine in aceasta perioada.

Sper ca aceasta lucrare sa fie de un real folos industriei romanesti, producatoare si exploatare de echipamente hidromecanice si elici navale, chiar daca viitorul ei, azi, pare cetos

Autorul

CUPRINS

INTRODUCERE.....	7
CAP.1. STADIUL ACTUAL AL INVESTIGATIILOR SI IDENTIFICARILOR EROZIUNII CAVITATIONALE PE MASIINILE INDUSTRIALE SI IN LABORATOR.....	8
1.1 Investigatii si identificari ale eroziunii cavitationale la turbinele hidraulice.....	8
1.2 Investigatii si identificari ale eroziunii cavitationale la pompe.....	13
1.3 Investigatii si identificari ale eroziunii cavitationale la elicele navale.....	15
1.4 Investigarea eroziunii cavitationale in laborator.....	16
1.4.1 Obiective urmarite prin investigarea eroziunii cavitationale in laborator.....	16
1.4.2 Instalatii de laborator utilizate.....	18
1.4.3 Metode de evaluare a comportarii materialelor la eroziune cavitationala.....	29
1.4.4 Efecte de scara.....	30
1.5 Concluzii si definirea problemelor abordate si rezolvate in tema.....	37
CAP.2. STUDIUL, PROIECTAREA SI REALIZAREA UNUI APARAT VIBRATOR CU CRISTALE PIEZOCERAMICE, DESTINAT DISTRUGERII MATERIALELOR PRIN EROZIUNE CAVITATIONALA.....	40
2.1 Consideratii generale.....	40
2.2 Elemente initiale de calcul si proiectare.....	42
2.3 Proiectarea si realizarea blocului ultrasonic.....	43
2.3.1 Alegerea transductorului piezoceramic.....	44
2.3.2 Calculul si realizarea concentratorului- amplificator de energie acustica.....	46
2.4 Dimensionarea si realizarea vasului pentru lichidul de lucru.....	58
2.5 Stabilirea formei si dimensiunilor probei de incercare.....	61
2.6 Stabilirea schemei de functionare a generatorului electronic de ultrasunete.....	62

2.7 Schema instalatiei pneumatice de actionare a mecanismului de ghidare.....	67
2.8 Determinarea experimentală, controlul și verificarea amplitudinii vibrațiilor.....	69
2.9 Descrierea și funcționarea aparatului vibrator.....	74
2.10 Defecțiuni și mod de remediere.....	78
CAP.3. CERCETARI EXPERIMENTALE, REALIZATE ÎN LABORATORUL DE MASINI HIDRAULICE DIN TRILBOARA (T.MITT), ASUPRA UNOR MATERIALE.....	80
3.1 Metoda de testare utilizată.....	80
3.2 Cercetări experimentale realizate în aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel (T1).....	81
3.2.1 Materiale testate.....	81
3.2.2 Rezultate experimentale.....	83
3.2.2.1 Curbe caracteristice.....	83
3.2.2.2 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale.....	99
3.2.3 Discuții și concluzii.....	103
3.3 Cercetări experimentale realizate în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice (T2).....	109
3.3.1 Materiale testate.....	109
3.3.2 Rezultate experimentale.....	109
3.3.2.1 Curbe caracteristice.....	109
3.3.2.2 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale.....	110
3.3.3 Discuții și concluzii.....	118
CAP.4. ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE.....	122
4.1 Considerații asupra distrugerii cavitationale a materialelor în cele două aparate.....	122
4.2 Influența elementelor chimice componente.....	125
4.3 Influența constituenților structurali.....	127
4.4 Influența proprietăților mecanice.....	129
4.5 Influența calității materialului asupra corelațiilor $R_m(v_s)$, $R_{p0.2}(v_s)$ și $HB(v_s)$	144
4.6 O metodă de apreciere a comportării materialelor la eroziune cavitațională.....	149
4.7 Concluzii.....	153
CAP.5. COMPARAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE OBTINUTE ÎN CELE DOUĂ APARATE.....	154
5.1 Comparatii între curbele caracteristice.....	154
5.2 Comparatii între parametrii caracteristici eroziunii cavitationale.....	157
5.3 Aspecte ale suprafețelor probelor erodate cavitațional.....	158
5.4 Concluzii.....	161

CAP.6. CERCETARI DE EROZIUNE CAVITATIONALA ASUPRA UNOR MATERIALE SUPUSE TRATAMENTELOR DE DURIFICARE.....	162
6.1 Eroziunea cavitacionala a otelului 40Cr10 imbunatatit.....	162
6.2 Eroziunea cavitacionala a otelului D 32-1 nitrurat ionic.....	164
6.3 Eroziunea cavitacionala a otelului D 32-1 durificat prin metalizare si ecruisare.....	166
6.3.1 Eroziune cavitacionala a otelului D 32-1 durificat prin metalizare.....	166
6.3.2 Eroziune cavitacionala a otelului D 32-1 ecruisat.....	169
6.4 Concluzii.....	171
CAP.7. STABILIREA EFECTULUI DE SCARA IN EROZIUNEA CAVITATIONALA.....	172
7.1 Introducere.....	172
7.2 Prima etapa a rezolvarii problemei efectului de scara in eroziunea cavitacionala.....	173
7.3 A doua etapa a rezolvarii problemei efectului de scara in eroziune cavitacionala.....	175
7.4 A treia etapa a rezolvarii problemei efectului de scara in eroziunea cavitacionala.....	177
7.5 A patra etapa a rezolvarii problemei efectului de scara in eroziunea cavitacionala.....	178
7.6 Concluzii.....	189
CAP.8. CONCLUZII.....	190
8.1 Concluzii generale.....	190
8.2 Contributii personale si originale.....	192
8.3 Propuneri.....	194
BIBLIOGRAFIE.....	195
ANEXA: Schema si programul de calcul al concentratorilor-amplificatori de unde sonice.....	205

INTRODUCERE

Froziunea cavitacionala, numita si cancerul masinilor hidraulice, reprezinta efectul de distrugere a materialelor solide aflate in contact cu fluidul cavitant.

Practic, acest fenomen a intrat in vizorul oamenilor de stiinta si al cercetatorilor inca din anul 1875, cand italianul BARTELLO a observat primele distrugerii cavitationale pe elicele navelor Mauritania si Luisitania [43,53]. De atunci eforturile de investigare a cauzelor ce genereaza acest fenomen si stabilire a ponderii influentei tuturor factorilor ce contribuie la procesul hidrodinamic si mecanic, al eroziunii cavitationale a materialelor, se intensifica tot mai mult.

Astfel, se fac investigatii atat pe instalatiile industriale cat si in laborator. Nu exista tara, posesoare de centrale hidroelectrice sau alte echipamente hidromecanice si exploatare de nave maritime si fluviale, in care acest fenomen sa nu fie studiat de specialisti. Amintesc, aici, doar cateva din tarile cu traditie in cercetarea eroziunii cavitationale: S.U.A, Japonia, Rusia, Suedia, Germania, China, Franta, India, Polonia, Cehia.

In Romania aceasta problema ocupa un loc aparte. Potentialul hidroenergetic al tarii si dezvoltarea industriei constructoare de turbine hidraulice au determinat realizarea unor ample programe de cercetare a eroziunii cavitationale. Contributii insemnate au: Centru de Cercetare-Proiectare al U.C.M. Resita, ICEPRONAV Galati, U.P. Timisoara si U.P. Bucuresti.

Studiile efectuate arata ca cele mai afectate instalatii, de eroziunea cavitacionala, sunt turbinele hidraulice, pompele, elicele navale si alte echipamente hidromecanice.

Majoritatea eforturilor sunt concentrate spre gasirea unor materiale care sa aibe rezistente la distrugere cavitacionala cat mai mari si care sa asigure durate de exploatare indelungate. Din acest motiv se fac investigatii de stabilire a factorilor ce caracterizeaza materialul (proprietati fizico-mecanice, structura, tehnologie de elaborare si prelucrare, etc.) si pot asigura acesta calitate. Pentru acest scop, in investigatiile realizate pe instalatiile industriale, in speta pe turbinele hidraulice, mai toti cercetatorii au folosit diferite materiale in realizarea si repararea organelor distruse si metode de protectie a suprafetelor atacate cavitacional. Ample rezultate in aceste domenii sunt oferite de rusi [34, 71, 72, 73] si japonezi [49, 61, 119]. Cunoasterea cat mai bine a comportarii materialului la atacul cavitacional conceperea si realizarea diverselor tipuri de statii de laborator [32, 33, 41, 52, 69, 10, 111]. Insa, majoritatea studiilor sunt raportate la comparatii intre materiale, dupa rezistenta la eroziune cavitacionala [8-11, 15 - 20, 47, 48, 106].

In cadrul lucrarii se analizeaza factorii importanti ce determina tipul de material si rezistenta sa la distrugere cavitacionala, se discuta unele rezultate oferite de literatura si se ofera, in acelasi timp, metode de apreciere si ordonare a materialelor dupa rezistenta la eroziune cavitacionala si transpunere a rezultatelor de la o statie la alta.

CAP.1 STADIUL ACTUAL AL INVESTIGATIILOR SI IDENTIFICARILOR EROZIUNII CAVITATIONALE PE MASINILE INDUSTRIALE SI IN LABORATOR

Distrugerea organelor de masina, aflate in contact cu fluidul cavitant, prin eroziune cavitationala a dus la ample cercetari pe masinile hidraulice si echipamentele hidromecanice, unde functionarea fara cavitate este practic imposibila.

Cele mai multe rezultate, oferite de literatura de specialitate, se refera la eroziunea cavitationala a turbinelor hidraulice, pompelor si elicelor navale.

1.1 INVESTIGATII SI IDENTIFICARI ALE EROZIUNII CAVITATIONALE LA TURBINELE HIDRAULICE

Componenta turbinei hidraulice care se distruge cel mai rapid prin eroziune cavitationala, dupa 10-20(30) mii ore de functionare, este rotorul. Distrugerea acestuia se realizeaza indiferent de materialul folosit. Spre exemplificare in fig.1.1 si 1.2 se prezinta cate un rotor de turbina Kaplan si Francis erodate cavitational [3,4,51,65].



Fig.1.1 Rotor de turbina Kaplan distrus prin eroziune cavitationala [51]



Fig. 1.2 Rotor de turbina Francis distrus prin eroziune cavitationala [71]

Stabilirea cauzelor ce duc la distrugerea turbinei hidraulice si a cailor de atenuare a efectului acesteia a impus cercetarea eroziunii cavitationale prin observatii directe

si evaluarea distrugerilor ce apar. In aceste directii cele mai ample studii sunt efectuate de cercetatorii rusi Edel si Palaev [4,72], Pernik [73], Orahelasvili [71].

La noi in tara o activitate intensa o are Colectivul de Cavitate din cadrul Facultatii de Mecanica din Timisoara, condus de dl. academician I. Anton.

Dintre metodele folosite cele mai interesante rezultate au dat:

- a)- executia paletelor rotorice din diferite materiale,
- b)- folosirea unor probe standard, confectionate din diferite materiale, fixate in zonele supuse unor intense distrugereri cavitationale,
- c)- acoperirea zonelor, supuse eroziunii cavitationale, cu metale usor distructibile.

Prima metoda a fost aplicata de Edel si Palaev [72] turbinei Kaplan T4 de la C.H.E. V. I. Lenin de pe Volga, fig. 1.3a si turbinei Kaplan T2 de la Timleansk, fig. 1.3b.

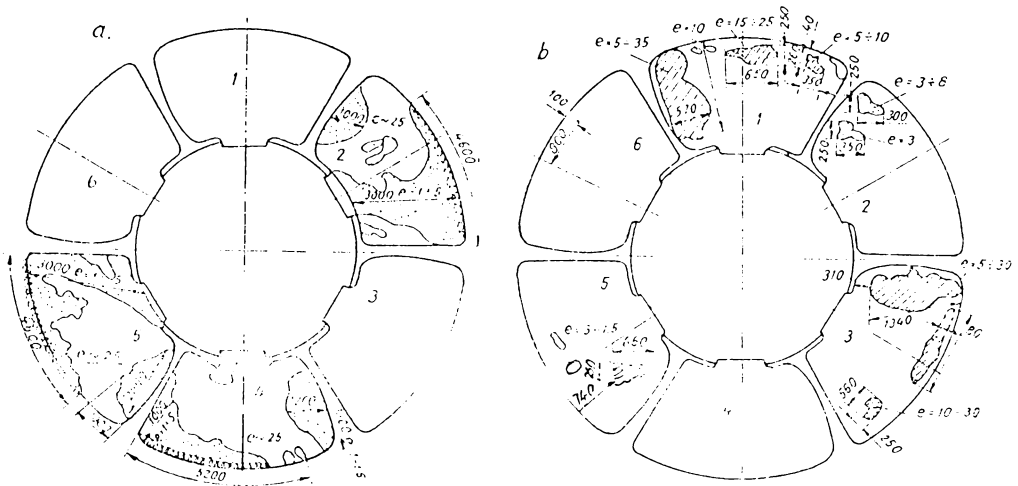


Fig. 1.3. Distrugereri prin eroziune cavitationala la paletele rotoarelor de turbina Kaplan [72]: a- C.H.E. V. I. Lenin; b- C.H.E. Timleansk

Rotorul din fig. 1.3a avea 3 palete(1,3,6) turnate din otel 20H13NL cu HB=180 daN/mm si 3 (2,4,5) din otel aliat 18DGSL cu HB =160 daN/mm . Dupa 18000 ore de functionare paletetele din otel aliat prezentau, pe dosul paletetei, suprafete erodate cu

adancimi pana la 20-25 mm, iar cele din otel inoxidabil nu prezentau distrugerii semnificative.

Rotorul din fig.1.3b avea 2 palete (4,6) din otel inoxidabil martensitic 25H14NL cu HB=200 daN/mm, doua din otel carbon 30L (1,3) si doua din otel carbon 30L (2,5) placat cu otel inoxidabil 1H18 N9T cu HB=156 daN/mm.

Dupa 30000 ore de exploatare s-a constatat:

- paletele din otel carbon 30L erau distruse pe suprafete mari cu adancimi pana la 30 mm,
- paletele din otel carbon placate cu otel inoxidabil prezentau distrugerii pe adancimi pana la 15 mm,
- paletele din otel inoxidabil martensitic nu prezentau distrugerii semnificative.

Constatarile de mai sus arata ca distrugerile paletelor depind de materialul folosit.

Cercetarile efectuate de Prof. dr. ing. M.Popoviciu [90], pe turbina Kaplan de la Portile de Fier I, arata ca unul si acelasi material (OH12NDL) poate avea o comportare cavitationala buna sau foarte buna, in functie de intensitatea procesului. Acest aspect este real intrucat turbina in exploatare functioneaza la diferiti coeficienti de cavitate, fig.1.4, implicand distrugerii pe arii si in locuri diferite [90].

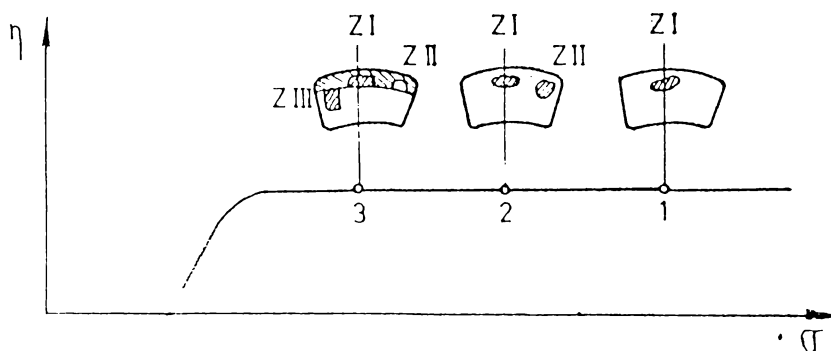


Fig. 1.4 Caracteristica primara de cavitate $\eta(\sigma)$ si evolutia distrugerilor [90]

Prin urmare, otelul inoxidabil OH12NDL in zona 1 se comporta foarte bine, la atacul cavitional, in zona 2 se comporta bine, iar in zona 3 se comporta slab. De asemenea, se remarca ca la acelasi regim de functionare, zona 3, cavitatea de rost Z I este mai profunda decat cea de profil Z III.

In cadrul metodei b) Edel si Palaev [72] au folosit probe cilindrice cu $D=30$ mm, realizate din otel carbon si inoxidabil, pe care le-au fixat in camera turbinei pe placi din otel 1H18N3G3D21. Plasarea s-a facut in locul de intensitate cavitionala maxima. Dupa 15000 ore de functionare probele din otel carbon au fost distruse complet, iar cele din inox prezentau usoare urme de eroziune cavitionala. Aceasta metoda ilustreaza dependenta distrugerilor, prin eroziune cavitionala, de calitatea materialului si intensitatea fenomenului cavitional.

Pentru adancimea medie de patrundere e_m , Edel si Palaev [72] propun urmatoarea relatie de calcul:

$$e_m = A t^n \quad (1.1)$$

unde:

$A=(0,7:3) \cdot 10^{-7}$ - coeficient ce caracterizeaza intensitatea eroziunii

$n=1,6:2$ - exponent ce caracterizeaza materialul

t - durata de exploatare, in ore.

Modul de variatie a adancimii medii de patrundere e in functie de timp, obtinut de Edel si Palaev [4,72] pentru diferite palete, realizate din diverse materiale, este prezentat in fig. 1.6

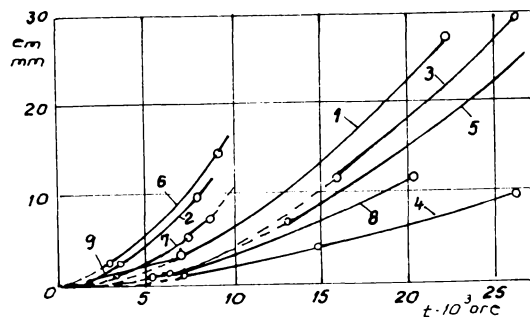


Fig. 1.6 Variatia adancimii medii de patrundere in functie de timp [4,72]

Semnificatia cifrelor din fig. 1.6 este:

- 1- paleta rotorului turbinei Francis de la CHE Mingeceaursk (otel carbon 30L)
- 2- paleta rotorului turbinei Francis de la CHE Dneprovsk (otel carbon 25L)
- 3- paleta rotorului turbinei Kaplan de la CHE V.I. Lenin (otel aliat 18DGSL)
- 4- camera rotorului de turbina Kaplan de la CHE V.I. Lenin (otel MOL3)
- 5- paleta rotorului de turbina Kaplan de la CHE Timleansk (otel carbon 30L)

- 6- paleta rotorului turbinei Francis de la CHE Bratsk (otel aliat 20 GSL; H=78m)
- 7- paleta rotorului turbinei Francis de la CHE Bratsk (otel aliat 20GSL; H=84m)
- 8- paleta rotorului turbinei Francis de la CHE Bratsk (otel inoxidabil OH12NDL; H=103m)

- 9- paleta rotorului turbinei Kaplan de la CHE Verhne-Tulomsk (otel aliat 20HNL).

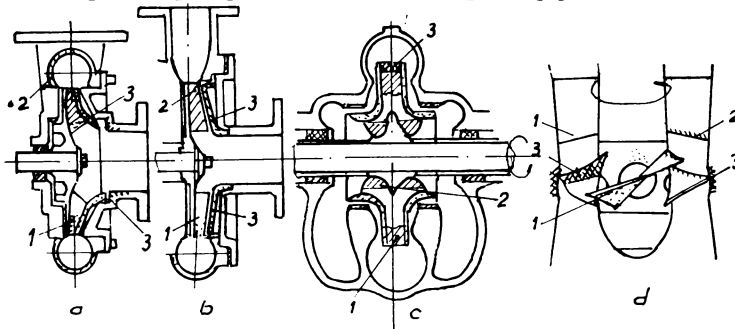
Fig.1.6 arata dependenta distrugerilor cavitationale de tipul turbinei, calitatea materialului si parametrii energetici functionali (H,P,Hs,n).

1.2 INVESTIGATII SI IDENTIFICARI ALE EROZIUNII CAVITATIONALE LA POMPE

In functie de destinatie pompele pot functiona in regim de supercavitatie, cavitatie avansata, cavitatie industrială si fara cavitatie [4,33,45,51,91,100].

Majoritatea pompelor folosite in industrie functioneaza in cavitatie. Fara cavitatie functioneaza numai pompele din domeniul alimentar, unde este interzisa prezenta particulelor solide ce pot apare in urma eroziunii cavitationale.

Zonele cu cea mai mare frecventa de distrugere, prin eroziune cavitatională, la diverse tipuri de pompe, sunt indicate in fig. 1.7 [4].



1. Eroziune cavitatională 2. Abraziune 3. Eroziune cavitatională-abraziune

Fig. 1.7 Zone tipice distruse prin cavitatie si prin abraziune [4]

Se observa ca elementul cel mai distrus este rotorul, respectiv paleta rotorica.

In fig. 1.8 este prezentat un rotor de pompa centrifuga distrus prin cavitatie [4].

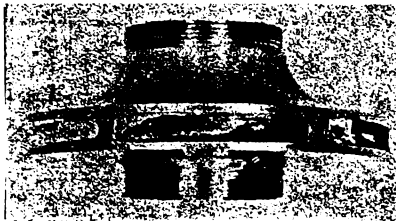


Fig. 1.8 Rotor de pompa centrifuga erodat cavitational [4]

In functie de destinatie si cerintele impuse rotorul pompelor este realizat din materiale ceramice, aluminiu, fonta, inox, etc. [3,4,51,73].

Marea majoritate a rotoarelor sunt realizate din fonta cenusie si foarte rar din fonta cu grafit nodular sau otel inoxidabil cand sunt necesare justificari economice [27,77].

Experientele au aratat ca eroziunea cavitatională se manifesta intens cand pompele functioneaza la turatii ridicate [4,37,45,51,100]. La aceste pompe eroziunea cavitatională reduce sectiunea paletii si duce la ruperea sa datorita solicitarilor mecanice ridicate, determinate de varfurile mari de presiune ce apar in timpul cavitatiei [21,73]. Astfel de distrugerii apar, asa cum se observa si in fig. 1.8, pe fata sau dosul paletelor in apropierea bordului de atac, daca durata de functionare este maxima la debite partiale sau mai mari decat cel optim [4,37,56,73].

Analizele tehnico-economice efectuate pe numeroase pompe si statii de pompare au determinat CEGB-ul sa afirme [4]: "viata rotorului de pompa trebuie sa fie de cel putin 4500 ore cand functioneaza la debitul optim, deci circa 80% din timpul de exploatare".

Grist [37], Kasai [49] si Kuzman [54] arata ca distrugerea cavitationala a pompe-
lor depinde de lichidul vehiculat, materialul folosit pentru rotor si regimul de functio-
nare. De asemenea, Grist arata ca maximul intensitatii erozionale apare la alta valoare:
a coeficientului de cavitate al instalatiei σ decat cea la care apare scaderea randa-
mentului energetic, fig.1.9 [4,37].

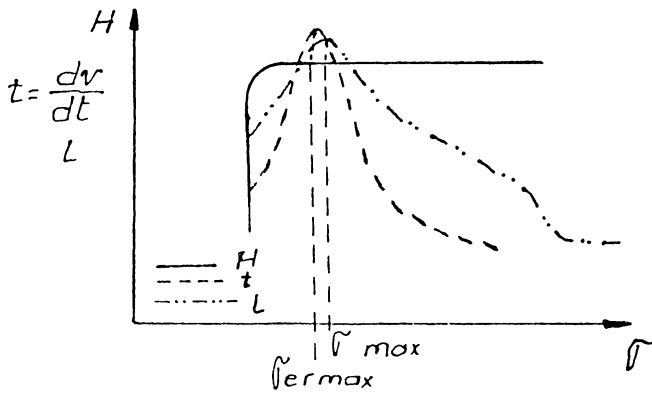


Fig. 1.9 Asocierea curbei primare de cavitate cu curbele de intensitate erozionale la cavitate [37]

Pentru eliminarea completa a distrugerilor prin cavitate, la pompele cu $n < 3000$ rot/min, Grist [37] propune functionarea la o cadere dinamica de presiune [4,37]:

$$NPSHc_{min} = 1,05 NPSHi_{viz} \quad (1.2)$$

sau pentru $n > 3000$ rot/min [4,37]:

$$NPSHc_{min} = (1 + \frac{n}{60000}) NPSHi_{viz} \quad (1.3)$$

Majoritatea cercetarilor experimentale, legate de determinarea caracteristicilor de cavitate si corelarea lor cu intensitatea eroziunii, au dus la aproximatiile [4,37,60]:

$$NPSHac_{max} = NPSHviz = NPSHer_{max} \quad (1.4)$$

Desi s-au realizat ample studii in domeniul eroziunii cavitationale a pompe-
lor, problema determinarii cantitatii de material erodat, cand pompa functioneaza la un
anumit stadiu cavitional este, deocamdata, nerezolvata. Evident dificultatile sunt le-

gate atat de diversitatea materialelor in fabricarea pompelor (in special a rotoarelor) cat si a lichidelor vehiculate si a conditiilor de exploatare.

1.3 INVESTIGATII SI IDENTIFICARI ALE EROZIUNII CAVITATIONALE LA ELICELE NAVALE

Cu toate ca primele observatii de eroziune cavitationala s-au facut asupra navelor maritime [57,100], literatura de specialitate ofera prea putine date despre distrugerea elicelor navale, in raport cu cele referitoare la turbinele hidraulice si pompe.

De asemenea, functionarea elicei in curent neuniform si nestationar pune mari probleme specialistilor in pronosticarea nivelului distrugerii cavitationale [4,26,41, 45,57,117].

Cele mai multe studii sunt realizate in laboratoare prin masuratori si observatii vizuale, utilizand elici confectionate din materiale usor distructibile, asa cum a procedat Van der Meulen [117], folosind o elice de aluminiu erodata dupa 40 ore de functionare. Transpunerea rezultatelor din laborator pe elicea industriala eate anevoioasa datorita efectului de scara nefinalizat [4,117].

In functie de modul de exploatare al navelor, elicea navala poate fi distrusa intr-un timp mai lung sau mai scurt. Bjorne arata ca cele mai frecvente distrugerii apar la elicele cargourilor si tancurilor petroliere de mare tonaj [26]. In fig. 1.10 se prezinta o elice din bronz, avand $D = 6,7\text{m}$ si $Z = 5$ palete, folosita la propulsarea unui vapor maritim si distrusa prin eroziune cavitationala [3]. Elicea a functionat la 100 rot/min.



Fig. 1.10 Elice de vapor distrusa prin eroziune cavitationala [3]

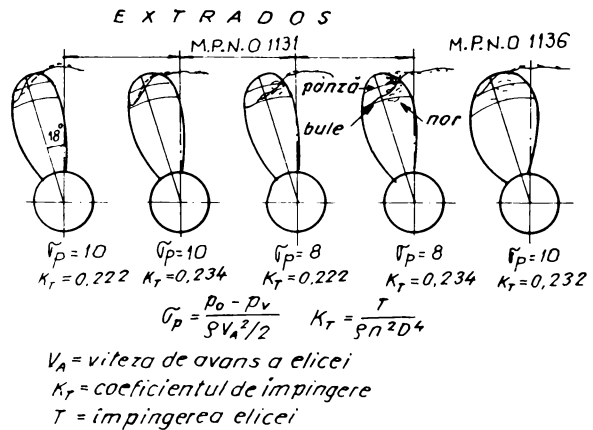


Fig. 1.11 Distrugerii prin eroziune cavitationala la paletele de elici navale [45]

Cercetarile realizate de Ito [45] arata ca zona cu frecventa cea mai mare de distrugere apare pe dosul paletei langa bordul de atac, la $(0,7 - 0,8) \cdot R$ si depinde de coeficientul de cavitatie $\sqrt{p} = 2(p - p_0) / \rho v_A^2$ (v_A - viteza de avans a elicei) si coeficientul de impingere $K_T = T / \rho n^2 D^4$ (T - impingerea elicei), fig. 1.11.

Dependenta distrugerii elicelor de o serie de factori ce intervin in exploatarea navelor (dimensiunea elicei, forma geometrica a palei, incarcarea vasului, distributia circulatiei, tipul cavitatiei, etc.) si imposibilitatea evitarii acestui fenomen a dus la cautarea unor materiale care sa le mareasca durata de viata [26,45,117,128].

In momentul de fata cele mai bune rezultate sunt oferite de bronzurile navale, ce contin elemente de aliere ca Ni, Al, Mn [11,14,18,26,45]. Insa, pretul de cost ridicat impune gasirea unor materiale inlocuitoare, care sa fie accesibile financiar si sa prezinte comportari cavitationale bune. Asta implica realizarea unor ample studii de eroziune cavitionala, pe probe, in laboratoare.

1.4 INVESTIGAREA EROZIUNII CAVITATIONALE IN LABORATOR

Depistarea unor materiale care sa aibe un pret de cost scazut si rezistenta mare la eroziune cavitionala, a dus la realizarea instalatiilor de laborator, ce permit o analiza mai sistematica a comportarii materialelor la atacul cavitional.

Folosirea instalatiilor de laborator prezinta o serie de avantaje [3,41,42,106,120]:

- crearea unor fenomene cavitationale, de intensitati diferite, ce pot fi controlate si mentinute un timp indelungat,
- folosirea diferitelor lichide de lucru la temperaturi si presiuni variabile,
- probele pot fi montate si demontate cu usurinta, in vederea determinarii cantitatii de material erodat si studierii suprafetei distruse,
- durata de distrugere a probelor este cu mult mai mica decat cea intalnita in situatiile reale la masinile hidraulice, elicele navale si aparatele hidraulice de comanda si reglare,
- camerele de lucru permit vizualizarea, filmarea si fotografierea atacului cavitional.

Aprecierea comportarii cavitationale a materialelor se face pe baza curbelor caracteristice, valorii parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale si fotografiilor obtinute la microscopul optic sau electronic.

1.4.1 Obiective urmarite prin investigarea eroziunii cavitationale in laborator

Principalele obiective urmarite prin cercetarile de eroziune cavitionala, realizate in laborator, sunt:

1- identificarea materialelor cu rezistenta, la eroziune cavitationala, suficient de mare, astfel incat sa aigure, pieselor ce functioneaza in fluid cavitant, o durata de exploatare cat mai mare,

2- stabilirea, de fiecare laborator, a unui criteriu de ordonare a materialelor dupa rezistenta la cavitatie,

3- stabilirea unui material etalon, cu buna rezistenta la eroziune cavitationala, pentru fiecare statiune,

4- stabilirea tendintelor de influenta a comportarii cavitationale, a materialelor, de:

- tipul structurii si natura constutuentilor structurali,
- elementele chimice componente,
- proprietatile fizico-mecanice, tehnologia de elaborare (turnare, laminare, matri-tare, etc.), a materialului,
- forma semifabricatului (rotund, patrat, tabla, tagle, etc.),
- natura si temperatura lichidului de incercare,
- parametrii tehnico-functionali ai statiunii de inecare,
- tratamentul aplicat,
- etc.

5- stabilirea unor relatii de legatura intre rezultatele experimentale, obtinute in stati-uni de acelasi tip,

6- stabilirea unor criterii de similitudine in eroziunea cavitationala,

7- stabilirea parametrului ce reflecta cel mai bine rezistenta materialului la eroziune cavitationala.

Cercetatorii si-au adus contributii, in realizarea acestor obiective, sub diverse forme. Astfel, Garcia, in teza sa de doctorat [33], studiaza tendinta de influenta a tipului si temperaturii lichidului de lucru (apa distilata, bismut, mercur) precum si a proprietatilor fizico-mecanice pentru diverse materiale (oteluri carbon, oteluri aliate, inoxuri, aliaje neferoase), asupra vitezei de eroziune cavitationala si adancimii medii si maxime de patrundere MDP, respectiv MDP_{max}. Studiul este realizat global, in tunel cavitant si aparat vibrator, si se incheie cu relatii empirice de legatura intre marimile analizate si parametrii de referinta, caracteristici eroziunii cavitationale. Gradul de aplicabilitate al relatiilor, astfel stabilite, este limitat. El poate creste daca analiza se realizeza separat, pe grupe de materiale: oteluri carbon, oteluri aliate pentru constructii, oteluri inoxidabile, aliaje ale cuprului si aluminiului, etc.

Astfel de studii sunt efectuate si de Thiruvengadam [111], Steller [104], Hobbs [41,42] si Hammitt s.a. [39].

Influenta tipului de structura si a constituintilor structurali este prea putin studiata. Contributii, in aceasta directie, au Hrelescu [44], Karimi [47,48] si Thiruvengadam [111].

Influenta parametrilor tehnico-functionali ai statiunii de incercare, in particular ai aparatului vibrator, este analizata de Hobbs [41], Hammitt-Okada [40], Thiruvengadam [113] si Garcia [33], si prezinta relatii de dependenta sub forma grafica sau analitica. Thiruvengadam stabileste si o curba tip pentru viteza de eroziune cavitationala [113], fig. 1.12, si recomanda ordonarea materialelor dupa viteza de eroziune cavitationala din zona de stabilizare v_s (zona 4).

6, 4, 4
366 A

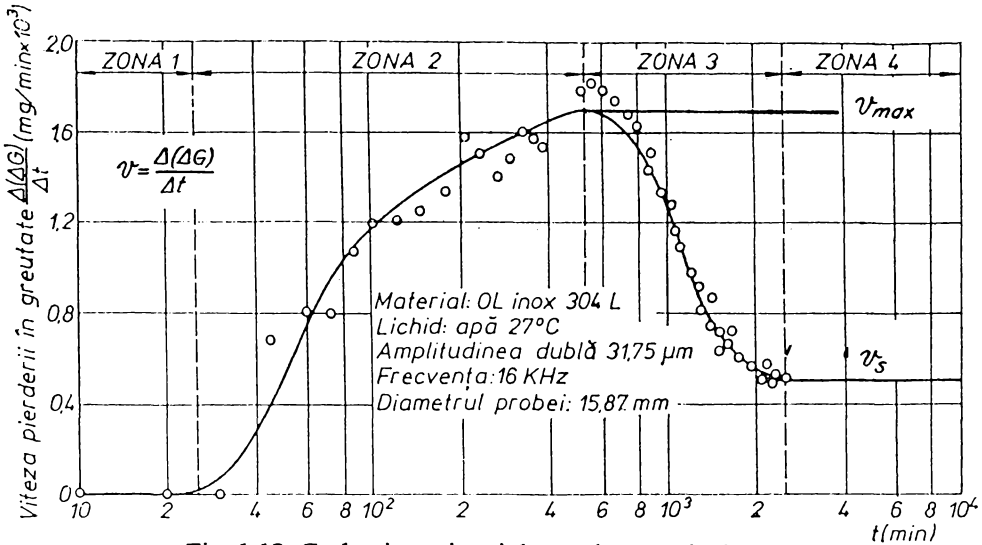


Fig. 1.12 Curba tip a vitezei de eroziune cavitionala stabila de Thiruvengadam [3,113].

Preocupari in stabilirea unor relatii de efect de scara, de similitudine si modelare matematica a vitezei de eroziune cavitionala au: Hammitt [40], Thiruvengadam [113], Steller [101,102], Sakai-Shima [95a], Shalnev [97], Heymann [3] si Noskievici [67,68]. Insa, numai Thiruvengadam ofera corelari ale intensitatilor distructive din diferite instalatii [113].

In concluzie se remarca faptul ca, cu toate eforturile depuse, pana in prezent nu s-a finalizat nici unul din obiectivele importante, cum sunt cele de la punctele: 1, 4, 5, 6 si 7.

1.4.2 Instalatii de laborator utilizate

Exista trei tipuri de instalatii de laborator folosite in studiul eroziunii cavitationale a materialelor:

- 1- tunele hidrodinamice cu camera de lucru strangulata,
- 2- aparate cu disc rotitor imersat in lichid,
- 3- aparate vibratorii

1- Tunele hidrodinamice

Tunelele hidrodinamice sunt astfel realizate si concepute incat permit generarea unor fenomene cavitationale similare celor din masinile hidraulice [3,7, 33,39,40, 99,111]. Peretii camerelor de lucru sunt transparenti si permit vizualizarea, fotografierea, filmarea si inregistrarea evolutiei procesului de distrugere cavitionala In

fig.1.13 se prezinta tunelul hidrodinamic realizat de Knapp si forme ale camerelor de lucru [3,35,40,42].

In tabelul 1.1 sunt afisate cele mai semnificative date despre tunelele hidrodinamice folosite in lume [106].

Tab.1.1 Tunele hidrodinamice [106]

Tunel cavitant							
Laborator	Parametrii						
	Putere pompa kw	Cavitator	Aria probei mm ²	Viteză lichid		Presiune P _∞ Pa	Temp. °C
				V m/s	V _{surf.} m/s		
CITY University Anglia	20	bolt	897	21	45	8900	40
CSSRC, Wuxi China	100	ic	3096	14	28	10297	20
HIROschima University	11	Sist.obs	259	30	300	4052	40
VK-AK PEITZ Germania	?	bolt	986,3	30	41,5	9300	10

Avantajul folosirii unei astfel de statii o constituie posibilitatea determinarii distributiei de presiuni, din camera de lucru, pentru diferite stadii cavitationale si construirii curbelor $\sigma=f(Re)$, fig. 1.14

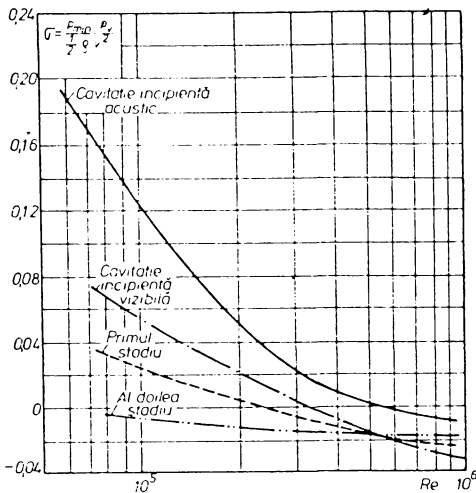
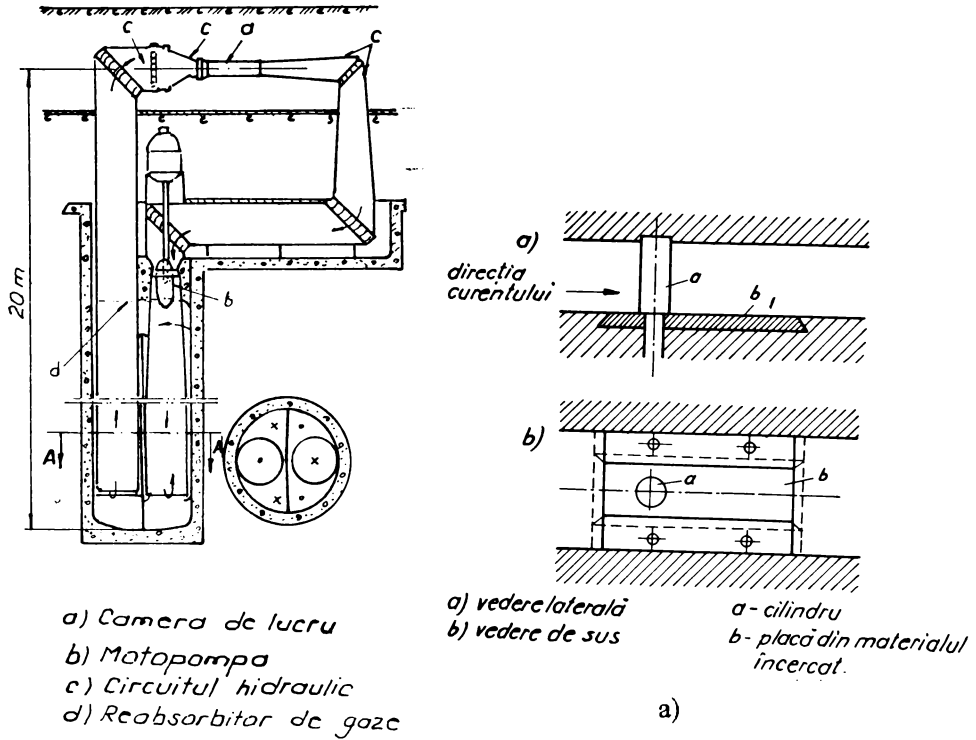


Fig.1.14 Variatia coeficientului de cavitatie cu numarul Re pentru diferite stadii cavitationale [4].

Dezavantajul instalatiei il constituie gabaritul ridicat si timpul indelungat, necesar erodarii cavitationale a probelor (10 - 300) ore [3,33,39,106].



1. Proba
2. Tijă de fixare
3. Zona de început a cavităției
- 4-B Marcarea zonei cavitaționale în funcție de extinderea ei.

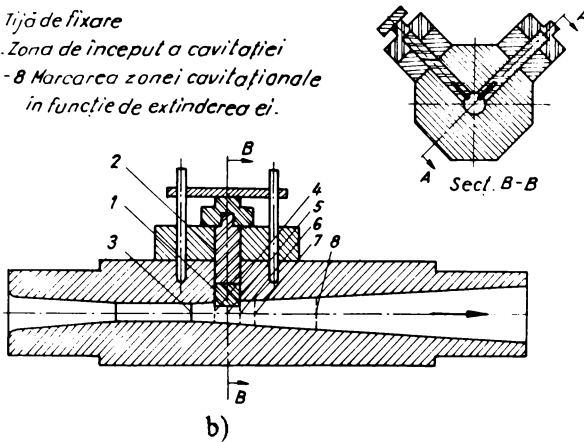


Fig.1.13 Tunelul hidrodinamic pentru studiul cavitatiei (Knapp) [2, 4]

- a) - cavitatie in camera cu obstacol
 b) - cavitatie in tub venturi

2- Aparate cu disc rotitor imersat in lichid

Aparatele cu disc rotitor imersat in lichid simuleaza cel mai bine eroziunea cavitionala a masinilor hidraulice si elicelor navale [3, 39, 43, 106, 116]. Elementul de baza al acestor aparate il constituie discul rotitor imersat in lichid, a carui turatie poate fi modificata in functie de intensitatea fenomenului cavitional dorit. In acest disc sunt realizate orificii, cu geometrie variabila, dispuse dupa spirale logaritmice, care servesc la generarea cavitatiei [3]. In spatele orificiilor sunt montate probele de forma cilindrica a caror suprafata este distrusa prin eroziune cavitionala.

Camera de lucru, in care-i montat discul rotativ, este cu pereti transparenti permitand vizualizarea, filmarea si fotografierea fenomenului cavitional.

In fig.1.15 se prezinta un model de aparat cu disc rotitor, utilizat de Veerabhadra [116], iar in tabelul 1.2 marimile caracteristice ale unor astfel de aparate [106].

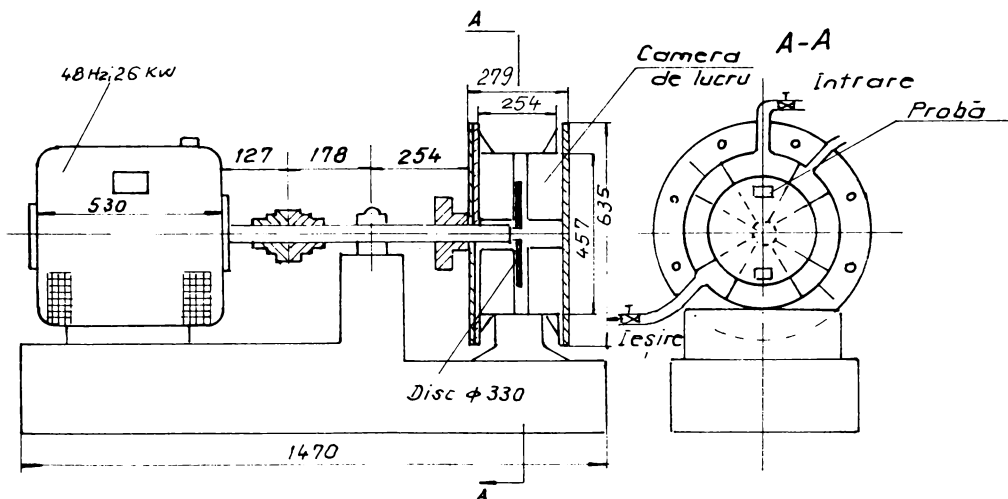


Fig.1.15 Aparat cu disc rotitor imersat in lichid [116]

Tab.1.2 Aparate cu disc rotativ [106]

Laborator	Parametrii							
	Putere motor P kW	Diam. disc D mm	Turatie rot/min	Cavitator		Suprafata mm ²	Temperatura °C	Pres. medie Pa
				gaura nit	viteza m/s			
CSSRC, Wuxi	30	350	2950	gaura	4,3	1256,6	20	1030
IMP PAN, Gdansk	40	330	3000	nit	4,2,5	706,5	20	1550
KSB AG, Frankenthal	28	500	1537	nit	29,6	200	40	464
SIGMA Vu, Olomouc	52,5	275	5000	gaura	60,2	2x491	40	700

Dezavantajele acestor aparate sunt coplexitatea campului de viteze si presiuni din camera de lucru, care fac imposibila crearea unui model matematic al fenomenului cavitacional produs si durata ridicata a incercarilor (10 ÷ 60 ore), crescand pentru materiale rezistente de tipul inoxurilor.

3 Aparate vibratorii

a) Generalitati

Aparatele vibratorii folosite in cercetarea eroziunii cavitationale a materialelor sunt de doua tipuri [1,3,40,52,99,106,111]:

- magnetostrictive
- piezoelectrice

Dintre aparatele magnetostrictive cele mai uzuale folosesc traductoare feritice si tuburi de nichel [33,40,69,106,120].

Azi, un accent tot mai ridicat se pune pe utilizarea aparatelor vibratorii cu cristale piezoceramice datorita [1,33,98,120]:

- elasticitatii ridicate si frecventelor de lucru inalte,
- pierderii de caldura reduse,
- eficientei mari in conversia energiei.

La aceste aparate distrugerea materialului depinde de nivelul parametrilor tehnico-functionali: puterea electrica de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete, diametru probei, frecventa si amplitudinea oscilatiilor, temperatura si natura lichidului de lucru. Eroziunea cavitacionala are loc ca urmare a miscarii vibratorii pe verticala ce genereaza, periodic, un nor de bule cavitationale prin a carui surpare se nasc presiuni ridicate pe suprafata probei, producand ruperi de material.

Conditia esentiala, ca eroziunea sa aiba loc, este ca norul sa adere pe suprafata probei. Aceasta este determinata de tensiunea superficiala la interfetele lichid-solid-vapori si interactiunea mecanica dintre bule si asperitatile suprafetei probei.

Probele supuse atacului cavitacional pot fi stationare sau vibratorii (fixate de subansamblu transductor) [33,106,120].

La aparatele vibratorii cu tub de nichel nivelul amplitudinilor depinde de lungimea tubului, iar la cele cu transductor piezoceramic si feritic de forma concentratorului-amplificator (conic, exponential, cilindric in trepte, catenoidal, etc.) si raportul sectiunilor intrare-iesire [1,36,98].

Camerele de lucru sunt cu pereti transparenti si ofera aceleasi facilitati ca la tunelurile hidrodinamice si aparatele cu disc rotitor.

In tabelul 1.3 se prezinta marimile caracteristice ale celor mai semnificative aparate vibratorii folosite in eroziunea cavitacionala [33,40a,52,76,106].

Desi procesul cavitacional este total diferit de cel din instalatiile industriale aparatele vibratorii sunt tot mai des folosite datorita urmatoarelor avantaje [1,3,120]:

- durata de incercare foarte mica, maxim 2 - 4 ore,
- spatiul ocupat foarte redus,
- permit utilizarea oricarui tip de lichid,

- au cea mai mare intensitate de distrugere, fig. 1.16 [3,4],
- rezultatele obtinute sunt acoperitoare pentru situatiile reale.

Tab.1.3 Parametrii tehnico-functionali ai unor aparate vibratorii

Nr. crt.	Laboratorul (țara) (Simbolul folosit)	Tip stațiune	Frecvența f (KHz)	Amplitudinea A (μm)	Diametrul probă D (mm)	Puterea electr. P_e (W)	Bibl.
1	LMH-Timișoara (TI)	magneto- strictivă	7	47	14	500	[52]
2	Universitatea Michigan (M)	piezoelec- trică	$6,4 \div$ $\div 22,5$	$12,5 \div$ $\div 100$	$14,3 \div$ $\div 22$	200	[33,40]
3	IMP, PAN, Gdansk (IMP Gdansk - Polonia)	magneto- strictivă	8,1	50	12,5	500	[106]
4	CISE, Milan (Italia)	piezoelec- trică	20	50,8	15,8	1000	[106]
5	VSB Ostrava (Cehia)	piezoelec- trică	20	40	16	250	[106]
6	Lab. Mec. Beograd (Beograd - Croatia)	piezoelec- trică	20	50	?	?	[76]
7	CAPE Town University (Africa de Sud)	piezoelec- trică	20	60	10	500	[106]
8	CSSR, Wuxi (China)	piezoelec- trică	20	32	16	250	[106]
9	HIROSHIMA (Japonia)	piezoelec- trică	19,9	24	16	100	[106]
10	HULL University (Michigan)	piezoelec- trică	20	117	18	200	[106]

W - aparat vibrator
T - aparat cu disc
U - aparat cu jet

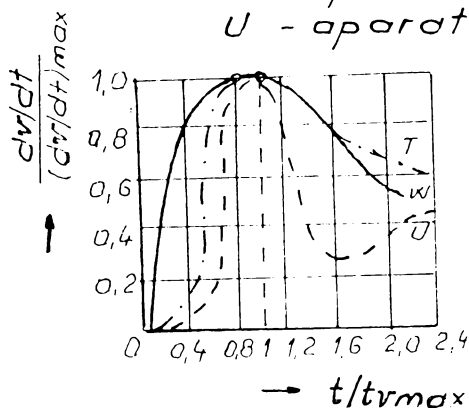


Fig. 1.16 Dependentă intensității distrugerii cavitaționale relative de aparatul generator de cavitație [3,4]

Dezavantajele acestor aparate sunt necesitatea unei bune izolari fonice si dificultatea stabilirii unor relatii care sa permita transpunerea rezultatelor la masina industrială, datorita modului diferit de realizare a fenomenului cavitational [3,30a, 40a]. Insa, datorita numarului mare de statii existente este absolut necesara crearea unei relatii de efect de scara care sa permita transpunerea rezultatelor de la o statie la alta.

b) Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1

b1) Principiu de functionare. Parti componente

Magnetostrictiunea este proprietatea unor materiale de a se contracta si dilata cand sunt plasate intr-un camp magnetic de intensitate ridicata [1,24].

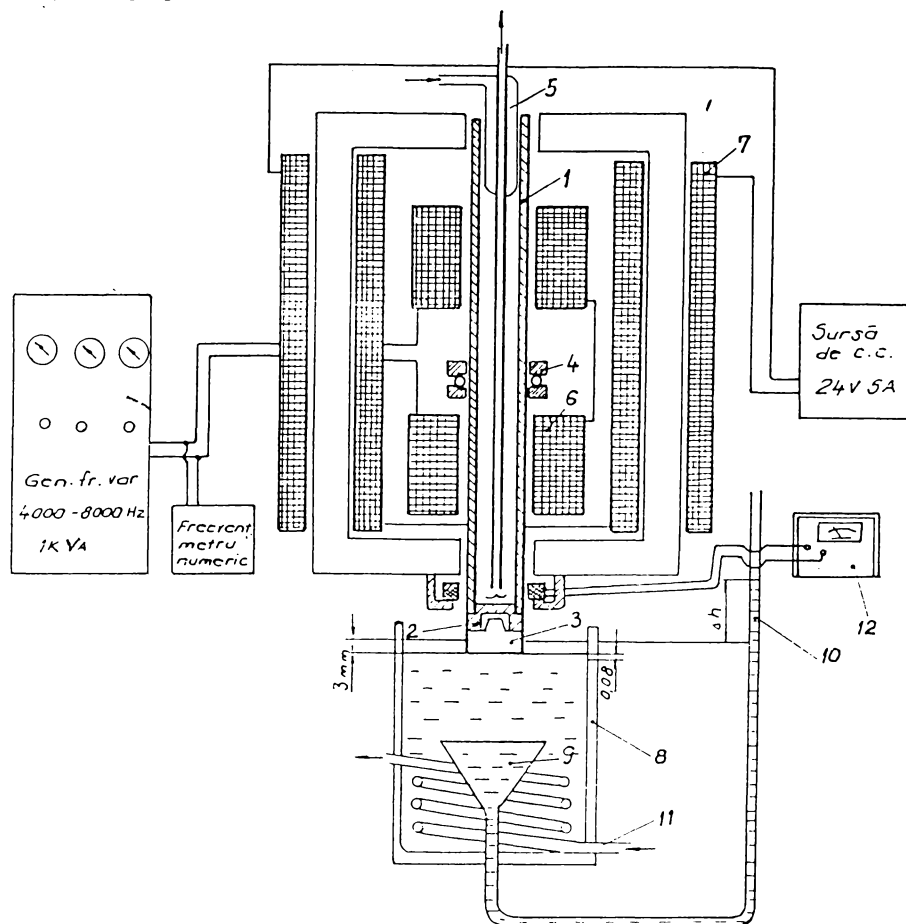
Dintre materialele cu magnetostrictiune ridicata se remarca nichelul pur si anumite tipuri de ferite [1,24,36,98]. Pe baza acestei proprietati s-a construit intre anii 1958-1962, de catre C.P.I. ing. I. Potencz [52], aparatul magnetostrictiv cu tub de nichel T1, fig.1.17 si 1.18 aflat in Laboratorul de Masini Hidraulice al Universitatii Politehnica din Timisoara, destinat studiului distrugerii cavitationale a materialelor. Este compus dintr-un generator de inalta frecventa, cu putere maxima de iesire de 500W a curentului alternativ produs, cu frecventa de iesire reglabila intre 4000 - 8000 Hz si un vibrator magnetostrictiv format dintr-un tub de nichel (1), de lungime $l=305$ mm, fixat pe un suport in campul magnetic pulsator. Tubul de nichel are la un capat sudat capul de prindere filetat (2) pentru fixarea probei (3). Frecventa proprie de oscilatie a tubului este functie de lungimea sa si viteza sunetului din metal [1,24,36,54]. Tubul este fixat in nodul de oscilatie printr-un sistem de prindere inelar (4). In jurul tubului de nichel sunt plasate 2 bobine (6), alimentate de la generatorul de frecventa variabila, care induce, in tub, un camp magnetic alternativ puternic (tensiunea de iesire 70V si puterea 1KVA). Peste acest camp se suprapune un camp continu realizat cu ajutorul unor bobine si un jug magnetic (7), alimentate de la o sursa de curent continuu de 24 V si 5 A [44]. Prin insumarea celor doua campuri rezulta un camp magnetic pulsator de amplitudine dubla. Datorita acestui camp tubul de nichel se contracta in ritmul frecventei campului alternativ, proba (3), executand o miscare vibratorie pe verticala.

De asemenea, datorita intensitatii ridicate a campului magnetic pulsatoriu, in tubul de nichel se induce curenti Foucault care-l incalzesc foarte puternic. Aceasta caldura se compenseaza cu un sistem de racire adecvat, pentru a nu se transmite probei, efectuarea in cercarilor in conditii de temperatura incerte, si evitarea pierderii proprietatilor magnetostrictive ale tubului de nichel, care are loc la 400 C si care conduce la reducerea pronuntata pana la incetarea miscarilor vibratorii [1,24,36,44, 54].

Prin racordarea frecventei curentului de alimentare a bobinelor cu frecventa de oscilatie mecanica, proprie, a tubului de nichel, se obtin, datorita fenomenului de rezonanta mecanica, oscilatii mari ale probei, care ajung la amplitudinea de 94 m [44], [52].

Proba (3), fig.1.19, este scufundata in vasul cu lichidul de incercare la o adancime de imersare 3 mm. Datorita vitezelor mari ale suprafetei probei si aderenței fluidului, la miscarea de urcare apar depresiuni mari ce duc la aparitia unui nor de bule cavitationale, care, la miscarea de coborare se surpa pe aceasta suprafata distrugand-o. Uzual, procesul se realizeaza cu o frecventa de $7000 \pm 3 \% \text{ Hz}$.

Modul de formare a norului de bule cavitationale pe suprafata probei este prezentat in fig. 1.19 [54].



- 1 - tub de nichel ; 2 - piesă fixare probă ;
 3 - probă ; 4 - sistem inelar fixare tub nichel ;
 5 - sistem răcire tub ; 6 - bobine curent alternativ ;
 7 - bobine curent continuu ; 8 - vas cu lichid de lucru ;
 9 - pâlnie captare unde sonice ; 10 - piezometru ;
 11 - serpentină răcire ; 12 - aparat electric

Fig. 1.17 Aparatul vibrator magnetostrictiv
 cu tub de nichel T1

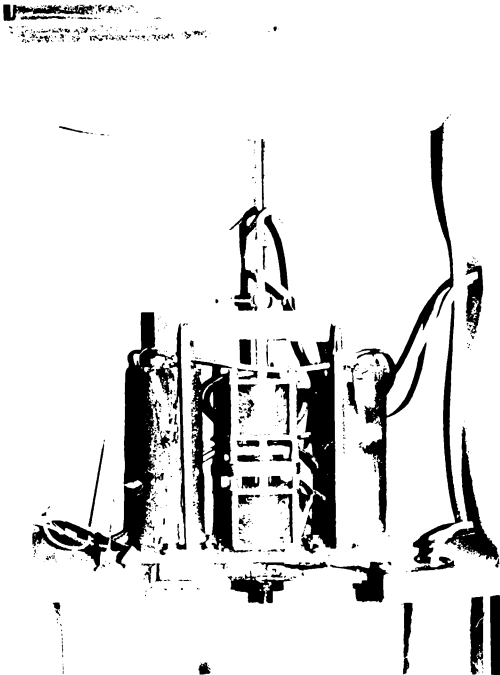


Fig. 1.18 Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 (I. Potencz [52])

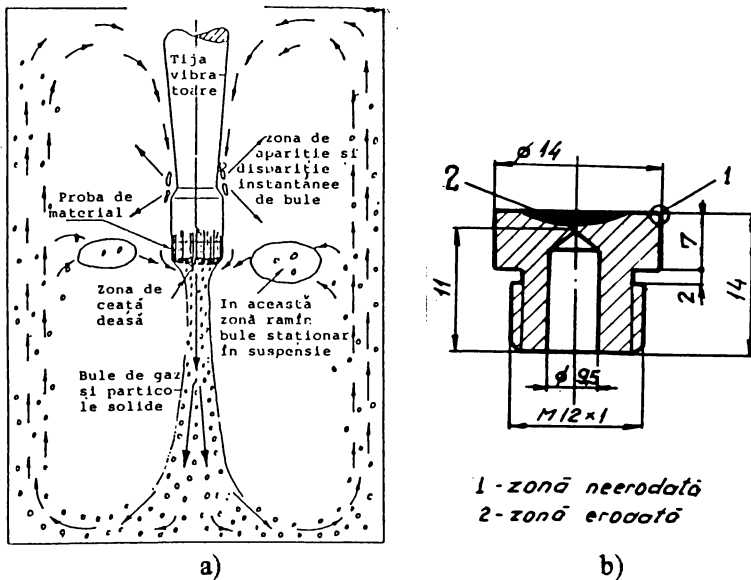


Fig. 1.19 Miscarea în vasul cu lichid la cavitatea vibratorie, după Piltz [54]
a) - formarea norului de bule cavitaționale
b) - forma geometrică a probei

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

Mentinerea constantă a amplitudinii se obține prin reglarea fină a tensiunii de ieșire a generatorului cu ajutorul unui autotransformator ce acționează asupra intensității curentului alternativ și implicit asupra intensității câmpului magnetic pulsatoriu [44,54].

Deoarece, aparatul permite și încercarea probelor acoperite prin diferite procedee tehnologice, care, uneori, duc la suprafețe supuse atacului cavitațional denivelate, pentru citirea corectă a amplitudinii s-a realizat un sistem electric de măsurare (12), realizat dintr-o bobină și un voltmetru cu rezistență de intrare mare (12), fig. 1.20 [54].

Mentinerea constantă a temperaturii lichidului din vas se realizează cu o serpentină din cupru prin care circulă apa de răcire de la rețea.

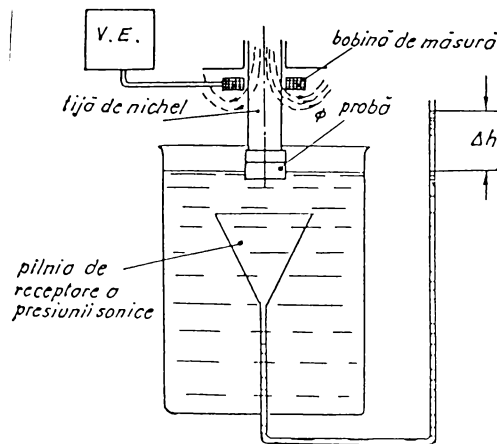


Fig. 1.20 Măsurarea amplitudinii cu aparatul electric [54]

b) Caracteristicile fizice ale aparatului vibrator

Din frecvența reală de 7000 Hz rezulta perioada unei vibrații [1, 24]:

$$T = \frac{1}{f} = 14,28 \cdot 10^{-5} (\text{s}) \quad (1.5)$$

Pulsatia oscilațiilor este:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = 43,98 \cdot 10^3 (\text{s}^{-1}) \quad (1.6)$$

Viteza de oscilatie a probei este:

$$v = \omega A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

Viteza maxima are valoarea:

$$v_{\max} = \omega A \quad (1.8)$$

Viteza medie are valoarea :

$$\bar{v} = \frac{v_{\max}}{2} \quad (1.9)$$

Acceleratia tije de nichel este data de relatia:

$$a = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.10)$$

Acceleratia maxima are valoarea:

$$a_{\max} = \omega^2 A \quad (1.11)$$

Se constata ca desi viteza, cu care se misca tija de nichel, este relativ mica, acceleratia este foarte mare:

$$a_{\max} \cong 9268 \text{ g} \quad (\text{g} = \text{acceleratia gravitacionala})$$

Presiunea sonica este [1,24,36]:

$$p_s = x \omega \rho c \cos \omega \left(t - \frac{m}{c} \right) \quad (1.12)$$

unde:

p_s - presiunea sonica

x - elongatia

ρ - densitatea lichidului (pentru apa = 1000 Kg/mm)

c - viteza sunetului in lichidul de lucru (pentru apa $c = 1412 \text{ m}$ [110])

ω - pulsatia miscarii vibratorii

t - timpul

m - masa care vibreaza

Presiunea sonica maxima are expresia [1,24,36,54]:

$$p_{s \max} = A \omega \rho c = 47 \cdot 10^{-6} \cdot 43,98 \cdot 10^3 \cdot 10^3 \cdot 1142 = 2918688,7 \text{ Pa} \quad (1.13)$$

Deci : $p_{s \max} = 2918688,7 \text{ Pa} = 29,187 \text{ bar}$

Relatiile (1.12) si (1.13) sunt valabile numai pentru unde plane cu lungime de unda mica propagate in medii omogene [1, 24, 98]. Ultima conditie nu poate fi respectata deoarece in vasul cu lichid se afla in permanenta mediu bifazic lichid-bule.

Cum $p_{\text{stat}} \cong p_{\text{at}}$ si $p_v = 2338 \text{ Pa}$ (pentru $t = 20^\circ\text{C}$ [30a]) rezulta ca conditia de aparitie a cavitatiei in aparatul vibrator magnetostrictiv [24, 30a, 54, 120], este indeplinita :

$$p_{\text{stat}} - p_{s \max} = -2817363,7 \text{ Pa} \ll p_v \quad (1.14)$$

De altfel, practica a dovedit ca eroziunea cavitacionala are loc la amplitudini mult mai mici decat $A = 47 \mu\text{m}$ [40].

1.4.3 Metode de evaluare a comportarii materialelor la eroziune cavitacionala

Ordonarea si evaluarea rezistentei materialelor la eroziune cavitacionala se face dupa unul din criteriile:

- 1- panta curbelor de pierdere masica $m(t)$ sau volumica $V(t)$, tg , in zona de stabilizare [3,9 - 18, 50 - 67, 71 - 78, 91 - 98, 102, 113],
- 2- viteza de stationare a eroziunii (de stabilizare, finala de palier) v_s [9 - 18, 50 -56, 61 - 63, 71 - 78, 87, 88, 102, 111],
- 3- viteza maxima a eroziunii V_{\max} [31,40, 48, 49, 65, 91, 102, 133],
- 4- rezistenta normalizata la cavitatie R_n [40, 79, 111,120],
- 5- viteza adancimii medii sau maxime de patrundere a eroziunii, MDPR respectiv MDPRmax, sau inversul acestora, $1/\text{MDPR}$ respectiv $1/\text{MDPRmax}$, [30, 33, 39, 40, 87a],
- 6- timpul de incubatie [3,30a, 39,40a,116,120],
- 7- durata necesara obtinerii unei pierderi volumice sau masice date [3,35,39,74,99],
- 8- durata necesara realizarii unei anumite adancimi de patrundere [3, 33,91].

Deoarece rezultatele experimentale sunt influentate de parametrii tehnico-functionali ai statiunii, permitand un grad de subiectivitate, nici unul din parametrii mentionati nu este acceptat, ca unic, de catre cercetatori.

Dintre acesti parametrii, timpul de incubatie este folosit cu precadere la aprecierea materialelor testate in tunele hidrodinamice si aparate cu disc rotitor [39,116].

Normele ASTM [120] recomanda parametrii 1, 2, 3 si 4, iar Thiruvengadam [113] viteza de stabilizare a eroziunii v_s . Pentru viteza de eroziune cavitacionala maxima normele ASTM [120] recomanda acea valoare dupa care viteza devine descrescatoare. Se face aceasta recomandare, deoarece valorile ridicate din primele minute ale atacului cavitacional (obtinute cu precadere in aparatele vibratorii) sunt puternic afectate de praful abraziv si nivelul rugozitatii din suprafata atacata [81, 106].

Azi, majoritatea cecetatorilor utilizeaza, pentru ordonarea materialelor dupa rezistenta la distrugere cavitationala, parametrii 1 si 2 [9 -17, 30, 46, 69,70,99,104].

In cadrul aceste lucrari ca parametrii caracteristici se folosesc cei de la punctele 2, 3, 4 si 5.

1.4.4 Efecte de scara

O problema importanta, aflata de multi ani in atentia cercetatorilor, este realizarea unui model matematic care sa coreleze proprietatile cavitationale ale materialelor cu caracteristicile lor fizico-mecanice si parametrii tehnico-funcionali ai statiunii de incercare [3].

Contributii insemnate, in aceasta directie au: Shalnev s.a [97], Thiruvengadam s.a [3,111], K. Steller [3, 4, 101, 103] si Sakai-Shima [95a]. Dintre acestia K.Steller si Sakai - Shima au elaborat cele mai avansate si interesante modele.

1.4.4.1 Modelul K. Steller [3, 101, 102]

Analizand rezultatele experimentale obtinute in Laboratorul Institutului de Masini cu Curent de Fluid din cadrul Academiei de Stiinte Poloneze din Gdansk [101, 102], K. Steller formuleaza ipotezele, legate de natura solicitarilor in timpul distrugerii cavitationale si natura si structura materialului, care stau la baza modelului.

Elementul fundamental al modelului il constituie admiterea evolutiei similare a rezistentei la cavitatie cu rezistenta la oboseala, data de Wohler, fig 1.21.

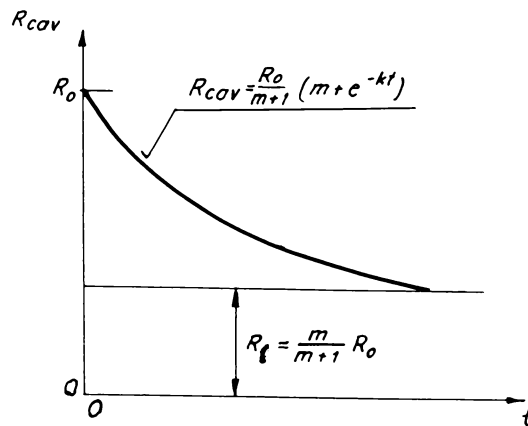


Fig. 1.21 Variatia rezistentei materialului la eroziune cavitationala cu timpul de atac [1, 101]

Cu aceasta ipoteza autorul stabileste legea de variatie a rezistentei la oboseala:

$$R_{cav} = \frac{R_0}{m+1} (m + e^{-kt}) \quad (1.15)$$

unde

$$R_0 = UR = \frac{R_m^2}{2E} - \text{rezilienta finala} \quad (1.16)$$

$m > 0$ - defineste rezistenta minima R_1 a materialului in raport cu rezistenta initiala R_0 ,

k - constanta ce depinde de material, durata atacului cavitional si conditiile de distrugere.

Scriind egalitatea dintre energia absorbita de material, pentru dislocarea unui volum V si energia furnizata in acest scop ($P.t = R_{cav} V$), autorul stabileste relatiile de baza ale modelului:

- variatia volumului erodat cu timpul de atac cavitional:

$$V = \frac{V_0}{\zeta} (m + e^{-k\zeta}) \frac{t}{m + e^{-kt}} \quad (1.17)$$

- variatia rezistentei cavitationale momentane cu timpul de atac cavitional:

$$R_{cav} = \frac{\zeta \cdot P}{V_0} \left[\frac{m + e^{-kt}}{m + e^{-k\zeta}} \right] \quad (1.18)$$

- rezistenta initiala:

$$R_0 = \frac{\zeta \cdot P}{\zeta} \left[\frac{1 + m}{m + e^{-k\zeta}} \right] \quad (1.19)$$

- rezistenta limita la cavitatie:

$$R_1 = \frac{\zeta \cdot m \cdot P}{V_0 (m + e^{-k\zeta})} \quad (1.20)$$

- durabilitatea cavitionala momentana:

$$\zeta_{cav} = \frac{R_{cav}}{P} = \frac{\zeta (m + e^{-kt})}{V_0 (m + e^{-k\zeta})} \quad (1.21)$$

Marimile necunoscute din aceste relatii au semnificatiile:

P - puterea furnizata materialului in timpul distrugerii, in W ,

ζ - durata totala a atacului cavitional, in min ,

V_0 - volumul erodat in timpul ζ , in mm^3 .

Determinarea experimentală a puterii P nu este, încă, pusă la punct. Pentru aparatele vibratorii, unii autori considera ca aceasta este constantă, ca urmare a invariabilității valorilor parametrilor tehnico - funcionali in timpul distrugerii [33, 39, 24, 47, 95, 101, 111]. In acest mod marimile R_0 si R_1 sunt constante.

Pentru aparatele vibratorii puterea P depinde de calitatea imbinarilor mecanice dintre proba - amplificator - concentrator si transductor [1, 24, 98], fiabilitatea elementelor electronice, calitatea prelucrarilor mecanice, omogenitatea structurala a materialului, etc. Determinare experimentală si stabilirea unor relatii de calcul este in faza de cecetare [30a, 40a].

Ca urmare a acestui neajuns, pentru aplicatii practice, K. Steller recomanda utilizarea durabilitatii cavitationale medii:

$$\bar{\delta}_{cav} = \frac{\bar{R}_{cov}}{P} = \frac{1 + mk\bar{\zeta} - e^{-k\bar{\zeta}}}{k \cdot V_{\bar{\zeta}} (m + e^{-k\bar{\zeta}})} \quad (1.22)$$

Recomandarea este argumentata de faptul ca acest parametru caracterizeaza transformarile interne si superficiale suferite de material in timpul distrugerii, efectele cavitatiei si lichidului in timpul eroziunii.

Cum lichidele, in care functioneaza majoritatea masinilor hidraulice, sunt si corozive rezulta ca rezistenta la cavitatie nu prezinta un palier ca in fig. 1.21, ci o scadere monotona, deci $m \rightarrow 0$.

In acest caz volumul erodat, rel. (1.17) capata forma:

$$V = \frac{V_{\bar{\zeta}}}{\bar{\zeta}} t e^{-k(\bar{\zeta}-t)} \quad (1.22)$$

Integrarea acestei relatii permite definirea constantei k:

$$k = \frac{3}{\bar{\zeta}} \cdot \frac{V_{\bar{\zeta}} \cdot \bar{\zeta} - \int_0^{\bar{\zeta}} V dt}{V_{\bar{\zeta}} \cdot \bar{\zeta}} \quad (1.23)$$

Cum rezultatele de laborator sunt prezentate sub forma curbelor de pierdere volumica V(t) [3,9,16,17,18,67,70,103,113], atunci k se poate determina empiric astfel:

$$k \approx \frac{3}{\bar{\zeta}} \cdot \frac{F_1 - F_2}{F_1 + F_2} = \frac{3\alpha}{\bar{\zeta}} \quad (1.24)$$

unde F1 si F2 sunt arile definite in fig. 1.22.

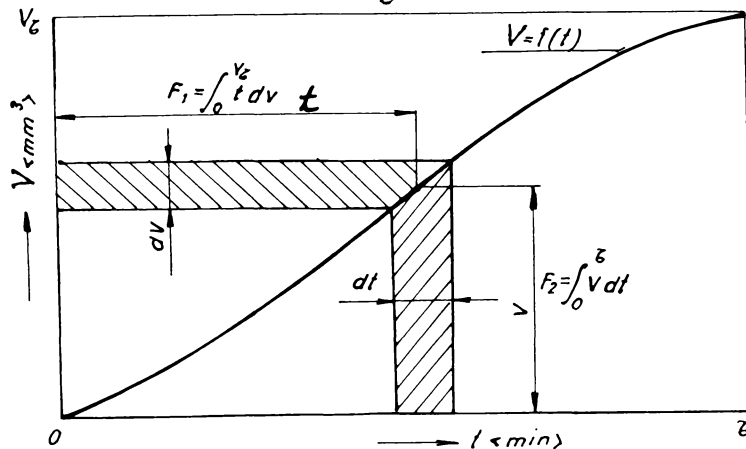


Fig. 1.22 Delimitarea arilor F1 si F2 de curba V(t) [102]

Se observa ca nici una din relatiile stabilite de K. Steller nu contine, in mod explicit, influenta factorilor cu pondere importanta pentru rezistenta materialului la eroziune cavitationala:

- constituinti structurali,
- proprietati mecanice (altele decat rezilienta finala),
- elemente chimice componente,
- tehnologie de elaborare si prelucrare,
- parametrii tehnico - functionali ai statiunii de incercare, etc.

Introducerea acestori factori, ce influenteaza procesul hidrodinamic si mecanic al distrugerii prin cavitate, in parametrii k si m fara a cunoaste ponderea, poate duce in unele cazuri, la neconcordanțe între calculele empirice si rezultatele experimentale. De asemenea, rezistenta la oboseala, definita de Wohler, se refera la solicitarea intregii sectiuni a materialului, pe cand cea cavitationala este de natura locala, punctiforma, semanand mai mult cu oboseala de contact, specifica rotilor dintate si rulmentilor cu bile [23a].

1.4.4.2 Modelul Sakai - Shima [95a]

Sakai si Shima, pornind de la relatiile empirice stabilite de Rao, Garcia si Byrnside, definesc un parametru relativ % de forma:

$$\Psi_n = \frac{U_n H_n E_n}{Y_n} = \frac{T_n^2 H_n}{Y_n} \quad (1.25)$$

unde:

$$U_n = \frac{UR}{UR_{st}}; \quad UR = T^2 / 2E; \quad E_n = E / E_{st};$$
$$H_n = BHN / BHN_{st}; \quad Y_n = Y / Y_{st}; \quad T_n = T / T_{st} \quad (1.26)$$

Semnificatia marimilor din rel. (1.25) si (1.26) este urmatoarea:

UR - rezilienta finala,

BHN - duritatea Brinell (notatia romaneasca HB),

E - modulul de elasticitate longitudinal (modulul lui Young),

Y - limita de curgere (notatia romaneasca $R_{p0,2}$),

T - rezistenta mecanica la rupere (notatia romaneasca R_m),

Marimile notate cu indicele st se refera la otelul inoxidabil 304 SS, etalon pentru aparatul vibrator de la Universitatea din Michigan.

Gruparea proprietatilor mecanice sub aceasta forma este motivata de urmatoarele argumente:

- distrugerea cavitationala depinde puternic de rezilienta finala UR, idee sustinuta si de Hobbs [41], K. Steller [101,102], Anton [2,3,4].

- inversul vitezei adancimii medii de patrundere $1/MDPR$ este proportional cu duritatea Brinell ($1/MDPR \sim (BHN)^{1/8}$), asa cum arata Hammitt. [3,40] si Garcia [33].

- cauza producerii craterelor cavitationale este forta de impuls mecanic creata prin implozia bulelor cavitationale si care, dupa Byrnside, este cel mai bine reflectata de limita de curgere $R_{p0.2}$.

Grupand unele materiale pe clase de calitate (rezultatele lui Garcia [33]), altele nu (rezultatele lui Rao), autorii coreleaza efectul de distrugere cavitationala cu proprietatile mecanice ale materialului, printr-o relatie empirica de tipul:

$$\frac{1}{MDPR} = A \left[1 - e^{-B\psi_n} \right] \quad (1.27)$$

Coefficientii A si B difera de la o grupare la alta (oteluri, aliaje metalice neferoase, materiale nemetalice, etc) si de la mediu la altul (apa la diferite temperaturi, bismut, metal lichid, etc.)

In fig. 1.23 se prezinta dependenta $\frac{1}{MDPR} (\psi_n)$ obtinuta de Sakai si Shima pentru otelurile inoxidabile si aliate Tab. 1.4. Valorile obtinute in acest caz sunt: $A = 492$ si $B = 1,887$.

Tab.1.4 Proprietati mecanice si cavitationale [33]

Material	R_m N/mm ²	$R_{p0.2}$ N/mm ²	HB daN/mm ²	$\frac{1}{MDPR}$ hr/mm
Otel carbon	312,11	286,6	172	171,17
304 SS (etalon)	651,1	445,8	211,3	393,7
316 SS	600,8	438,2	202,4	437,44
Mo - $\frac{1}{2}$ Ti	1142,4	1036,3	263	437,44
Cb - I Zr	408	406,5	134,6	269,54
Cb - I Zr (A)	250,1	132,3	88,3	218,72

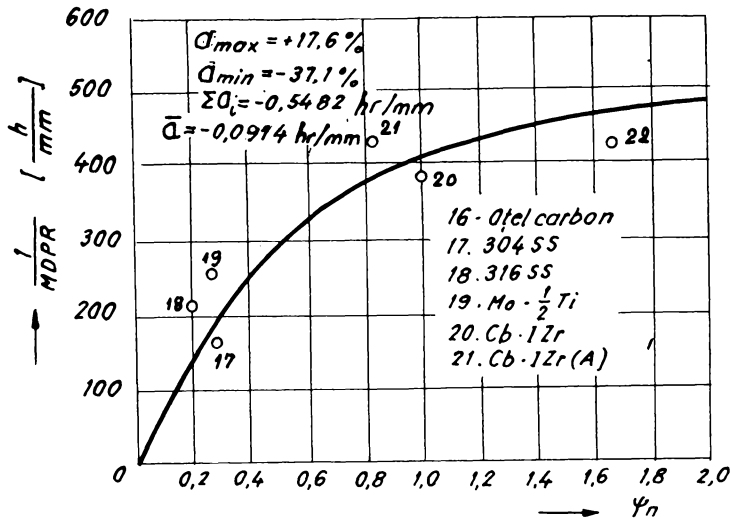


Fig.1.23 Rezistența la eroziune cavitațională după parametru relativ ψ_n [95a]

Analizând expresia parametrului relativ ψ_n se constată că numai reziliența finală $UR = R_m/2E$ este introdusă în forma inițială, acceptată de toți specialiștii, iar limita de curgere $R_{p0,2}$, duritatea BHN sunt introduse de așa natură încât să asigure lui ψ_n valori ce permit o anumită distribuție a punctelor ($1/MDPR, \psi_n$) față de curba definită de ecuația (1.27).

Calculând nivelul erorilor obținute la aproximarea rezultatelor lui Garcia de curba (1.27), a lui Sakai - Shima, se obține:

$$\begin{aligned}
 a_{\max} &= +17,6\% \\
 a_{\min} &= -37,1\% \\
 \sum a_i &= -0,5482 \text{ hr/mm} \\
 \bar{a} &= -0,0914 \text{ hr/mm}
 \end{aligned}
 \tag{1.28}$$

Din condiția obținerii unei precizii ridicate ($a_{\max} = \min$, $a_{\min} = \min$) și unei distribuții cât mai uniforme a punctelor experimentale față de curba ($\sum a_i = \min$, $\bar{a} = \min$), utilizând calculatorul, se obține o curba de ecuație cu forma identică cu (1.27) dar cu coeficienți diferiți.

$$\frac{1}{MDPR} = 409,6 \left[1 - e^{-3\psi_n} \right]
 \tag{1.29}$$

Valorile obtinute prin aproximarea punctelor experimentale de noua curba sunt:

$$\begin{aligned} a_{\max} &= + 28,2 \% \\ a_{\min} &= - 17,3 \% \\ \sum a_i &= - 0,295 \quad \text{hr/mm} \\ \bar{a} &= - 0,049 \quad \text{hr/mm} \end{aligned} \quad (1.29)$$

Dupa valorile lui $\sum a_i$ si \bar{a} rezulta ca fidelitatea aproximarii punctelor experimentale creste de aproape 2 ori.

Prin urmare, relatia propusa de Sakai - Shima, aplicabila numai pentru rezultatele lui Rao si Garcia, poate suferi modificari in structura.

Pentru extinderea si la rezultatele obtinute in alte laboratoare este necesara modificarea exponentilor marimilor din expresia parametrului relativ ψ_n si stabilirea altor valori pentru coeficientii A si B. In acest mod se poate stabili, o relatie de legatura intre rezultatele obtinute in diverse aparate vibratorii, corelate cu caracteristicile mecanice ale materialelor si parametrii functionali ai aparatelor.

Necesitatea modificarii exponentilor este justificata si de faptul ca solicitarea cavitationala are un caracter de oboseala locala, punctiforma, aspect omis de autori. Aceasta solicitare poate fi caracterizata de rezistenta de oboseala de contact R_{ak} , specifica rotilor dintate si rulmentilor cu bile, care pentru materialele cu duritate $< 40 \text{ HRC}$ ($\approx 373 \text{ HB}$) are valoarea [51a]:

$$R_{ak} \approx 0,24 \text{ HRC} \quad \text{respectiv} \quad R_{ak} \approx 2,24 \text{ HB} \quad (1.30)$$

Relatia (1.30) dovedeste ca duritatea din relatia (1.27) poate avea si alt exponent, diferit de unitate.

De asemenea, in timpul distrugerii cavitationale largirea si adancirea craterelor depinde foarte mult de dimensiunile ocluziunilor din material si nivelul temperaturilor dezvoltate prin implozia bulelor cavitationale, care influenteaza limita de curgere si chiar rezistenta mecanica la rupere [34a, 95b]. Acest aspect nu a fost luat in considerare de Byrnside cand a stabilit dependenta distrugerilor cavitationale de limita de curgere. Ipoteza sa se refera la materiale omogene structural si fara defecte. Din acest considerent se pot cauta, pentru obtinerea unor relatii de corelare a rezultatelor experimentale din diverse aparate vibratorii, alti exponenti pentru limita de curgere si rezistenta mecanica la rupere.

In concluzie, modelele Steller si Sakai - Shima, sub formele prezentate nu pot servi la transpunerea rezultatelor experimentale de la un aparat la altul. Obtinerea unei relatii care sa permita realizarea acestei dorinte este posibila numai daca se ia in considerare si influenta parametrilor tehnico - functionali ai aparatului.

1.5 CONCLUZII SI DEFINIREA PROBLEMELOR ABORDATE SI REZOLVATE IN LUCRARE

Din cele prezentate mai sus se desprind urmatoarele concluzii:

a1) - Investigarea eroziunii cavitationale pe masina industrială, este costisitoare si necesita un timp mai mare ca urmare a operatiilor de montare si demontare. De asemenea, erorile ce pot apare sunt foarte mari, circa 100 - 200 % [4, 72, 90].

a2) - Utilizarea probelor din diferite materiale, plasate in locurile supuse atacului distructiv, arata dependenta gradului de distrugere de intensitatea fenomenului cavitional si calitatea materialului [4, 71, 72, 90]. Astfel, unul si acelasi material poate avea comportari cavitationale diferite (vezi otelul inoxidabil OH12NDL [90]). Studiile lui Edel si Palaev dovedesc existenta unor materiale din clase diferite (oteluri aliate si inoxidabile) care la anumite intensitati ale fenomenului cavitional sunt distruse in aceasi masura [72].

a3) - Acoperirea rotoarelor de masina hidraulica si elicelor navale cu lacuri, vopsele, chituri, rasini epoxidice, etc, serveste numai la identificarea zonelor supuse eroziunii cavitationale, fara a mari gradul de protectie [4,70,128]. Aceste metode pot fi utilizate pentru protectie impotriva coroziunii elicelor navelor maritime de cursa lunga, confectionate din materiale cu rezistenta cavitionala medie [128].

a4) - Distrugerea pieselor reparate prin sudura se realizeaza in zona de granita dintre metalul depus si metalul de baza, continuand spre metalul de baza [62,90]. Acest fenomen implica o analiza mai profunda a cauzelor si gasirea unor solutii adecvate care sa asigure o uniformizare a caracteristicilor fizico-mecanice, structurale si chimice ce pot atenua distrugerea acestei zone, prin eroziune cavitionala.

Din punct de vedere al eroziunii cavitationale se impun urmatoarele masuri:

b1) - Continuarea studierii distrugerii materialelor prin eroziune cavitionala si stabilirea cailor de crestere a rezistentei, pe baza rezultatelor de laborator, ca urmare a impedențelor intalnite in urmarirea fenomenului pe masina industrială si nivelului ridicat al erorilor ce pot apare.

b2) - Realizarea cercetarilor pe cel puțin doua instalatii de laborator, de acelasi tip, in conditii similare si pe materiale identice, provenite din acelasi semifabricat si sarja. In acest mod, se pot stabili relatii de legatura între parametri tehnico-funcionali ai instalatiei si parametri caracteristici eroziunii cavitationale, care sa contribuie la transpunerea rezultatelor de la o instalatie la alta.

b3) - Efectuarea unor analize, mai profunde, asupra modului in care principalii factori:

- tehnologia de elaborare,
- structura si constituintii structurali,
- proprietatile mecanice,

- elementele chimice componente,
- tratamentele de durificare (temochimice, mecanice),

influieteaza rezistenta materialului la eroziune cavitationala.

Pentru obtinerea unor informatii mai precise, se impune efectuarea acestei analize pe grupe de materiale (oteluri carbon aliate si nealiate, inoxuri, aliaje neferoase, etc.), deoarece, asa cum arata cercetarile lui Edel si Palaev [72], in fiecare grupa pot exista marci cu comportari cavitationale slabe, bune si foarte bune; dictate de factorii mentionati.

b4) - Stabilirea factorilor ce determina alura curbelor vitezelor de eroziune cavitationala si modul de distributie al punctelor experimentale fata de curbele de aproximatie. Definirea marimilor caracteristice acestor curbe si semnificatiei lor, din punct de vedere al rezistentei la cavitate.

b5) - Continuarea investigatiilor pentru stabilirea unor dependente, grafice sau analitice, ce pot permite aproximarea rezistentei materialelor la eroziune cavitationala intr-o statiune data, cunoscand toti factorii de care depinde aceasta rezistenta (proprietati, structura, compozitie chimica, etc.)

In cadrul tezei sunt abordate si rezolvate urmatoarele probleme:

1 - Proiectarea si realizarea unui aparat vibrator cu cristale piezoceramice, destinat distrugerii materialelor prin eroziune cavitationala, care respecta normele americane ASTM [120]. Acesta este cel de-al doilea aparat vibrator, aflat in dotarea Laboratorului de Masini Hidraulice din Timisoara (LMHT), alaturi de aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel, realizat de I. Potencz [52]. Necesitatea realizarii acestui aparat a fost dictata de gasirea unei relatii care sa permita transpunerea rezultatelor experimentale de la un aparat la altul. Acest deziderat s-a putut realiza datorita incercarii unui numar mare de materiale, din clase diferite, pe ambele aparate.

Avantajul il constituie incercarea probelor provenite din aceleasi semifabricate si sarge, ceea ce elimina variatiile mari ale proprietatilor fizico-mecanice, structurii, raportului constituintilor structurali si concentratiilor de elemente chimice [35a].

2 - Se analizeaza comportarea cavitationala a 20 materiale, de calitati diferite, folosite in fabricarea turbinelor hidraulice, pompelor, elicelor navale, evacuatoarelor de condens termodinamic si aparatelor hidraulice de distributie, comanda si reglare. Toate materialele sunt testate, la eroziune cavitationala, in aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel, T1, iar 14 dintre ele sunt testate in noul aparat vibrator, T2. Analiza se realizeaza pe baza curbelor caracteristice de cavitate, ce definesc variatia vitezei de eroziune cavitationala in functie de timp $v(t)$, si a principalilor parametri caracteristici eroziunii. Diferenta substantiala fata de analizele efectuate de majoritatea cercetatorilor amintiti [6, 29, 30, 32, 33, 39, 40, 41 - 61, 66 - 70, 75, 76, 90, 95, 101 - 108, 111, 113, 118, 127, 129, 133] consta in efectuarea sa pe grupe de materiale: oteluri carbon, fonte, oteluri aliate pentru constructii, inoxuri, bronzuri si alame navale. In acest mod se ofera concluzii noi cu privire la influenta factorilor ce caracterizeaza marca de material: elemente chimice componente, structura si constituinti structurali, tehnologie de elaborare, proprietati mecanice, tratament de durificare superficiala; asupra rezistentei cavitationale a materialului, si cauzelor ce determina o anumita distributie a punctelor experimentale fata de curba $v(t)$. Pe baza curbelor $v(t)$ se stabilesc timpu caracteristici maximului vitezei de eroziune, t_1 si inceputului

stabilizării vitezei, t_2 , care evidențiază o altă latură a comportării cavitaționale a materialelor, neabordată de specialiști până în prezent.

3 - Se analizează tendința de influență, pe grupe de materiale, a principalilor proprietăți mecanice (R_m , HB, $R_{p0,2}$), de care depinde alegerea materialului din punct de vedere al sollicitărilor mecanice [3, 4, 30a, 35, 64, 40a], asupra comportării cavitaționale a materialului. De asemenea, se discută și tendința de influență a unei grupe în raport cu celelalte. Această investigație aduce elemente noi față de cele prezentate de Garcia [32,33], Hammit [39, 40, 40a] și Hobbs [41].

4 - Se concepe o metodă cantitativă de apreciere a rezistenței materialelor la eroziune cavitațională (slabă, bună, foarte bună, excelentă), valabilă pentru aparatele vibratoare. Este prima metodă, de acest fel, ce poate fi utilizată în aprecierea calității cavitaționale a unui material. În cadrul ei se prezintă limitele ce definesc domeniile de comportare cavitațională ale materialelor. Aceste limite sunt stabilite de rezistența normalizată la cavitație R_{ns} sau R_n max.

Până în prezent, aprecierea rezistenței cavitaționale a materialelor s-a făcut prin compararea curbelor caracteristice sau valorilor parametrilor caracteristici eroziunii, cu ai unui material etalon, considerat cu bună rezistență la eroziune cavitațională.

5 - Pornind de la rezultatele obținute de Garcia [33] și Sakai - Shima [95a], considerând ca aparat vibrator etalon pe cel de la Universitatea din Michigan, recunoscut internațional pentru performanțele sale [33, 40, 40a], se stabilește o nouă relație de efect de scară, ce permite transpunerea rezultatelor de la un aparat vibrator la altul. Relația este o îmbinare armonioasă a expresiilor stabilite de Sakai - Shima [95a] și Steller [106].

Modul original în care se realizează această îmbinare și corecțiile efectuate, conduc la creșterea gradului de precizie în transpunerea rezultatelor de la un aparat la altul, cu aproximativ 13 %.

CAP. 2 STUDIUL, PROIECTAREA SI REALIZAREA UNUI APARAT VIBRATOR CU CRISTALE PIEZOCERAMICE, DESTINAT DISTRUGERII MATERIALELOR PRIN EROZIUNE CAVITATIONALA

2.1 CONSIDERATII GENERALE

Aparatele vibratoare, utilizate in distrugerea materialelor prin eroziune cavitationala, sunt sisteme acustice, respectiv ultraacustice, deschise, cu aplicatii tehnologice active, care folosesc energia sonora, respectiv ultrasonora, pentru producerea de modificari in structura mediului prin care se propaga [1, 24, 36, 98].

Azi, majoritatea aparatelor, cu aceasta destinatie, se construiesc pentru functionarea in domeniul ultrasonic [30a].

Pentru distrugerea materialului, prin cavitate, este necesar sa functioneze in regim de rezonanta, cu unde longitudinale plane, la amplitudini de vibratie $A \geq 8$ m [1, 24, 30a, 36, 40a, 69, 120]. La aceste amplitudini cea mai mare parte din energia acustica este absorbita de material, restul disipandu-se sub forma de caldura in mediul inconjurator [1].

Proba supusa atacului cavitational este plasata in maximul amplitudinii de vibratie [1, 24, 40a, 52, 120].

Principalele componente ale aparatelor vibratoare, si in general ale sistemelor cu ultrasunete, sunt [1, 24, 30a, 40a, 36, 98,]:

1. - Sursa de energie - constituita din generatoare electronice de frecventa, numite in mod curent generatoare electronice de ultrasunete.
2. - Transductoare ultrasonore - care transforma cu un anumit randament, energia electrica primita, de la sursa, in energie acustica.
3. - Concentratoare si amplificatoare de energie acustica - care concentreaza energia acustica intr-un volum mic pentru obtinerea unei ultrasonice de intensitate ridicata (in unele aplicatii sunt denumite ghiduri de unda [31]).
4. - Elemente de transfer a energiei acustice si transformatori de unde - fac legatura dintre concentratori - amplificatori si obiectul asupra caruia se exercita actiunea ultrasunetelor, respectiv transforma un tip de unda in alt tip de unda.
5. - Elemente de adaptare si cuplaj acustic - realizeaza o legatura mecano-acustica eficienta, in vederea unui transfer optim de energie intre elementele instalatiei.
6. - sisteme de fixare mecanica si izolare acustica - fixeaza elementele instalatiei acustice in structura sa de rezistenta si o izoleaza fonic de mediu exterior.

Elementul principal al sistemului ultrasonic il constituie blocul ultrasonic, compus din transductorul ultrasonic, concentrator - amplificator si elementele de cuplare, prin ale caror functionari corelate se pot emite si recepta vibratiile a caror frecventa este situata in domeniul ultrasonic.

Elementul activ al aparatului (instalatiei) il constituie tansductorul electromecanic, care pe baza unui efect specific (electromagnetic, electrodinamic, magnetostrictiv, piezoelectric) converteste oscilatiile electrice aplicate de generatorul electronic in oscilatii elastice. Aceste oscilatii sunt transmise, concentrate si localizate, prin intermediul transformatorului acustic, in mediu de prelucrare.

Buna functionare a instalatiei cu ultrasunete depinde de respectarea conditiilor tehnologice, impuse blocului ultrasonic si mai ales partii finale a acestuia (concentratorul-amlificator) si conditiilor acustice, impuse de creerea in intregul sistem oscilator a unui regim de vibratie care sa asigure transmiterea energiei ultrasonore de la transductor la mediu (proba).

Conditiiile tehnologice sunt legate de [1, 24]:

- precizia de calcul si confectionare,
- rezistenta la uzura si oboseala,
- rigiditatea sistemului,
- stabilitatea in functionare,
- calitatea imbinarii elementelor (strangere puternica si lipire perfecta),
- calitatea suprafetelor prelucrate (plane si lustruite) cu abateri stranse de forma si pozitie ,

Conditiiile acustice ce trebuie indeplinite, dupa [1, 98] sunt:

- pierderi minime de energie in transductor si transformator,
- concentrare maxima a energiei ultrasonore,
- stabilitatea regimului de rezonanta a sistemului oscilator in timp,
- uniformitatea radiatiei energiei acustice pe toata aria de utilizare,
- adaptare optima a blocului ultrasonic cu generatorul de oscilatii electrice,
- fiabilitate sporita,
- posibilitatea controlului principalilor parametri de functionare.

Cresterea duratei de functionare neintrerupta si pierderi minime de energie acustica se obtin cand sistemul oscilator lucreaza in regim de rezonanta si depind in principal de materialele din care-s confectionate elementele blocului ultrasonic, calitatea suprafetelor si forma geometrica ale acestor elemente si fiabilitatea componentelor electronice din generatorul electronic de ultrasunete [98].

Reducerea pierderilor de energie este puternic influentata de calitatea imbinarilor dintre elementele blocului ultrasonic, care trebuie sa asigure un cuplaj acustic bun, sigur si o legatura fixa si elastica. Din acest motiv suprafetele de imbinare trebuie sa fie plane si lustruite [1, 24].

Reducerea pierderilor de energie depinde si de modul de fixare sau rezemare a blocului ultrsonic. In general, rezemarea se face pe garnituri de cauciuc, iar locurile de fixare sunt noduri de oscilatie (de deplasare).

Concentrarea energiei in focar (pe suprafata probei supusa atacului cavitational) depinde de alegerea corespunzatoare a dimensiunilor de rezonanta si formei transformatorului acustic. Stabilitatea regimului de rezonanta, al sistemului oscilator, se asigura prin:calculul corect si alegerea corespunzatoare a dimensiunilor de rezonanta a elementelor, buna izolare acustica, stabilitatea variatiei rezistentei sarcinii si functionarii generatorului electronic de ultrasunete [1, 24, 36, 98].

Materialele destinate constructiei blocului ultrasonic trebuie sa aibe o buna elasticitate, decrement scazut de amortizare si o mare rezistenta la oboseala [28].

Materialele utilizate in constructia concentratorilor si amplificatorilor sunt [1, 24, 98]: aliaje de titan, duraluminiu, oteluri carbon, oteluri aliate, oteluri de scule.

2.2 ELEMENTE INITIALE DE CALCUL SI PROIECTARE

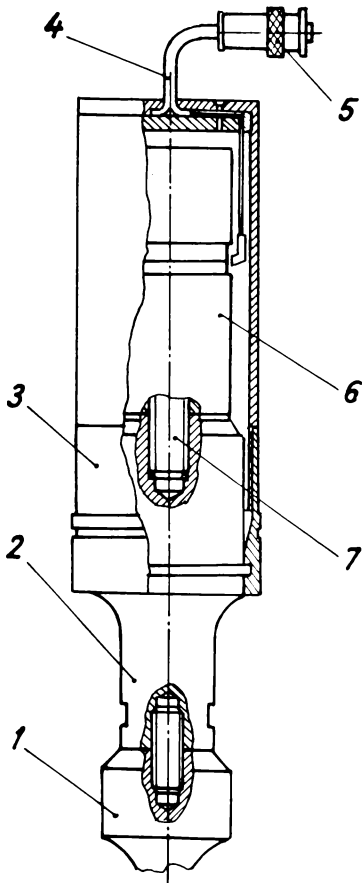
La baza conceperii si realizarii noului aparat vibrator T2 a stat ideea folosirii transductoarelor cu cristale piezoceramice si obtinerii unor parametri tehnico-functionali cu nivel cuprins in intervalul parametrilor statiunilor, de acest fel, existente in lume la ora actuala (vezi tab.3, Cap.1). De asemenea, s-a avut in vedere utilizarea probelor cu dimensiuni si forma geometrica identice cu ale celor testate in aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1.

Datele si conditiile care au stat la baza calcului, proiectarii si alegerii elementelor de baza sunt:

- 1.- puterea electrica de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete:
 $P_{el} = \max 500 \text{ W}$,
 2. - frecventa vibratiilor: $f = 20 \pm 0,3\% \text{ KHz}$ [120],
 3. - amplitudinea vibratiilor: $A = 24 \div 51 \mu\text{m}$,(tab. 1.3, Cap.1) [33, 106],
 4. - capacitatea vasului pentru lichidul de lucru: $V_{vas} = 800 \div 1200 \text{ ml}$ [120],
 5. - durata maxima a unei perioade de testare: $\Delta t = 15 \text{ min}$ [42, 44, 54, 120],
 6. - mentinerea constanta a temperaturii lichidului de lucru, pe toata durata incercarilor.
 7. - usurinta si rapiditate in montarea si demontarea probelor,
 8. - posibilitatea de reglare a frecventei de rezonanta,
 9. - mentinerea constanta a parametrilor tehnico- functionali: A, f, P_{el} .
 10. - posibilitatea modificarii amplitudinii vibratiilor, cu mentinerea constanta a frecventei oscilatiilor,
 11. - reducerea la maxim a timpilor morti (introducerea si scoaterea probelor din vasul cu lichid),
 12. - izolare fonica fata de mediul exterior.
- Dimensiunile ce definesc gabaritul si rigidizarea aparatului s-au stabilit constructiv.

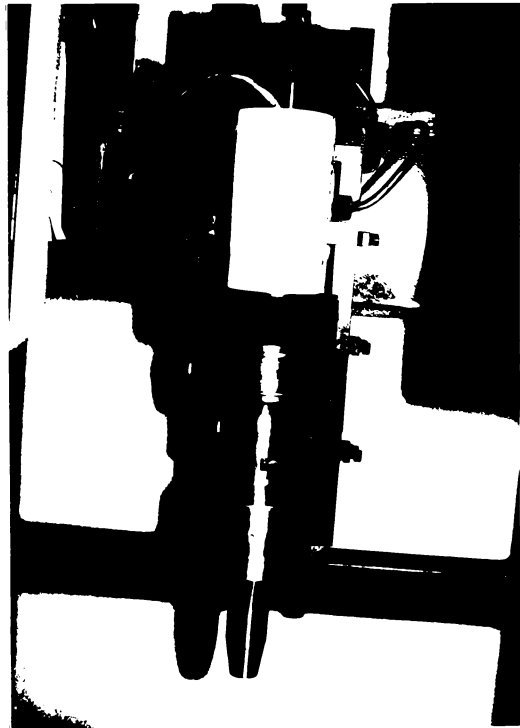
2.3 PROIECTAREA SI REALIZAREA BLOCULUI ULTRASONIC

Blocul ultrasonic, fig. 2.1, este unul din elementele de baza ale aparatului vibrator, care, la rezonanta, in conditii de eficienta maxima, asigura transformarea energiei electrice in energie acustica. Este compus din transductorul piezoceramic si concentratorul-amplificator de energie acustica.



1. amplificator; 2. concentrator; 3. capac
protectie; 4. cablu electric; 5. mufa BNC;
6. transductor TGUS 500/20; 7. prezon M12

a) schita



b) fotografie

Fig. 2.1 Blocul ultrasonic

2.3.1 Alegerea transductorului piezoceramic

Transductorul piezoceramic este un sistem oscilant ce face parte din categoria transductoarelor electromecanice si care, pe baza efectului piezoelectric, converteste energia electrica in energie mecanica. Efectul piezoelectric a fost pus in evidenta de fratii Curie in anul 1880 [1,5, 24, 98] si consta in deformarea mecanica (dilatata sau comprimare) a unui corp cu proprietati piezoelectrice (cum sunt cristalele piezoceramice), sub actiunea unui camp electric alternativ.

Transductorul folosit in aparatul vibrator T2 este de constructie romaneasca, fabricat la "Institutul de Mecanica Solidelor Bucuresti" sub codul TGUS 500/20, fig.2.2a,b si este de tipul piezoceramic compus cu doua elemente pasive diferite, polarizate mecanic. Alegerea sa s-a facut pe baza tipului de material folosit in constructia cristalului si urmatorilor doi parametrii: puterea electrica maxima de alimentare ($P_{el} = 500 \text{ W}$) si frecventa de vibratie ($f = 20 \pm 2 \text{ KHz}$). Pe langa cei doi parametrii mai prezinta urmatoarele caracteristici tehnice:

- amplitudinea vibratiilor la suprafata libera a elementului radiant: $A \cong 17 \mu\text{m}$,
- diametrele elementelor radiant si reflector: $D = 52 \text{ mm}$,
- inaltimea elementului reflector: $d_1 = 40 \text{ mm}$,
- inaltimea elementului radiant: $d_2 = 60 \text{ mm}$,
- grosimea cristalelor piezoceramice: $2 d = 10 \text{ mm}$.
- tensionarea mecanica se realizeaza cu un prezon M16.

Elementul reflector este realizat din otel, iar elementul radiant din duraluminiu.

Materialul cristalului piezoceramic este de tipul titano-zirconatilor de plumb PZT [98], denumit in unele literaturi PTZ [1]. Optiunea pentru acest tip de material este legata de valorile superioare ale factorului de cuplaj electromecanic k_p , in raport cu ale celorlalte materiale, tab. 2.1, [98] si constantei frecventei de vibratie. Acesti doi factori sunt cei mai importanti dintre toti factorii ce caracterizeaza calitatea unui cristal [1, 24], si prezinta constanta pana la temperaturi de $100 \div 150 \text{ C}$, fig.2.3 a,b [1]

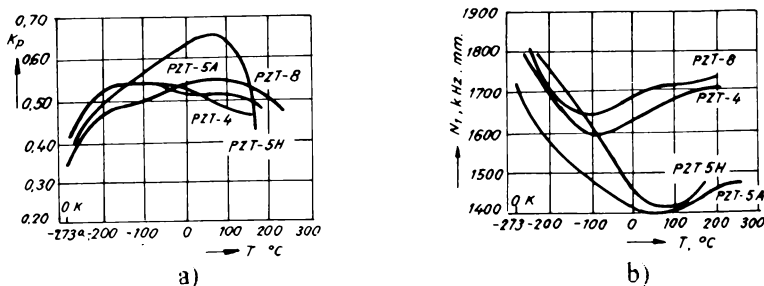
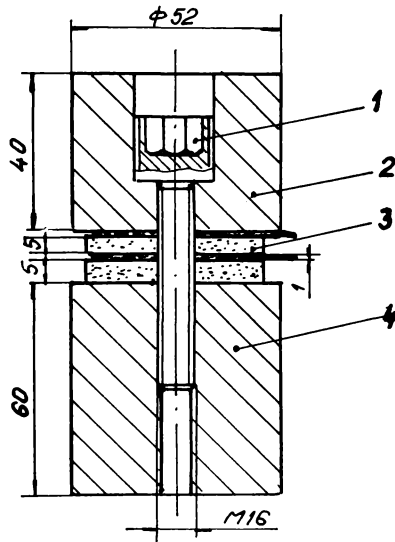


Fig. 2.3 Variatia constantelor caracteristice materialelor piezoceramice cu temperatura:
a) - factorul de cuplaj electromecanic
b) - constanta de frecventa



a)

- 1 - șurubul pentru tensionare mecanică
- 2 - elementul reflector
- 3 - cristale piezoceramice (PZT)
- 4 - elementul radiant



b)

a) schita

b) fotografie

Fig 2.2 Transductorul piezoceramic
TGUS 500/20

Tab2.1 Tipuri de cristale piezoelectrice

Nr. crt.	Materialul	Temperat. Curie(°K)	Densitatea ρ (10^3 Kg/m^3)	Modulul lui Young μ (10^{10} N/m^2)	Permitivitatea electrică ϵ (10^{-12} F/m)	Modulul piezoelectric k (10^{-12} C/N)	Factorul de cuplaj electro-mecanic $k_D\%$
1	Cuart (taietura x)	843	2,65	8,6	45	2,2	0,10
2	Sare Rochelle (taietura 45°x)	327	1,77	1,49	4440	435,0	0,78
3	Titanat de bariu	393	5,50	11,80	12,500	190,0	0,4
4	Niobat de plumb	523	6,00	2,90	2400	90,0	0,31
5	PTZ 1	548	-	7,50	5200	180,0	0,43
6	PTZ 3	453	-	8,00	10090	400,0	0,43
7	PTZ 4	601	7,5	8,10	8750	235,0	0,63
8	PTZ 5	638	7,7	8,70	12000	320,0	0,70
9	PTZ 21	683	-	9,00	10180	67,0	0,20
10	PTZ 23	558	-	0,75	20300	200,0	0,43

Marele dezavantaj al acestui transductor îl constituie fragilitatea ridicată a cristallului și capacitatea scăzută de înmagazinare a energiei [1, 24]. De altfel, aceste dezavantaje sunt caracteristice tuturor cristalelor. Din acest motiv funcționarea în aer este de scurtă durată. Pentru transductorul piezoceramic TGUS 500/20 durată maximă de funcționare în aer, determinată pe mașinile de sudat ultrasonic la "S.C. Electotimis S.A", este de 20 secunde. Experiențele realizate pe aparatul vibrator piezoceramic T2 au arătat că durată de funcționare în mediu lichid crește enorm datorită descărcării energiei din cristale prin sistemul concentrator- amplificator- proba- mediu lichid, și depinde de fiabilitatea componentelor electronice din generatorul electronic de ultrasunete. Un alt dezavantaj al acestor transductoare îl constituie pierderea fiabilității prin îmbătrânire naturală [1,4, 24, 98], motiv pentru care după 14 - 16 luni de funcționare se impune înlocuirea.

2.3.2 Calculul și realizarea concentratorului - amplificator de energie acustică

Concentratorul - amplificator are rolul de a transmite, amplifica și concentra energia acustică la suprafața probei, supusă distrugerii prin eroziune cavitațională.

Concentratorul, fig. 2.4, face legătura între transductorul piezoceramic și amplificator, iar amplificatorul, fig. 2.5 a,b, leagă blocul ultrasonic de probă. Atât concentratorul cât și amplificatorul asigură concentrarea și amplificarea energiei acustice, respectiv amplitudinii vibrațiilor. Cele două piese pot constitui și o singură componentă, așa cum este la aparatul vibrator de la Universitatea din Michigan [33]. S-a

preferat aceasta solutie cu scopul oferirii posibilitatii de realizare a mai multor grade de amplificare prin schimbarea partii finale a sistemului concentrator amplificator. In literatura, pentru cele doua componente se va intalni si denumirea de transformator acustic [1]

S-a convenit a se denumi concentrator prima piesa care asigura dirijarea si amplificare unidirectionala a energiei acustice dezvoltate de transductor.

Realizarea celor doua componente se poate face din materiale identice sau distincte [1,24, 28, 98]. Principalele materiale, recomandate de literatura [1], pentru fabricarea concentratorului si amplificatorului acustic sunt prezentate in tab. 2.2

Tab.2.2 Proprietatile fizice ale materialelor utilizate in constructia transformatoarelor acustice si elementelor reflector si radiant ale transductorului[1]

Mărimea	Unitatea	Material					
		Otel de șucle	Bronz cu Al	Alamă	Aliaj de titan (1)	Duraluminu (2)	Aliaj de Mg(3)
ρ	10^3 kg/m^3	7,85	8,50	8,37	4,42	2,79	1,74
v_{long}	m/s	5250	4070	3320	4900	5130	4800
Z	$10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$	41,2	34,6	27,8	21,7	14,3	8,35
γ	10^{-12} m/N	4,6	7,0	10,8	9,4	13,5	23,8
σ		0,29	-	0,35	0,36	0,34	0,28
T_1	10^6 Pa	550	370	150	720	190	123
S_1	10^{-3}	2,52	2,59	1,69	6,80	2,57	2,93
E	10^{11} Pa	2,1					
(1)		90% Ti, 6% Al, 4% V					
(2)		tip BS L 65					
(3)		93% Mg, 6% Al, 1% Zn					

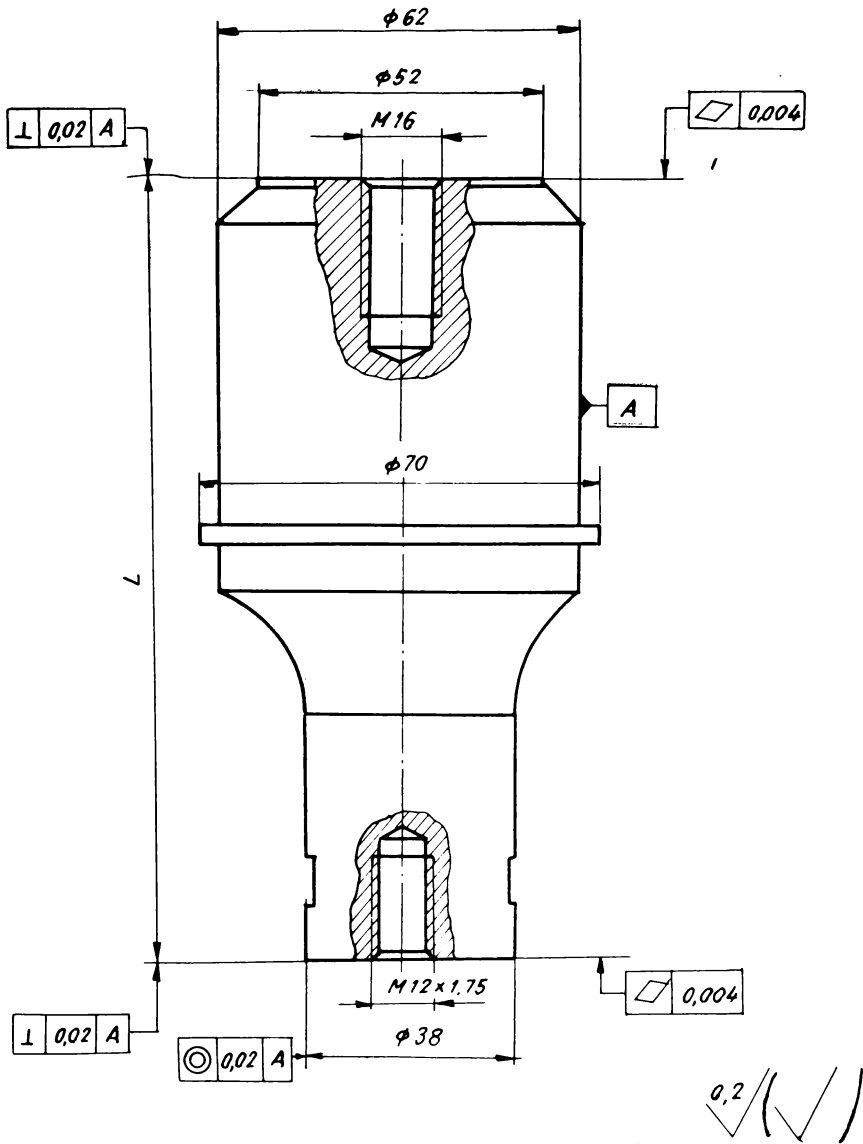
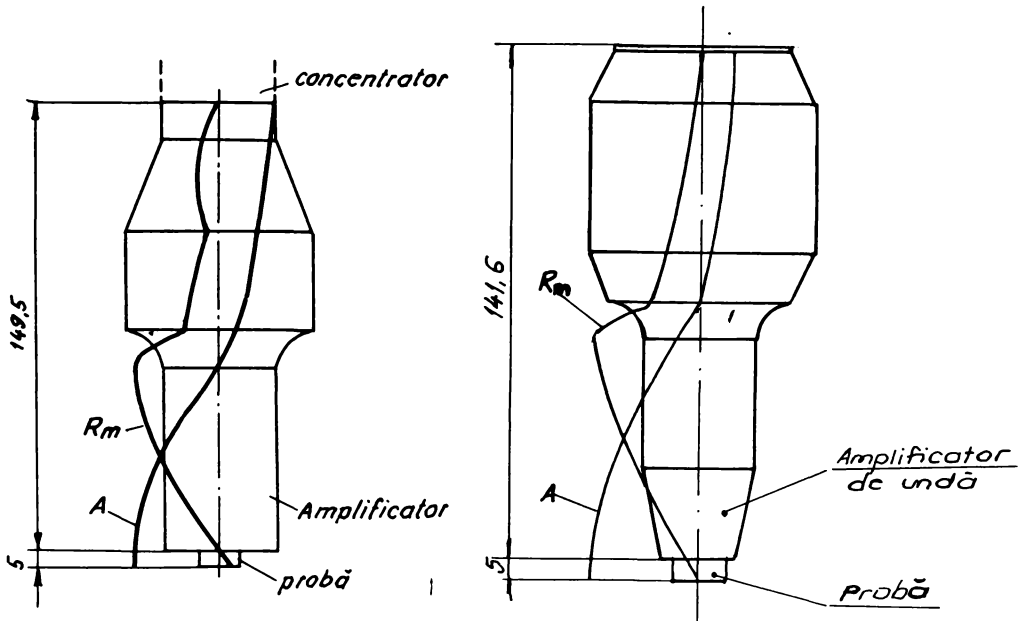
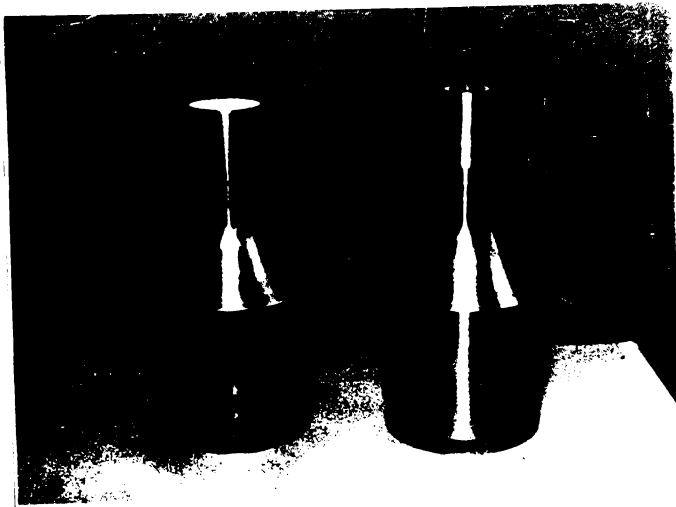


Fig.2.4 Concentratorul acustic



a)



b)

Fig.2.5 Amplificatorul acustic
a) schita; b) fotografie

a) - Parametrii principali

Principalii parametri ce caracterizeaza transformatorul acustic (concentratorul-amplificator) sunt [1, 4, 24, 36, 98]:

1. - factorul de multiplicare N respectiv N_r ,
2. - lungimea transformatorului L ,
3. - profilul transformatorului (legea de variatie a sectiunii transversale):
exponential, conic, catenoidal, cilindric in trepte, etc.
4. - pozitia punctului nodal X_{nod} .

In tab 2.3 sunt prezentate cele mai uzuale tipuri de transformatoare acustice si relatiile de calcul al parametrilor principali [1, 98].

Dintre cei patru parametri, profilul transformatorului se impune de proiectant, in functie de posibilitatile tehnologice de executie, iar ceilalti trei se calculeaza. Pentru aparatele vibratorii, utilizate in distrugerea materialelor prin eroziune cavitationala, parametrul cel mai important il constituie factorul de amplificare N_r , datorita influentei pe care o are asupra intensitatii distructive.

Experientele realizate pe mai multe tipuri de concentratoare [1], arata ca cu cresterea factorului de amplificare N_r si dimensiunilor liniare cresc amplitudinile vibratiilor torsionale A_θ si radiale A_r , fig. 2.6, disipandu-se o buna parte din energia acustica. Exceptie de la acest fenomen face cazul in care dimensiunile liniare ale celei mai mari sectiuni depaseste jumatate din lungimea de unda [1]. Evitarea acestui fenomen

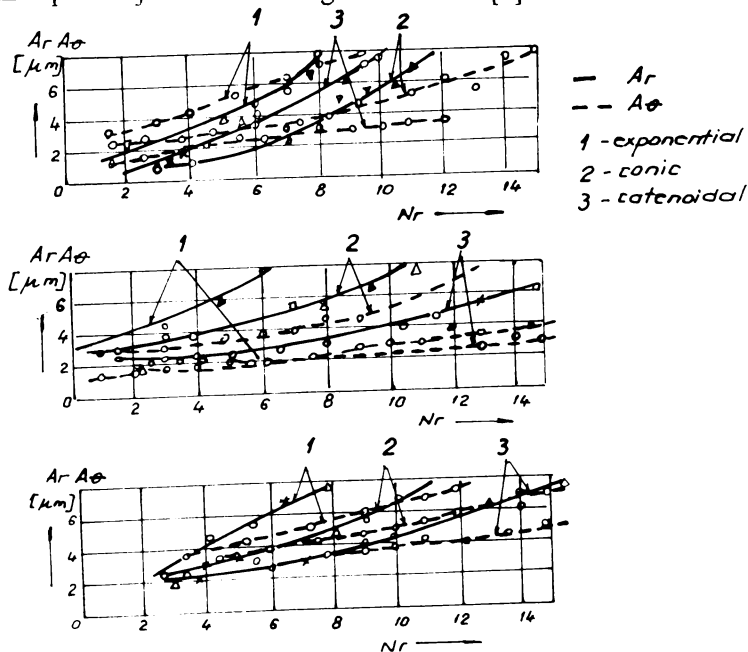
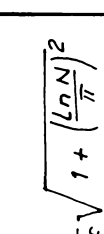

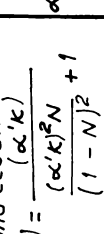
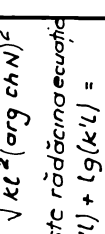
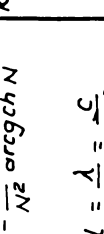


Fig 2.6 Influenta factorului de amplificare N_r asupra amplitudinii vibratiilor torsionale A_θ si radiale A_r [1]

Tab 2.3 Tipuri de transformatoare acustice (concentratoare si amplificatoare) [1, 98]

Nr crt	Tipul amplificatorului (concentratorului)	Legea de variatie a sectiunii	Factorul teoretic de amplificarea a amplitudinii	Lungimea amplificatorului	Coordonatele punctului nodal
1	 <p>Exponential</p>	$D_x = D_0 e^{\frac{\alpha}{2} x}$ $\alpha = \frac{\omega}{c} \frac{\ln N}{\sqrt{\pi + (\ln N)^2}}$	$N = \frac{D_0}{D_f}$ $N_r = \frac{D_0}{D_f} = N$	$l = \frac{c}{2f} \sqrt{1 + \left(\frac{\ln N}{\pi}\right)^2}$	$X_{nod} = \frac{c}{2f} \operatorname{arctg} \frac{\ln N}{\pi}$
2	 <p>Conic</p>	$D_x = D_0 (1 - \alpha x)$ $\alpha = \frac{D_0 - D_f}{D_0 L}$	$N_r = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi L}{\lambda}\right)^2}$ $N_r < N$	$l = \frac{\lambda}{2} \left(\frac{\alpha' k}{\pi}\right) \text{ unde } (\alpha' k) \text{ este r\ddot{a}d\ddot{a}cina ecuatiei } \operatorname{tg}(\alpha' k) = \frac{(\alpha' k)^2 N}{(1-N)^2 + 1}$	$X_{nod} = \frac{c}{2f} \operatorname{arctg} \left(\frac{\alpha'}{\alpha}\right)$ $\alpha = \frac{\omega}{c} \quad \alpha' = \frac{\omega'}{c}$
3	 <p>Catenoidal</p>	$D_x = D_0 \operatorname{ch} \beta (L - x)$ $\beta = \frac{1}{L} \operatorname{argch} N$	$N_r = \frac{N}{\cos(kL)}$ $N_r > N$	$l = \frac{c}{2f} \sqrt{kl^2 (\operatorname{argch} N)^2}$ <p>(k'l) este r\ddot{a}d\ddot{a}cina ecuatiei (k'l) + \lg(k'l) = \sqrt{1 - \frac{1}{N^2} \operatorname{argch} N} </p>	$X_{nod} = \frac{c}{2f} \operatorname{arctg} \frac{k}{r}$ $k = \sqrt{\alpha'^2 r^2}$
4	 <p>Cilindric in trepte</p>	$D_x = D_0 \text{ pt } 0 \leq x \leq \frac{L}{2}$ $D_x = D_f \text{ pt } \frac{L}{2} \leq x \leq L$	$N_r = \left(\frac{D_0}{D_f}\right)^2 = N^2$	$l = \frac{\lambda}{2} = \frac{c}{2f}$	$X_{nod} = \frac{L}{2} = \frac{c}{4f}$
5	 <p>Cilindric in trepte cu racordare exponentiala</p>	$D_x = D_0 l^{-\frac{\alpha}{4} x}$ $\alpha = \frac{\omega}{c}$	$N_r = \sqrt{1 + 4 \ln N}$	$l = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{2\sqrt{\ln N}}{\pi} + \frac{1}{2} + \frac{\operatorname{arctg} \left[2\sqrt{\ln N} \right]}{\pi} \right]$	$X_{nod} = \frac{c}{2f} \operatorname{arctg} \frac{2 \ln N}{\pi}$

se realizeaza prin limitarea factorului de amplificare la $Nr < 4$ si introducerea conditiei de rezistenta mecanica in dimensionarea transformatorului [1; 28].

In calculul de dimensionare al sistemului concentrator- amplificator, ce intra in componenta blocului ultrasonic al aparatului vibrator T2, s-a tinut cont de aceste recomandari, datorita rolului important pe care il are energia acustica in capacitatea distructiva a aparatului [40a] si faptul ca vibratiile radiale si torsionale duc la ruperea aderentei norului de bule cavitationale pe suprafata probei (conditie esentiala pentru producerea distrugerii materialului).

b) - Calculul de dimensionare al concentratorului si amplificatorului de energie acustica

Calculul de dimensionare al concentratorului si amplificatorului este realizat pe baza unui program scris in "TURBO- PASCAL", prezentat in ANEXA. Programul de calcul conceput permite realizarea a patru tipuri de concentratori - amplificatori (cilindric, conic, exponential si cu raza de racordare) si combinatii intre acestea, precum si afisarea grafica a formelor geometrice cu variatia amplitudinii A si rezistentei mecanice la rupere R_m in lungul axei transformatorului acustic. In ANEXA este prezentata si schema dupa care s-a realizat programul de calcul.

La baza conceperii programului de calcul sta ecuatia lui Webster [28, 31], de propagare a undelor acustice in bare elastice, care cuprinde conditia de rezistenta mecanica la rupere:

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{dS(x)}{dx} \frac{\partial \xi}{\partial x} + k^2 \xi = 0 \quad (2.1)$$

unde:

$\xi(x)$ - deplasarea elementului de masa (amplitudinea vibratiei $A(x)$),

$S(x)$ - sectiunea transversala a barei,

$k = \frac{2\pi f}{c}$ - numarul de unda

f - frecventa de oscilatie,

c - viteza de propagare a unei acustice prin materialul respectiv.

Rezolvarea ecuatiei este realizata prin metoda aproximatiilor finite. In acest sens lungimea concentratorului (respectiv amplificatorului), s-a discretizat in elemente de lungime Δx .

Pentru elementul x_n ecuatiea (2.1) devine:

$$\xi''(x_n) + F(x_n) \xi'(x_n) + K^2 \xi(x_n) = 0 \quad (2.2)$$

unde

$$F(x_n) = \frac{1}{S(x)} \frac{dS(x)}{dx} \quad (2.3)$$

Derivatele de ordinul 1 si 2 ale functiei $\xi(x_n)$ pot fi puse sub forma :

$$\xi'(x_n) = \frac{1}{\Delta x} \left[\xi(x_{n+1}) - \xi(x_n) \right] \quad (2.4)$$

$$\xi''(x_n) = \frac{1}{\Delta^2 x} \left[\xi(x_{n+2}) - 2\xi(x_{n+1}) + \xi(x_n) \right] \quad (2.5)$$

Prin inlocuiri succesive se obtine:

$$\xi(x_{n+2}) = \left[2 - \Delta x \cdot F(x_n) \right] \xi(x_{n+1}) - \left[1 - \Delta x \cdot F(x_n) + \Delta^2 x \cdot K^2 \right] \cdot \xi(x_n) \quad (2.6)$$

Pentru $n=0$ se obtine:

$$\xi(x_2) = \left[2 - \Delta x \cdot F(x_0) \right] \xi(x_1) - \left[1 - \Delta x \cdot F(x_0) + \Delta^2 x \cdot K^2 \right] \xi(x_0) \quad (2.7)$$

respectiv

$$\xi(x_1) = \xi(x_0) + \Delta x \cdot \xi'(x_0) \quad (2.8)$$

Necunoscutele din aceste ecuatii sunt $\xi(x_2)$ si $\xi(x_1)$, iar marimile $\xi(x_0)$ si $\xi'(x_0)$ sunt determinate din conditiile initiale.

Metoda se bazeaza pe calculul, punct cu punct, al functiilor $\xi(x_n)$ si $\xi'(x_n)$ pornind de la ecuatii (2.7) si (2.8) cu ajutorul relatiei iterative (2.6).

Parametrii de initializare a programului de calcul sunt:

- frecventa de rezonanta
- viteza de propagare a sunetului in material
- profilul pe baza caruia se calculeaza functia de variatie a sectiunii $F(x_n)$: cilindric, conic, exponential, racordare cu o raza.
- amplitudinea de excitatie $\xi(x_0)$ (respectiv $A(x_0)$)
- tensiunea mecanica $\xi'(x_0)$ (respectiv $R_m(x_0)$)

Programul conceput, pe baza datelor de iterare, calculeaza $\xi(x_1)$ cu relatia (2.8) si $\xi(x_2)$ cu relatia (2.7) si apoi iterativ cu relatia (2.6).

In punctul in care se doreste schimbarea profilului (exista comanda in program) se conserva amplitudinea vibratiilor si forta in punctul respectiv, ele constituind

conditii initiale pentru noul tronson.

Lungimea de rezonanta a concentratorului (amplificatorului) este data de cea la care se obtine valoare maxima pentru amplitudinea vibratiilor si nula pentru tensiunea mecanica.

c) Calculul factorului teoretic de amplificare a amplitudinii

Calculul amplificarii concentratorului se realizeaza pe considerentul definirii sale de trei tipuri de profile, fig.2.4:

- un cilindru de diametru $D_1 = 62$ mm,
- o racordare exponentiala de la $D_1 = 62$ mm la $D_2 = 38$ mm,
- un cilindru de diametru $D_2 = 38$ mm

Factorul teoretic de amplificare este definit de relatia corespunzatoare concentratorului cilindric in trepte, cu racordare, din Tab. 2.3 (cazul 5):

$$N_{r_1} = \sqrt{1 + \ln \frac{D_1}{D_2}} \quad (2.9)$$

Pentru $D_1 = 62$ mm si $D_2 = 38$ mm obtinem:

$$N_{r_1} = \sqrt{1 + \ln \frac{62}{38}} = 1,22 \quad (2.10)$$

Pentru realizarea acestei amplificari este necesara o lungime, a concentratorului, data de relatia (Tab. 2.3, cazul 5):

$$L_1 = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{2\sqrt{\ln N}}{\pi} + \frac{1}{2} + \frac{\arccos \lg(2\sqrt{\ln N})}{\pi} \right] \quad (2.11)$$

unde lungimea de unda λ , este:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2.12)$$

Pentru $c = 5130$ m/s (viteza de propagare a unei unde plane in duraluminiu, Tab.2.2) si $f = 20000$ Hz se obtine:

$$\lambda = 256,5 \text{ mm} \quad \text{si} \quad L_1 = 121,3 \text{ mm} < L_1 \text{ real} = 123 \text{ mm} \quad (2.13)$$

Calculul amplificării realizate de amplificator se face pe considerentul compunerii sale din doi cilindri și un con, fig. 2.5. Racordarea este făcută prin profil exponential. Dimensiunile de calcul ale cilindrilor sunt:

- cilindru de legatură cu concentratorul are diametru: $D_3 = 62$ mm,
- cilindru de treaptă mai mică are diametru: $D_4 = 30$ mm,
- conul are dimensiunile:
 - diametru mare: $D_4 = 30$ mm,
 - diametru mic, pe care se fixează proba supusă testului de eroziune cavitațională: $D_5 = 20$ mm,
 - lungimea conului: $L_3 = 32$ mm.

Factorul teoretic de amplificare, în acest caz, este produsul dintre:

- a) - factorul teoretic realizat de amplificatorul cilindric în trepte, de la $D_3 = 62$ mm la $D_4 = 30$ mm, prin relația (Tab. 2.3, cazul 5):

$$N_{r2} = \sqrt{1 + \ln \frac{D_3}{D_4}} = 1,314 \quad (2.14)$$

Lungimea necesară obținerii acestei amplificări este (Tab. 2.3, cazul 5):

$$L_2 = \frac{\lambda}{2} \left[\frac{2\sqrt{\ln N}}{\pi} + \frac{1}{2} + \frac{\arccos(2\sqrt{\ln N})}{\pi} \right] = 134,4 \text{ mm} \quad (2.15)$$

$$L = 134,4 \text{ mm} < L_{\text{real}} = 135,5$$

- b) - factorul teoretic de amplificare realizat de amplificatorul conic, definit de relația (Tab. 2.3, cazul 2):

$$N_{r3} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi L_3}{\lambda}\right)^2} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi L_3}{c/f}\right)^2} \quad (2.16)$$

Pentru $c = 5130$ m/s, $f = 20000$ Hz și $L_3 = 32$ mm (realizată practic) se obține:

$$N_{r3} = 1,271 \quad (2.17)$$

Factorul teoretic de amplificare realizat de amplificator este:

$$N_{r4} = N_{r2} \cdot N_{r3} = 1,314 \cdot 1,271 = 1,67 \quad (2.18)$$

De amplificator este fixată proba, de diametru $D_6 = 14$ mm.

Intre amplificator si proba se realizeaza inca o treapta de amplificare de tip cilindric, fig.2.5. Factorul teoretic de amplificare realizat de aceasta treapta este (Tab.2.3, cazul 4):

$$N_{r5} = \left(\frac{D_5}{D_6} \right)^2 = \left(\frac{20}{14} \right)^2 = 2,041 \quad (2.19)$$

Pentru obtinerea acestei amplificarieste necesara o lungime (Tab.2.3, cazul 4):

$$L_5 = \frac{c}{f} = 256,5 \text{ mm} \quad (2.20)$$

Realizarea acestei amplificari, in realitate, nu este posibila datorita lungimii foarte mici a treptei cilindrice formata de proba ($L = 5 \text{ mm} \ll L / 2$). Din aceasta cauza amplificarea realizata de aceasta treapta nu se ia in calcul.

Factorul teoretic de amplificare realizat de etajul "concentrator - amplificator - proba" este:

$$N_r = N_{r1} \cdot N_{r4} = 1,22 \cdot 1,67 = 2,04 \quad (2.21)$$

Din caracteristicile tehnice ale transductorului piezoceramic TGUS 500/20 rezulta ca amplitudinea la capatul elementului radiant, de care se fixeaza concentratorul, este $A \cong 17 \mu\text{m}$.

Deci, teoretic, amplitudinea la suprafata de atac a probei are valoarea:

$$A \cong 17 \cdot 2,04 = 34,68 \mu\text{m} \quad (2.22)$$

d) Probleme privind fabricarea concentratoarelor si amplificatoarelor acustice

Problemele ivite in timpul fabricarii concentratorului si amplificatorului, racordarii lor la frecventa de rezonanta si functionarii blocului ultrasonic in timpul probelor de reglare si anduranta, au dus la concluziile prezentate mai jos; unele fiind descrise si in literatura [1, 5, 24, 28, 36, 98].

De materialul folosit in fabricarea concentratorului - amplificator depinde canti-

tatea de energie acustica transmisa spre suprafata activa a probei. Din acest motiv, inainte de inceperea prelucrarii, semifabricatul, din care se prelucreaza concentratorul (respectiv amplificatorul), trebuie supus testelor de verificare a omogenitatii structurale si detectare a defectelor de tip fisuri, retasuri, etc. Aceste verificari elimina problemele ce pot apare in timpul functionarii: scaderea amplitudinii vibratiilor, instabilitatea frecventei de rezonanta, randament electro-acustic scazut, cresterea duratei de atac cavitional pentru distrugerea materialului cu mult peste timpul minim acceptat la aparatele vibratorii (minim 5 min. [33, 75, 120, 128]), si chiar fisurarea piesei in timpul functionarii aparatului. Indiferent de marca, materialul ales pentru fabricarea concentratorului sau transformatorului trebuie sa provina din semifabricat laminat, datorita omogenitatii structurale mai ridicate fata de a celui turnat.

Fata de lungimea de rezonanta obtinuta prin calcul se lasa un adaos de prelucrare de 5 - 8 mm, care se indeparteaza la racoradarea transformatorului pe frecventa de rezonanta. Practica a dovedit necesitatea acestui adaos de prelucrare datorita urmatoarelor impedimente;

1. - relatiile teoretice stabilite de Webster [28,31] nu permit determinare perfecta a dimensiunilor de rezonanta, deoarece nu tin cont de structura interna a materialului.

2. - viteza sunetului in material determinata experimental prezinta diferente fata de cea reala.

Suprafetele de imbinare: transductor-concentrator, concentrator - amplificator si amplificator - proba trebuie lustruite si stranse cat mai bine pentru obtinerea unui contact perfect pe toata suprafata de imbinare. Daca aceasta conditie nu este satisfacuta sistemul nu vibreaza datorita stratului de aer ce se interpune intre suprafetele aflate in contact. Abaterile de la forma data a suprafetei si de pozitie trebuie sa fie stranse (clasele VII-VIII) si riguros respectate. Prin aceste conditii se elimina riscul aparitiei vibratiilor torsionale si radiale, deci a ruperii aderenței norului de bule cavitationale de suprafata probei. De asemenea, practica a dovedit ca pentru rugozitati mai mari de $Ra = 6,5\mu m$, ale suprafetelor cilindrice exterioare, si pentru filetele cu fund nerontujit creste pericolul fisurarii transformatorului acustic [1].

OBS. Materialele utilizate de autor in executia concentratorului si amplificatorului provin din bara rotunda de duraluminiu tip BS L65. Racordarea pe frecventa de rezonanta s-a facut cu ajutorul a doua instrumente:

- un versatester tip E0502,
- un osciloscop tip C8 -17, de productie ruseasca

2.4 DIMENSIONAREA SI REALIZAREA VASULUI PENTRU LICHIDUL DE LUCRU

Vasul pentru lichid de lucru are rolul de a mentine, pe tot parcursul incercarilor, aceeași cantitate de lichid, la temperatura constantă $t = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Vasul conceput și realizat este de forma cilindrică, confecționat dintr-un tub de plexiglas cu dimensiunile $\varnothing 126 / \varnothing 120$ mm.

Mentineră temperaturii lichidului la valoarea $t = 20 \pm 1^{\circ}\text{C}$ este asigurată printr-o serpentina de cupru, de diametru nominal $D_n = 4$ mm și diametru exterior $D_e = 6$ mm, racordată, printr-un ventil și furtun de cauciuc, la rețeaua de apă potabilă. În interiorul vasului se află o palnie din sticlă ce are rolul de a capta undele sonice de presiune și a le dirija spre tubul piezometric de urmărirea amplitudinii vibrațiilor.

Dimensiunile vasului, fig.2.7 sunt determinate de condițiile funcționale impuse de normele americane ASTM [120]:

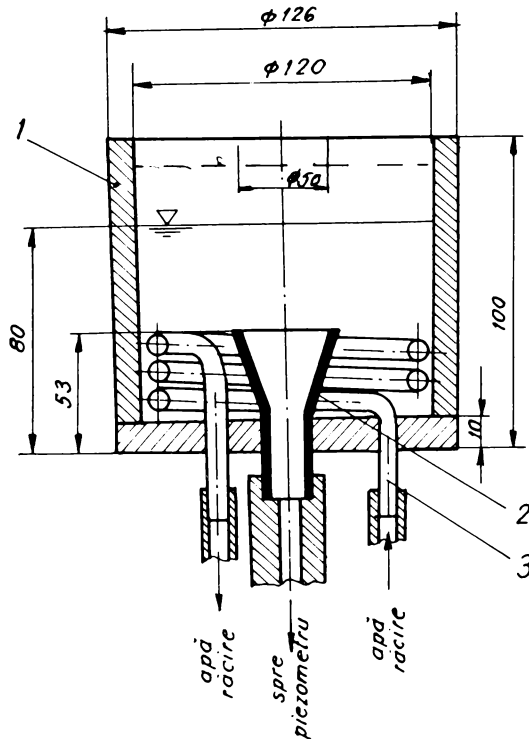


Fig. 2.7 Vasul pentru lichidul de lucru
1-vas; 2- palnie; 3- serpentina de racire

- capacitatea vasului: 800 ÷ 1200 ml,
- volumul ocupat de lichid in vas: 600 ÷ 900 ml.

Capacitatea vasului realizat este:

$$V_{\text{vas}} = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} \cdot 90 \cdot 10^{-3} = 1017,876 \text{ ml} \quad (2.23)$$

Volumul ocupat de lichid este:

$$V_{l1} = V_1 - V_c - V_p \quad (2.24)$$

unde:

- V_{l1} - volumul ocupat de lichid, in ml,
- V_1 - volumul ocupat de lichid in prezenta serpentinei de cupru, in ml,
- V_c - volumul ocupat de serpentina de cupru, in ml,
- V_p - volumul ocupat de palnia de captare a undelor sonice, in ml.

Volumul ocupat de lichid in prezenta conductei de cupru si palniei de captare a undelor sonice este:

$$V_1 = \frac{\pi \cdot 120^2}{4} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 791,68135 \text{ ml} \quad (2.25)$$

Diferenta de 20 mm intre suprafata libera a lichidului si planul superior al vasului este necesara evitarii aruncarii lichidului in afara vasului in timpul atacului cavitional. De altfel, partea superioara a vasului este prevazuta cu un capac cu gaura centrala de $\varnothing 50$, fig. 2.7, prin care trece amplificatorul si proba. Rolul sau este de a bloca aruncarea stropilor de apa in afara vasului, ca urmare a aderenței fluidului pe suprafata cilindrica a probei.

Lungimea conductei de cupru, din interiorul vasului, este $L = 1190$ mm. Cu aceasta lungime s-au realizat trei spire. Volumul ocupat de aceasta conducta este:

$$V = \frac{\pi \cdot 6^2}{4} \cdot 1190 \cdot 10^{-3} = 33,646457 \text{ mm} \quad (2.26)$$

Dimensiunile palniei, aflata in interiorul vasului, sunt prezentate pe schita din fig. 2.8. Volumul ocupat de palnie este:

$$V = V_{c1} - V_{c2} + V_{c11} \quad (2.27)$$

unde:

$$V_{c1} = \frac{\tilde{\pi} \cdot 140}{12} (55^2 + 12^2 + 12 \cdot 55) \cdot 10^{-3} = 40,097194 \text{ ml} \quad (2.28)$$

$$V_{c2} = \frac{\tilde{\pi} \cdot 40}{12} (53^2 + 6^2 + 6 \cdot 53) \cdot 10^{-3} = 33,122859 \text{ ml} \quad (2.29)$$

$$V_{cil} = \frac{\tilde{\pi}}{4} (12^2 - 6^2) \cdot 3 \cdot 10^{-3} = 0,254469 \text{ ml} \quad (2.30)$$

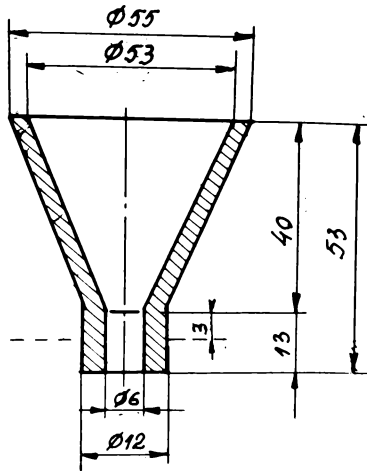


Fig. 2.8 Palnia de captare a undelor sonice de presiune

Deci, volumul ocupat de palnie este:

$$V_p = 6,719866 \text{ ml} \quad (2.31)$$

Volumul ocupat de lichid in vas este:

$$V_{l1} = 751,31503 \text{ ml} \quad (2.32)$$

Prin urmare volumul ocupat de lichid in vas se incadreaza in normele ASTM [120].

2.5 STABILIREA FORMEI SI DIMENSIUNILOR PROBEI DE INCERCARE

Probele supuse atacului cavitional in aparatul vibrator T2 au aceeași forma geometrică și dimensiuni cu cele utilizate la aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T2, fig. 2.9

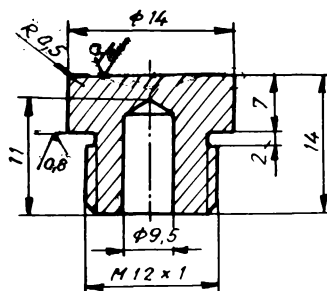


Fig. 2.9 Proba pentru eroziune
cavitională

Pentru evitarea fisurării probei în timpul atacului cavitional filetul este cu varful și fundul ușor rotunjite. Pentru obținerea unui contact perfect între suprafețele frontale, ale probei și amplificatorului acustic, este obligatorie realizarea rugozității de $0,8 \mu\text{m}$. De acest contact depinde valoarea parametrilor funcționali (A , f) și eficiența transmiterii energiei acustice la suprafața de atac a probei.

Testele preliminare au arătat că pentru obținerea unei frecvențe de vibrație $f = 20 \pm 0,2 \text{ kHz}$ și amplitudini $A = 32 \mu\text{m}$, masa probelor trebuie să fie $m = 6,1; 7,8 \text{ g}$. Această condiție este realizabilă prin modificarea lungimii $L = 14 \text{ mm}$, respectiv a cotei de 7 mm.

2.6 STABILIREA SCHEMEI DE FUNCTIONARE A GENERATORULUI ELECTRONIC DE ULTRASUNETE

Generatorul electronic de inalta frecventa are rolul de a transforma curentul electric de frecventa industrială in curent de inalta frecventa pentru alimentarea transducoarelor industriale [1,24,36,98].

Caracteristicile generatorului electronic de ultrasunete depinde de urmatorii parametri [1, 24, 36]:

1.- electrici:

- frecventa de lucru sau gama de frecvente,
- puterea de iesire (determinata de tipul si capacitatea transductorului: feritic, cu tub de nichel, piezoceramic),
- randamentul generatorului: $\eta = 0,3 \div 0,7$
- stabilitatea si precizia de reglare a frecventei,
- stabilitatea amplitudinii oscilatiilor : $K = \frac{A_s}{A_0} = 0,6 \div 0,8$ unde:
As - amplitudinea oscilatiilor transductorului la frecventa de rezonanta,

A0 - valoarea admisibila a amplitudinii,

2. - neelectrici:

- gabaritul si masa generatorului,
- modul de racire a elementelor electrice,
- durata maxima de functionare continua,
- fiabilitate,
- mediul in care se emit ultrasunetele,
- costul.

Scaderea masei probei, in timpul atacului cavitional, face ca frecventa de rezonanta sa se modifice ducand la scaderea amplitudinii maxime de vibratie, la capatul probei. Prevenirea acestui fenomen se realizeaza prin folosirea unor montaje de functionare, pentru generatoarele electronice de ultrasunete, care sa asigure mentinerea frecventei de rezonanta in limitele admisibile : $f \pm 0,3 \% \text{ kHz}$ pentru aparatele vibratoare cu cristale piezoceramice, si $f \pm 3 \% \text{ Hz}$ pentru aparatele vibratoare magnetostrictive [33, 52, 69, 107, 120]. Astfel, s-au conceput montaje in varianta cu reactie [98], care permit racordarea automata a frecventei generatorului electronic la frecventa de rezonanta a transductorului.

Majoritatea aparatelor vibratorii, folosite in studiul eroziunii cavitationale, sunt dotate cu generatoare electronice ce functioneaza in regim continuu sau de modulatie in amplitudine [33, 98]. In ultimul timp, cresterea duratei de functionare si intensitatii de distrugere s-a realizat prin regimul de modulatie in amplitudine [28, 98]. Progresul realizat in domeniul electronic a impus construirea generatoarelor electronice

de ultrasunete pe baza circuitelor integrate si tranzistorilor de mare putere [1, 98]. Folosirea acestora ofera o serie de avantaje ca [28, 98]:

- randament ridicat,
- dimensiuni de gabarit reduse,
- durata mare de functionare,
- pret de cost scazut.

Din analiza mai multor scheme electronice, prezentate in literatura [98] pentru generatoarele electronice de ultrasunete, si avantajelor si dezavantajelor oferite de fiecare varianta, s-a conceput si realizat generatorul aparatului vibrator T2. Pentru generatorul electronic de ultrasunete conceput se prezinta urmatoarele scheme:

- schema bloc a generatorului, fig. 2.10,
- schema structurii interne a circuitului integrat C-MOS de tip MMC 4047, pe care este implementat etajul formare impuls si circuitul pentru obtinerea impulsurilor in contratimp, fig. 2.11,
- schema electronica a generatorului de ultrasunete, fig. 2.12,

Circuitul prezentat este folosit in regim de astabil, la iesirea circuitului, pe iesirea directa, obtinandu-se frecventa de 40 KHz. Aceasta frecventa se obtine prin dimensiunarea grupului extern RC.

Perioada acestui semnal este data de relatia:

$$t_A = 2,2 RC \quad (2.33)$$

Pentru valoarea 470 pF aleasa pentru condensatorul C, la frecventa de 40 KHz respectiv $t_A = (1/40) \cdot 10^3$ s se obtine o rezistenta de valoare $R = 24,2 K\Omega$.

Pentru acordarea generatorului cu transductorul de ultrasunete, rezistenta este divizata in doua, o parte fixa R1 si una reglabila (potentiometru) cu valoarea de 5 k.

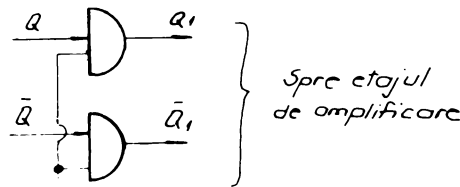
In conditiile in care se alege R1 la valoarea pentru care la mijlocul potentiometrului valoarea rezistentei echivalente este de 24.2 K Ω , reglajul frecventei se va face cu + 4 KHz in jurul frecventei de 40 kHz.

Pentru a obtine frecventa de 20 \pm 2 kHz, necesara transductorului TGUS 500/20, semnalul de 40 kHz este divizat la 2 de bistabilul cu iesiri in contratimp Q si \bar{Q} . Restul blocurilor din circuitul integrat nu sunt folosite.

Circuitul pentru blocarea impulsurilor spre etajul final are un rol dublu:

- unul pentru START / STOP cu rol de generator cu comanda din exterior, sau prin blocarea impulsurilor din protectia lor supracurent,
- unul cu rol de transpunere a semnalelor de comanda al etajului final, pe pozitia blocat, in "O"

Aceasta functie este realizata de doua porti "SI", fig. 2.13.



Blocare

Fig 2.13

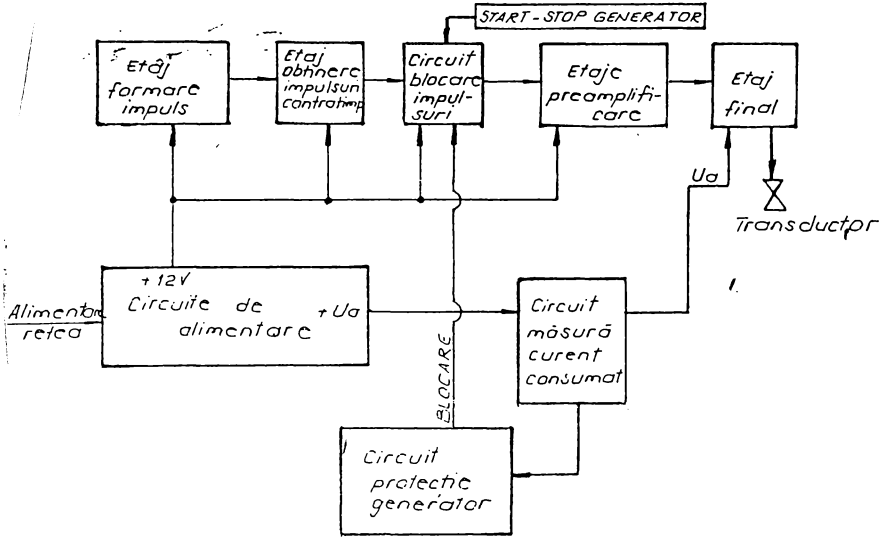


Fig. 2.10 Schema bloc generator electronic de ultrasunete

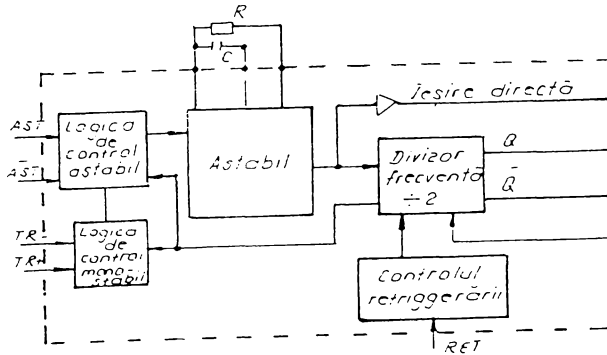


Fig. 2.11 Structura internă a circuitului integrat C - MOS tip MMC 4047 pentru formare impuls in contratimp

Implementarea acestui etaj a fost facuta practic cu porti "SI - NU".

Etajul de preamplificare este conceput tot pe baza circuitelor C-MOS prin legarea in paralel a mai multor porti bufler, conferind iesirii o capacitate mai mare de incarcare/descarcare a capacitatilor parazite, asigurand fronturi de comanda foarte bune.

Etajul final este conceput tot pe structura de tranzistoare MOS, de putere, ce debiteaza pe un transformator. Iesirea acestui transformator este cuplata la un circuit de adaptare a impedantei cu transductorul printr-o bobina semireglabila.

Circuitul de masura a curentului este constituit dintr-un șunt, de pe care se masoara caderea de tensiune.

Cu aceasta informatie, de curent, se face protectia etajului final, astfel incat se compara o tensiune de referinta reglabila, fin, prin P2. Blocarea se face instantaneu, iar testul disparitiei sarcinii se face cu o frecventa de repartitie data de R_c , C_c .

Sursele de alimentare pentru circuitele de alimentare si de forta sunt distincte. Circuitele de comanda sunt alimentate dintr-o sursa stabilizata de 12 V. Circuitele de forta sunt alimentate printr-un autotransformator, care, practic, regleaza puterea de iesire.

Parametrii asigurati de generatorul electronic de ultrasunete sunt:

1.- frecventa de rezonanta, masurata pe iesirea directa, fig.2.12, cu un numerator electronic tip E-0202-A. Valoarea reala este jumătate din valoarea indicata.

2.- curentul si tensiunea de alimentare a etajului final. Curentul se masoara cu ajutorul unui ampermetru de curent alternativ de 30 A, tip VAP 5 STAS 4640-61. Tensiunea se masoara cu un voltmetru de 300V, tip VAP 5 STAS 4640-61.

In timpul functionarii generatorul electronic de ultrasunete este racit forat cu ajutorul unui ventilator axial.

Pe durata a 15 min. de functionare (durata maxima a unei perioade de atac cavitional) s-a constatat ca singurele elemente care se incalzesc (in lipsa racirii forate) sunt grupul de rezistente R_s si cele doua bobine.

Cunoscand tensiunea si curentul de alimentare ale etajului final s-a calculat puterea electrica consumata de acest etaj si transductor, P_{el} , a carei variatie cu curentul este prezentata in fig. 2.14. Valorile optime de exploatare stabilite in urma probelor de reglaj si anduranta sunt : $I = 5,6$ A ; $U = 49$ V ; $P_{el} = 274,4$ W.

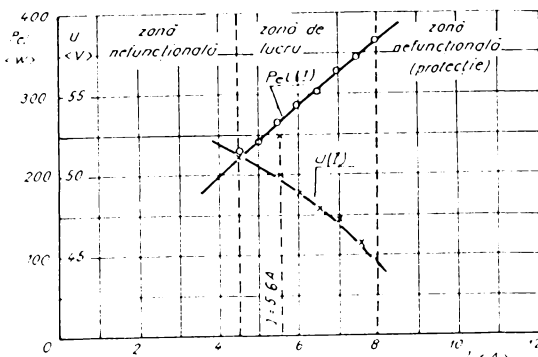
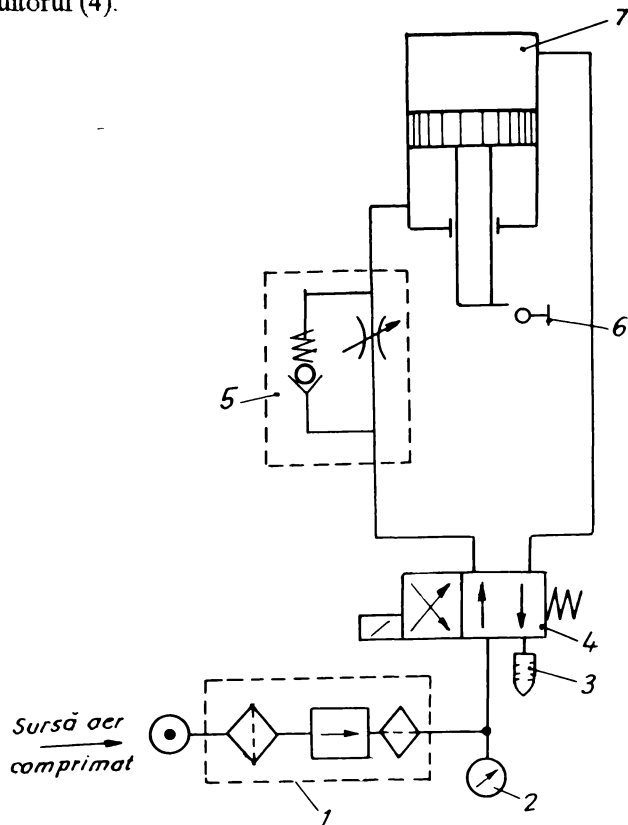


Fig. 2.14 Variatia parametrilor caracteristici etajului final al generatorului electronic de ultrasunete

2.7 SCHEMA INSTALATIEI PNEUMATICE DE ACTIONARE A MECANISMULUI DE GHIDARE

Mecanismul de ghidare este destinat sustinerii blocului ultrasonic si realizarii miscarilor de introducere si scoatere proba din lichid, la inceputul si sfarsitul perioadelor de testare.

Instalatia pneumatica, a carei schema este prezentata in fig. 2.15, asigura realizarea acestor miscari, in regim automat, cu ajutorul cilindrului pneumatic (7), comandat de distribuitorul (4).



1. grup FRU ; 2. manometru $\varnothing 60(0-10)$ bar ; 3. amortizor zgomot ; 4. distribuitor pneumatic 02/4 ; 5. droșcă de calc ; 6. limitator cursă ; 7. cilindru pneumatic.

Fig.2.15 Schema instalatiei pneumatice de actionare a mecanismului de ghidare

Imersia probei ($h = 3 \div 5$ mm) este reglata prin pozitia limitatorului de cursa (6).
Deplasarea blocului ultrasonic pe verticala (coborare) se face cu viteza reglabila, prin droselul de cale (5).

Revenirea in pozitie superioara se face rapid.

Pentru functionare, instalatia conceputa se poate racorda la o sursa de aer comprimat cu presiunea intre $2 \div 6$ bar. Pregatirea aerului comprimat, furnizat de sursa, inainte de intrare in instalatia de actionare, este realizata prin grupul FRU (1).

Toate elementele de comanda, distributie si reglare sunt Dn6. Alegerea lor s-a facut constructiv, cu scop functional, fara un calcul prealabil, intrucat singura forta ce trebuie invinsa este cea de frecare din ghidaje, a carei valoare este foarte mica [5a], datorita dimensiunilor reduse ale elementelor de executie.

Alegerea cilindrului pneumatic s-a facut pe considerente de gabarit si lungimea cursei.

Elementele instalatiei pneumatice, prezentate in fig. 2.15 sunt de productie romaneasca, fabricate sub urmatoarele coduri:

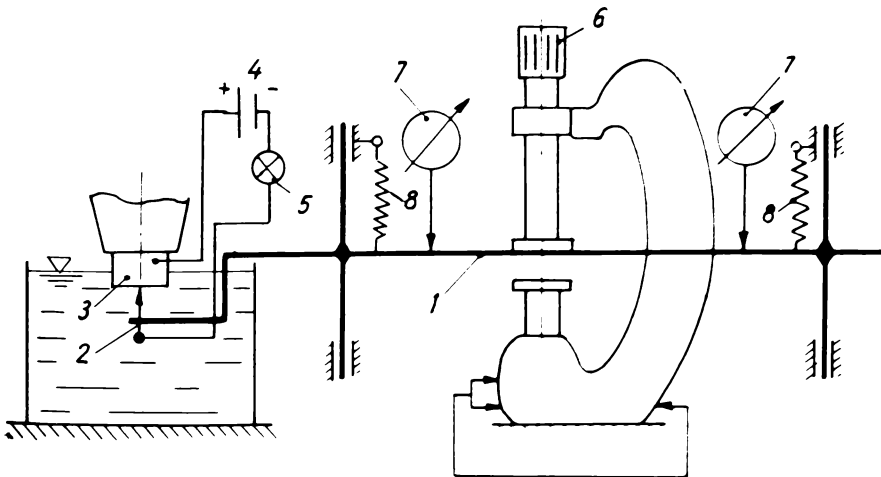
- Grup preparare aer Dn6: FRU - 06 - 1, producator S.C. Mecanica S.A. Bistrita, poz.1,
- Manometru: $\varnothing 60$, 0 - 10 bar, producator S.C. F.A.M.C. S.A. Vaslui, poz.2,
- Amortizor zgomot Dn6: 10.1- 06.5 - 0, producator S.C. Mecanica S.A. Bistrita, poz.4.
- Drosel de cale Dn6: 16.1 - 3.06, producator S.C. Mecanica S.A. Bistrita, poz. 5,
- Cilindru pneumatic $\varnothing 50 / 70$: 11.10.05.0.07, producator S.C. Mecanica S.A. Bistrita, poz.7

2.8 DETERMINAREA EXPERIMENTALA, CONTROLUL SI VERIFICAREA AMPLITUDINII VIBRATIILOR. DOMENIUL DE VARIATIE AL FRECVENTEI VIBRATIILOR

a) Masurarea amplitudinii vibratiilor la suprafata de atac a probei

Masurarea amplitudinii vibratiilor a avut drept scop stabilirea deplasarii coloanei de lichid (Δh), din piezometru vertical, corespunzatoare amplitudinii maxime de vibratie si determinarii erorii fata de valoarea calculata.

Masurarea nivelului amplitudinii maxime de vibratie s-a facut cu dispozitivul electromecanic prezentat in fig. 2.16.



1. braț mobil; 2. ac; 3. probă; 4. baterie 1,5V; 5. led; 6. pasometru precizie 1 μm; 7. comparator cu cadran de precizie 0,1 μm; 8. arc

Fig 2.16 Dispozitiv pentru masurarea amplitudinii vibratiilor

Principiul măsurării constă în determinarea distanței dintre poziția suprafeței probei (3), supusă atacului cavitațional, în stare de repaus și cea din timpul vibrației cu amplitudine maximă, în apă dublu distilată.

Contactul cu această suprafață este realizat punctiform cu acul (2) și semnalizat luminos cu ledul (5), alimentat de la o baterie (4) de 1,5 V.

Deplasarea pe verticală este realizată și măsurată cu surubul micrometric al pasometrului (6), de precizie 0,001 mm.

Rotirea și înclinarea bratului (1) este anulată de arcurile (8). Cu comparatoarele (7), de precizie 0,001 mm, s-a verificat nivelul rotirii sau înclinării bratului (1) la o deplasare de 0,2 mm. S-a constatat că, pentru soluția concepută și realizată, acestea sunt nule.

S-au realizat 10 măsurători pentru nivelul maxim al amplitudinii vibrațiilor și o imersie a probelor $h = 3$ mm, la frecvența $f = 20 \pm 0,2$ kHz recomandată de normele ASTM [120]. Valorile măsurate sunt indicate în Tab. 2.4.

Tab.2.4 Parametrii funcționali ai aparatului vibrator T2 ($I = 5,6$ A, $U = 49$ V)

Nr. crt.	$m_{\text{probă}} = 6,70135$ g			$m = 7,795411$ g		
	f Hz	A μm	Δh mm	f Hz	A μm	Δh mm
1	19665	32	~ 12	20077	32	~ 11
2	19866	32	~ 12	20118	32	~ 11
3	19921	32	~ 12	20149	32	~ 11
4	19930	32	~ 12	20192	32	~ 11
5	19985	32	~ 12	20208	32	~ 11

Nu s-au putut măsura frecvențe mai mici de 19625 Hz și mai mari de 20212 Hz datorită sistemului de protecție existent în generatorul electronic de ultrasunete, ce decuplează sistemul circuitului oscilant.

Prin urmare se poate admite că la frecvența de rezonanță a aparatului vibrator $f = 20 \pm 0,2$ kHz amplitudinea maximă a vibrațiilor este $A_{\text{max}} = 32 \mu\text{m}$. Eroarea față de amplitudinea calculată $A = 3,7\%$ se datorează :

- abaterilor de formă și dimensionale ale concentratorului, amplificatorului și probei,

- diferențelor de calitate de material dintre concentrator - amplificator (duraluminiu) și proba (40Cr10),

- diferențelor dintre vitezele de propagare a sunetelor în cele două medii,

- admitere ca valoare pentru viteza sunetului în duraluminiu $c = 5130$ m/s, data în [98].

b) Verificarea amplitudinii masurate

Verificarea amplitudinii masurate in aparatul T2, $A = 32 \mu\text{m}$, s-a realizat prin compararea volumelor de material erodate cu cele obtinute in alte aparate similare in lume. Astfel, s-au considerat aparatele vibratoare de la Institutul de Cercetari Stiintifice Wuxi din China [106] (Tab 1.: $A = 32 \mu\text{m}$, $f = 20 \text{ KHz}$, $d = 16 \text{ mm}$ - valori apropiate de ale aparatului T2), Universitatea Tehnica din Ostrava [106] ($A = 40 \mu\text{m}$, $f = 20 \text{ KHz}$, $d = 16 \text{ mm}$) si Universitatea din Michigan [1,40] ($A = 25,4 \mu\text{m}$, $f = 20 \text{ KHz}$, $d = 14,3 \text{ mm}$).

Pentru primele doua aparate s-a considerat alama (cu caracteristici mecanice apropiate de ale alamei navale testate in aparatul T2) iar pentru cel de-al treilea otelul carbon (cu caracteristici mecanice apropiate de ale otelului aliat 33MoCr11, testat in aparatul T2).

Testele de eroziune cavitionala, in cele trei aparate, s-au realizat in apa distilata la temperaturi identice $t = 20 \pm 1^\circ \text{C}$. In Tab. 2.5 sunt afisate date despre materialele considerate si marimile caracteristice de comparatie la 165 minute de atac cavitional, iar in fig. 2.17 si 2.18 se compara, pentru alama, curbele vitezelor si volumelor de eroziune cavitionala.

Tab.2.5 Marimi caracteristice

<i>Simbol aparat (laborator - autor)</i>	<i>Material</i>	R_m $\frac{N}{mm^2}$	HB $\frac{daN}{mm^2}$	V mm^3	v_s $\frac{mm^3}{min}$	<i>Bibliograf.</i>
T2 (Timișoara - Bordeasú)	Alamă	345	80	7,79	0,56	-
T2 (Timișoara - Bordeasú)	33 MoCr 11	800	217	2,41	0,011	-
WUXI (W) (China - Ji Je Zhi)	Alamă	352	77	7	0,047	[106]
V S B (Ostrava - Noskievič)	Alamă	352	77	6,5	0,05	[106]
M (Michigan - Hammit)	Otel carbon	719	183	2,28	-	[40]

Abaterile relative dintre marimile ce caracterizeaza eroziunea cavitationala in aparatele considerate au valorile:

- pentru alama:

$$\text{WUXI } \Delta V = \frac{V_{T2} - V_w}{V_{T2}} \cdot 100 = 10,1\%$$

$$\text{respectiv } \Delta v_s = \frac{v_{sT2} - v_{sw}}{v_{sT2}} \cdot 100 = 16,1\% \quad (2.33)$$

$$\text{OSTRAVA } \Delta V = \frac{V_{T2} - V_{vSB}}{V_{T2}} \cdot 100 = 16,6\%$$

$$\text{respectiv } \Delta v_s = \frac{v_{sT2} - v_{sw}}{v_{sT2}} \cdot 100 = 10,7\% \quad (2.34)$$

- pentru otel

$$\text{MICHIGAN } \Delta V = \frac{V_{T2} - V_M}{V_{T2}} \cdot 100 = 5,4\% \quad (2.35)$$

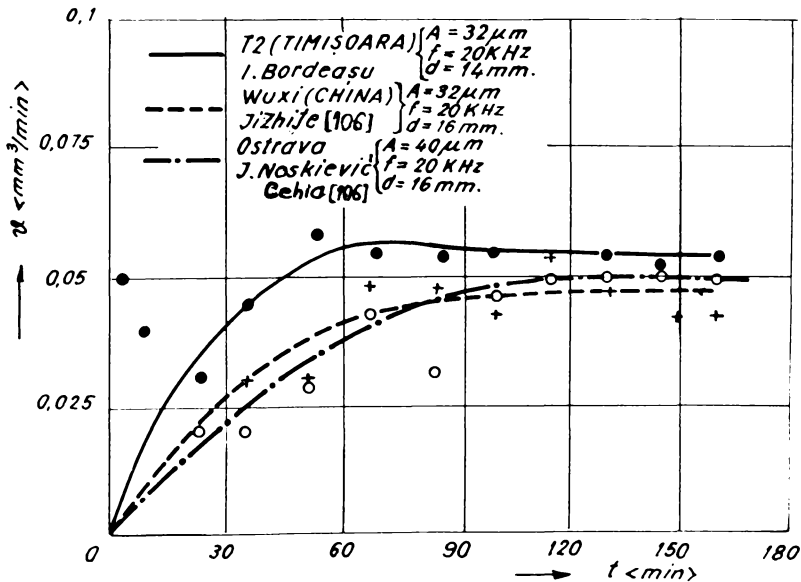


Fig. 2.17 Viteza de eroziune cavitationala a alamei in functie de timpul de atac cavitional

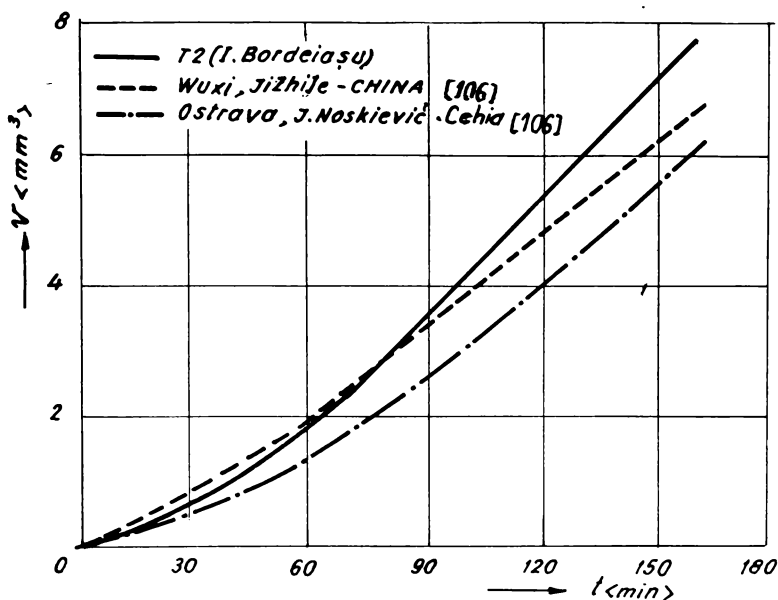


Fig. 2.18 Variația volumului de alama erodat cu timpul de atac cavitațional

Nivelul acestor abateri este firesc și se datorează caracteristicilor mecanice și structurii materialelor, considerate, diferite (Tab. 2.5) și diferențelor dintre valorile parametrilor tehnico-funcționali ai aparatelor vibratorii (Tab. 1.3), luate spre comparație. Valorile acestor abateri se încadrează în limitele admisibile [120], sunt cu mult mai mici decât cele acceptate de Garcia [33] (peste 35%), Sakai - Shima [95a] (până la 37%) și K. Steller [107] (până la 31%) și confirmă determinarea corectă a amplitudinii vibrațiilor produse de aparatul vibrator T2, proiectat și realizat de autor.

c) Caracteristicile fizice ale aparatului

Caracteristicile fizice ale aparatului sunt determinate cu relațiile prezentate la aparatul vibrator magnetostrictiv T1, Cap. 1 - § 1.4.2.

Perioada unei vibrații:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ s} \quad (2.36)$$

Pulsatia vibratiilor:

$$\omega = \frac{2\tilde{f}}{T} = 125663,71 \text{ s}^{-1} \quad (2.37)$$

Vitezele maxima si medie de vibratie a probei:

$$v_{\max} = \omega A = 4,021 \text{ m/s} \quad (2.38)$$

$$v = \frac{v_{\max}}{2} \cong 2,011 \text{ m/s} \quad (2.39)$$

Acceleratia maxima a probei:

$$a_{\max} = \omega^2 A = 505323,74 \text{ m/s}^2 (= 51528,681 \text{ g}) \quad (2.40)$$

Presiunea sonica maxima dezvoltata in apa la 20 °C ($c = 1412 \text{ m/s}$ [110]):

$$p_{s \max} = A\omega\rho c = 5677988,9 \text{ Pa} \quad (2.41)$$

Conditia de existenta a cavitatiei la 20 °C ($p_v = 2338 \text{ Pa}$ [30a]) este indeplinita:

$$p_{\text{stat}} - p_{s \max} < p_v = > 101325 - 5677988,9 = -547663,9 < 2338 \text{ Pa} \quad (2.42)$$

2.9 DESCRIEREA SI FUNCTIONAREA APARATULUI VIBRATOR

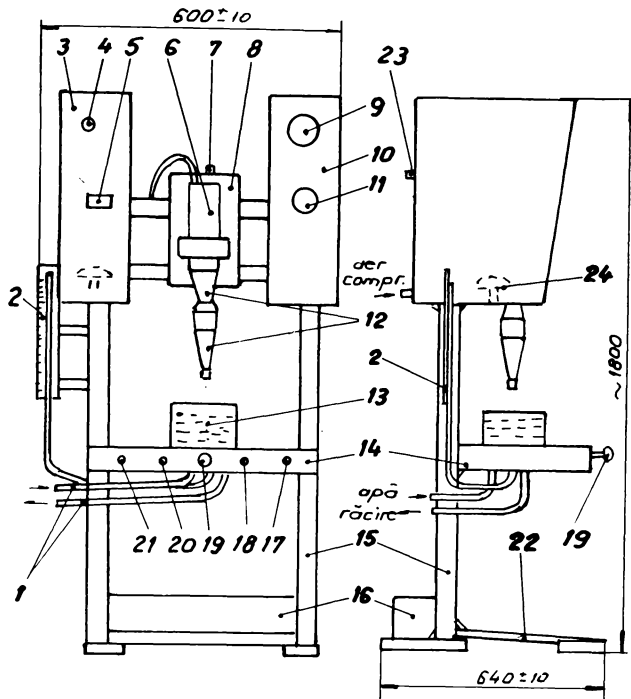
Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, prezentat in fig. 2.19 si 2.20, a fost proiectat si realizat pentru distrugerea materialelor solide prin cavitatie.

Se compune dintr-un cadru sudat pe care sunt fixate toate subansamblele componente:

- caseta generatorului electronic de ultrasunete,
- mecanismul de ghidare cu blocul ultrasonic,
- caseta subansamblului pneumatic de actionare a mecanismului de ghidare,
- transformatorul electric,
- pupitru de comanda,
- masa suport a vasului ce contine lichidul in care se fac testele de eroziune cavitationala.

Caracteristicile functionale, tehnice si constructive ale aparatului sunt:

1. - Frecventa de rezonanta: $f = 20 \pm 0,2 \text{ KHz}$,
2. - Amplitudinea vibratiilor: $A = 32 \mu\text{m}$.



- 1 - Conducte răcire
- 2 - Piezometru control amplitudine
- 3 - Casetă instalație electrică și electronică
- 4 - Buton cuplare generator electronic de ultrasunete
- 5 - Ampermetru
- 6 - Traductor TGUS 500/20
- 7 - Șurub deplasare bloc ultrasonic
- 8 - Mecanism ghidare
- 9 - Manometru
- 10 - Casetă instalație pneumatică
- 11 - Regulator de presiune
- 12 - Transformator acustic
- 13 - Vas pentru lichidul de încercare
- 14 - Masă
- 15 - Cadru suport
- 16 - Transformator electric
- 17 - Buton cuplare aparat la rețea
- 18, 19, 20, 21 - Becuri semnalizări protecție
- 22 - Talpă echilibrare
- 23 - Contacteur electric
- 24 - Ventilator

Fig. 2 19 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2

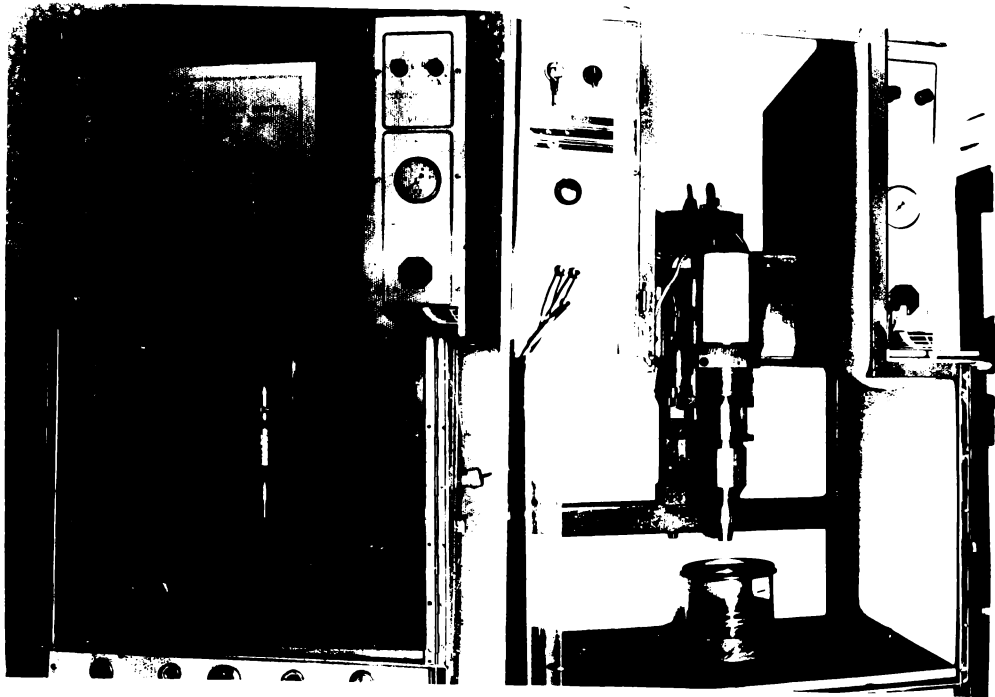


Fig. 2.20 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2

3. - Puterea electrica, de lucru, de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete si 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 electrica absorbita de la retea: $P_e = \text{max. } 800 \text{ VA}$,
 6. - Tensiunea electrica de alimentare : $220 \text{ Vca}^{+10\%}_{-15\%}$, la $50 \pm 2 \text{ Hz}$,
 7. - Diametrul probei: $D = 14 \text{ mm}$,
 8. - Dimensiunea filetelui probei: $M 12 \times 1$,
 9. - Cursa maxima de pozitionare in plan vertical a blocului ultrasonic:
 $C = 310 + 5 \text{ mm}$,
 10. - Dimensiunile de gabarit ($L_1 \times l_1 \times H_1$): $640 \times 600 \times 1800$,
 11. - Dimensiunile camerei de lucru ($L_2 \times l_2 \times H_2$): $440 \times 560 \times 870$,
 12. - Dimensiunile vasului pentru lichid: $\varnothing 120 \times 90$,
 13. - Volumul ocupat de lichidul de lucru: $V_{l1} = 751,32 \text{ ml}$,
 14. - Cilindru pneumatic:
 - diametru piston: $D_p = 50 \text{ mm}$
 - diametru tija: $d_t = 25 \text{ mm}$,
 - cursa: $c = 145 \text{ mm}$,
 15. - Presiunea aerului comprimat, maxima de lucru: $p = \text{max. } 6 \text{ bar}$.
- Principiul de functionare al aparatului se bazeaza 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, fig.2.4, și amplificator acustic, fig.2.5.

În punctul de amplificare maximă (capatul inferior al transformatorului acustic) este montată proba, fig.2. 8, ce urmează a fi solicitată cavitațional, imersată în lichidul de lucru 3 mm.

Datorită aderenței fluidului la suprafața probei, în timpul oscilațiilor, la urcare, pe această suprafață, apare norul de bule cavitațional. La coborâre acest nor se surpa generând unde de soc, microjeturi și creșterea temperaturii pe suprafața probei. Prin acțiunea comună a celor trei factori are loc o distrugere rapidă a suprafeței frontale a probei, diferentiat de la un material la altul.

Verificarea nivelului amplitudinii se face cu ajutorul piezometrului vertical simplu (2), a cărui coloană se deplasează cu $\Delta h = 11 \pm 12$ mm, corespunzător amplitudinii $A = 32 \mu\text{m}$. Această deplasare este determinată de undele de presiune sonice captate de pâlnia montată în vasul cu lichid (13), sub proba, 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 temperatura constantă se face cu o serpentină de cupru racordată, printr-un robinet, la rețeaua de apă potabilă.

Momentan, introducerea și scoaterea probei din lichid, la începutul și sfârșitul perioadelor de atac cavitațional, se face manual. Racordarea instalației pneumatice la o sursă de aer comprimat permite automatizarea acestor manevre.

Protecția operatorului de ultrasunete este asigurată prin izolarea fonică, cu burete, a camerei de lucru.

În caz de avarii sistemul se poate decupla rapid printr-un buton ciuperca de protecție.

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. Reglarea se face la începutul testării pentru fiecare probă.

2.10 DEFECTIUNI SI MOD DE REMEDIERE

Defectiunile intampinate in timpul perioadelor de executie si probe precum si modul de remediere sunt sintetizate mai jos, sub forma tabelara.

Nr. crt.	Defectiune	Cauze	Defectiuni
I	II	III	IV
1	Blocul ultrasonic vibreaza, dar nu atinge frecventa de rezonanta sau amplitudinea maxima de vibratie	-cristalele piezoceramice sunt fisurate -concentratorul este fisurat -amplificatorul de unda este fisurat - proba este fisurata	-se inlocuieste transducatorul -se inlocuieste concentratorul -se inlocuieste amplificatorul de unda -se inlocuieste proba
2	Blocul ultrasonic nu vibreaza	- diodele sunt strapunse - condensatorii sunt strapunsi - rezistentele sunt arse - tranzistori arsi - scurtcircuit in bobinele transformatoarelor	- se inlocuiesc diodele - se inlocuiesc condensatorii -se inlocuiesc rezistentele -se inlocuiesc tranzistorii - se reface bobinajul
3	Radiatoarele se supraancalzesc	-ventilatorul defect	-se remedieaza ventilatorul
4	Nu porneste ventilatorul	- rotorul ars - statorul ars - siguranta la intrare arsa	- se rebobineaza rotorul - se rebobineaza statorul - se inlocuieste siguranta
5	Nu se aprinde becul de punere statiune sub tensiune	- becul ars - stecherul ars - siguranta de la intrare arsa	- se inlocuieste becul - se inlocuieste stecherul - se inlocuieste siguranta
6	Nu se realizeaza avansul pneumatic al blocului ultrasonic	- sertarul distribuitorului pneumatic este blocat - mansetele de translatie sunt uzate	- se curata sertarul - se inlocuiesc mansetele
7	Avansul manual, prin manevrarea surubului de la mecanismul de ghidare, se realizeza greu	- ghidajele sunt gripate - patrundere impuritati in elicea surubului sau a piulitei	- se rectifica, tuseaza si ung cu ulei ghidajele -se curata surubul si piulita si se ung cu ulei
8	Functionare lenta si in trepte a regulatorului de presiune	- arcul regulatorului si-a pierdut caracteristicile -ventilul regulatorului	-se schimba arcul regulatorului - se inlocuieste ventilul

I	II	III	IV
8		are urme de gripare - canalele sunt infundate	regulatorului - se schimba filtru si se curata canalele
9	Nu se raceste lichidul de lucru din vasul de incercare	- furtune infundate sau fisurate - serpentina de cupru infundata	- se inlocuiesc furtunele -se inlocuieste serpentina de cupru
10	Creste nivelul lichidului de lucru in vasul de incercare	- serpentina de racire fisurata	-se inlocuieste serpentina /

CAP. 3 CERCETARI EXPERIMENTALE REALIZATE IN LABORATORUL DE MASINI HIDRAULICE DIN TIMISOARA (LMHT), ASUPRA UNOR MATERIALE

3.1 METODA DE TESTARE

In conformitate cu normele ASTM [120], din fiecare material/(acelasi semifabricat si sarja) s-au incercat cel putin trei probe. La fiecare proba suprafata de atac cavitational a fost rectificata sau lustruita la o rugozitate $Ra = 0,2 \pm 0,8 \mu m$.

La inceputul si sfarsitul fiecarei perioade de incercare, probele au fost spalate in apa sub presiune (la robinetul de apa potabila de la retea), apa distilata, alcool si acetona, uscate in curent de aer cald si cantarite.

Durata totala a incercarii este de 165 minute, impartita in perioade de 5, 10, si 15 minute. Dupa normele ASTM [120] durata totala a incercarii este de $2 \div 3(5)$ ore. Aceasta durata depinde de material si aparat [30a, 33, 40a], si este functie de timpul la care se stabilizeaza viteza de eroziune cavitationala, astfel incat curba acestei viteze sa aibe o forma asemanatoare celei stabilita de Thiruvengadam [3, 111], considerata model, de specialisti. Cercetarile efectuate, de peste 35 ani, in LMHT, pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel, de Potencz si Kuzman [52, 53], Sisak [133] si Hrelescu [44] au aratat ca durata maxima necesara obtinerii unei astfel de curbe este de 165 min.

Obs. Dupa Thiruvengadam, viteza de eroziune de stabilizare apare dupa ce in prealabil a fost atins un maxim. In aparatele vibratorii apar unele diferente: pentru unele materiale apare un maxim pronuntat (fonte, oteluri carbon nealiate) [17, 52, 53], pentru altele un maxim prelungit (unele oteluri aliate) [133] sau viteza de eroziune cavitationala se stabilizeaza la valoarea maxima (inoxuri, bronzuri navale, unele oteluri aliate, oteluri tratate termic) [14, 15, 18, 33, 48.81, 103, 106].

Cantarierea probelor s-a efectuat cu o balanta analitica tip "ZAKLADY" ce permite citirea a sase cifre semnificative.

In timpul atacului cavitational temperatura lichidului s-a mentinut constanta, in jurul valorii de $20 \pm 1^{\circ} C$. Majoritatea incercarilor s-au realizat in apa distilata ($\rho_l = 1000 Kg/m^3$). Unele materiale, folosite in fabricarea elicelor navale, s-au testat in apa marina standard, realizata artificial, [15 - 20, 78, 79, 128] ($\rho_l = 1020 Kg/m^3$). Masa specifica a lichidului de lucru folosit este afisata in Tab.3.2. Datorita perioadelor scurte de incercare, in timpul eroziunii cavitationale efectul coroziv al apei marine este practic inexistent [84].

De asemenea, amplitudinea si frecventa vibratiilor s-au mentinut constante.

Dupa fiecare perioada de incercare suprafata activa a probei a fost examinata la microscopul optic, marire 6.3x, pentru urmarirea modului de evolutie al distrugerii produsa prin cavitate, si fotografiata

3.2 CERCETARI EXPERIMENTALE REALIZATE IN APARATUL VIBRATOR MAGNETOSTRICTIV CU TUB DE NICHEL (T1)

3.2.1 Materiale testate

Materialele analizate, din punct de vedere al comportarii la eroziune cavitationala, fac parte din categoria aliajelor fier carbon (utilizate in realizarea pompelor si turbinelor hidraulice, elicelor navale si componentelor aparaturii hidraulice de comanda, distributie si reglare), alamelor si bronzurilor navale (folosite in fabricarea elicelor navale).

Intrucat, orice element de aliere modifica caracteristicile mecanice si structura materialelor [35, 35a, 64, 65, 115], pentru evaluarea rezultatelor obtinute si desprinderea modului in care eroziunea cavitationala este influentata de compozitia chimica, Tab. 3.1, proprietati mecanice, structura si tehnologia de elaborare, Tab.3.2, materialele s-au grupat pe clase de calitate, astfel:

- 1.- oteluri carbon laminate si turnate, fonte,
- 2.- oteluri aliate pentru constructii,
- 3.- oteluri inoxidabile laminate si turnate,
- 4.- bronzuri si alame navale.

Toate grupele s-au stabilit prin respectarea normelor standard, in care principalul criteriu de clasificare a materialelor, pe clase de calitate, il constituie compozitia chimica. Evident, in cadrul fiecarei clase exista subclase, standardizate, stabilite in functie de: gradul de dezoxidare, tehnologia de elaborare, cantitatea principalelor elemente de aliere si domeniul de utilizare [63 - 65, 114,115,121 - 126a].

Introducerea fontei Fgn 450-5 in prima grupa s-a facut numai din considerentele: existenta unor materiale cu care aceasta sa se poata compara cavitational si absenta principalelor elemente de aliere (Cr si Ni), cunoscute in literatura [30a, 40a, 44, 77] pentru efectele benefice asupra rezistentei cavitationale.

S-a optat pentru o grupare de aceasta forma intrucat standardele in vigoare nu contin o clasificare a materialelor dupa criteriul rezistentei cavitationale.

De asemenea, s-a preferat aceasta grupare deoarece studiile efectuate pana in prezent [3, 8, 9, 12, 32, 39, 40, 47, 53, 69, 76, 82, 101, 106] arata clar diferenta substantiala intre comportarea cavitationala a materialelor din clase diferite, iar importanta prezinta modul in care este influentata rezistenta cavitationala de orice element de aliere, de proprietatile mecanice, de tipul structurii si natura constituentilor structurali. Aceasta investigare este posibila numai in cadrul aceleiasi clase (grupe), cu conditia ca incercarile sa fie realizate in acelasi aparat si materialele sa provina din acelasi semifabricat si aceeasi sarja. Un astfel de studiu a fost realizat de Karimi si Heuze [48] pe bronzurile manganoase si concluziile au adus multe noutati fata de cele

Tab. 3.1 Compoziția chimică

Grupă	Material	Elemente componente $i, < \% >$													Alte impurități	Bibliografie	
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe	Ti	Mo	Cu	Al	Nb			Zn
Oțel carbon	OLC 15	0,15	0,5	0,12	0,04	0,03	-	-	99,16	-	-	-	-	-	-	-	[126]
	* OL 370 - 3K	0,17	0,47	0,22	0,06	0,06	-	-	99,02	-	-	-	-	-	-	-	[122]
	OT 500 - 3	0,36	0,7	0,32	-	-	-	-	98,62	-	-	-	-	-	-	-	[123]
Oțel carbon și fontă	* Fgn 450 - 5	3,1	0,8	3,1	-	0,038	-	-	86,124	-	-	-	-	-	-	6,79	[177]
	* 33 MoCr 11	0,33	0,6	0,27	-	-	1,1	-	97,48	-	0,22	-	-	-	-	-	[201]
	41 MoCr 11	0,41	0,6	0,27	-	-	1,1	-	97,4	-	0,22	-	-	-	-	-	[201]
Oțeluri aliate	* 40 Cr 10	0,445	0,561	0,28	-	0,009	0,94	-	97,765	-	-	-	-	-	-	-	[81]
	* 18 MoCrNi13	0,18	0,772	0,2	-	-	1,14	1,23	96,248	0,23	-	-	-	-	-	-	[80]
	* Carbon I RNR	0,4	1,1	0,6	-	0,04	0,6	0,4	96,71	-	0,15	0,3	-	-	-	-	[9]
Oțeluri aliate și fontă	D - 32 - 1	0,18	12,5	2,5	0,04	-	0,2	0,4	83,71	-	0,08	0,35	0,04	-	-	-	[15]
	* Inox III RNR	0,12	1,0	0,6	-	-	1,5	2,0	79,58	-	0,2	1,5	-	-	-	-	[16]
	* 07CuMoMnNiCr 165-M	0,07	1,72	0,49	0,07	0,019	16,5	3,8	74,957	-	0,37	1,61	0,4	-	-	-	[127]
Oțeluri aliate și fontă	* 09CuMoMnNiCr 185-T	0,09	2,0	0,58	0,014	0,003	18,57	3,91	72,683	0,11	0,14	1,19	-	-	-	-	[127]
	* 20 Cr 130	0,15	0,6	0,7	0,035	0,003	13	0,6	84,885	-	-	-	-	-	-	-	[124]
	* 2 H 13	0,15	0,6	0,7	0,035	0,003	13	0,6	84,885	-	-	-	-	-	-	-	[126a]
Oțeluri aliate și fontă	OH 12 NDL	0,1	0,4	0,3	0,085	0,025	12,75	1,25	83,35	-	0,9	-	-	-	-	-	[126a]
	Inox aust-ferit H442-15	0,1	3,45	0,32	0,024	0,07	19,75	3,4	70,996	-	1,89	-	-	-	-	-	[134]
	* CuNi Al III RNR	-	3,5	-	-	-	-	4,5	4	-	7187	9	-	-	1,0	0,1	0,03 Pb [18]
Bronz	* CuNi Al I RNR	-	3,5	-	-	-	-	1,0	2	-	60	2,5	-	29	1,5	0,5 Pb [18]	
	* Alomă	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	-	-	30	-	-	[128]

obținute prin compararea cu materialele din alte clase de calitate, așa cum procedea Garcia [33], Hammitt [40] și Hobbs [41].

Mentionez, ca pentru unele materiale rezistența mecanică la rupere R_m , limita de curgere $R_{p0,2}$ și compoziția chimică au fost extrase din STAS-urile sau literatura de specialitate indicate ca bibliografie. La toate materialele, duritatea s-a determinat cu microdurimetrul Rockwel tip KMT3, cu sarcina de 509Kgf, în Laboratorul de Studiu Materialelor.

Pentru materialele notate cu "*" compoziția chimică s-a determinat în Laboratorul de Analize Chimice al "S.C. Electrotimis S.A." Deoarece, oțelul naval de înaltă rezistență D32 nu a prezentat compoziția chimică prescrisă de normele RNR [15], Tab.3.1, (cantitatea de Mn și Si sunt cu mult peste limitele admisibile: Mn = 0,9 ÷ 1,6 % și Si = 0,1 ÷ 0,5 % [121]) și cum interes prezintă comportarea sa cavitațională s-a denumit D 32-1, pentru diferențiere.

Pentru toate materialele masa specifică ρ s-a determinat analitic cu relația:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot c_i \quad \langle \text{Kg/dm}^3 \rangle \quad (3.1)$$

unde:

ρ_i - masa specifică a componentei i , în Kg/dm^3 , Tab.3.2,

c_i - concentrația volumică a componentei i , în procente, Tab.3.1

Structura oțelurilor inoxidabile s-a stabilit pe baza diagramei Schaffler [63] fig.3.1, în funcție de cantitatea de nichel echivalent (Ni)_e și crom echivalent (Cr)_e, Tab.3.3. Echivalentul de nichel și crom s-a determinat cu relațiile [63]:

$$(\text{Ni})_e = \% \text{Ni} + 30 \times \% \text{C} + 0,5 \times \% \text{Mn} \quad (3.2)$$

$$(\text{Cr})_e = \% \text{Cr} + \% \text{Mo} + 1,5 \times \% \text{Si} + 0,5 \times \% \text{Nb} + 2 \times \% \text{Ti} \quad (3.3)$$

Pentru nici unul din materialele prezentate nu s-a efectuat analiza metalografică pentru determinarea cantității constituenților structurali, și defectoscopia, pentru determinarea defectelor interne, din lipsa aparatului necesare.

3.2.2 Rezultate experimentale

3.2.2.1 Curbe caracteristice

Toate încercările s-au realizat la $f = 7000 \pm 3 \% \text{ Hz}$. $A = 47 \mu\text{m}$ și $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ indiferent de natura lichidului.

Pentru fiecare probă viteza de eroziune cavitațională aferentă perioadelor de atac cavitațional, s-a determinat cu relația:

$$v_j = \frac{\Delta m_j}{\rho \Delta t} \quad \langle \frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \rangle \quad (3.4)$$

unde:

$j = 1...3$ (max5) - numărul de probe testate, prelevate din același material (semifabricat, sarja, piesa),

m_j - masa de material erodată în intervalul de timp t , în Kg,

t = durata unei perioade de atac cavitațional, în min,

ρ - masa specifică a materialului, în Kg/mm³.

În fig.3.2 și 3.3 se prezintă curbele $v_j(t)$ pentru oțelurile D 32-1 și inox III-RNR, utilizate în construcția elicelor navale [15,16].

Deoarece, majoritatea cercetărilor [21, 29, 30, 40, 43, 46, 52, 53, 67, 69, 88, 102] compară materialele pe baza valorilor medii ale parametrilor caracteristici eroziunii cavitaționale, respectiv curbelor vitezelor de eroziune cavitațională medii, în

Tab.3.2 Proprietățile fizico-mecanice ale materialelor și lichidelor de lucru, tip semifabricat

Grupa	Material	ρ_L Kg dm ³	ρ Kg dm ³	R_m N mm ²	HB daN mm ²	$R_{p0.2}$ N mm ²	Natura semifab.	Structura	Bibliografia
Fonta și oțeluri carbon	DL C 15	1	7,858	420	146	230	L	90%F+10%P	[64, 133 115, 126]
	OT 500-3	1	7,885	500	138	270	T	60%F+40%P	[64, 114, 76, 123]
	DL 370-3K	1	7,837	370	106	230	L	85%F+15%P	[64, 76, 114 115, 122]
	Fgn 450-5	1,02	7,2	450	190	-	T	70%F+ 30%(F+G)	[17, 63, 115 121]
Oțeluri aliate ptr. construcții	33 Mo Cr 11	1	7,835	800	217	780	L	F+P+B	[64, 20, 115, 125, 133]
	41 Mo Cr 11	1	7,831	1075	217	880	L	B+M	[20, 64, 115 125, 133]
	40 Cr 10	1	7,824	808	238	790	L	B+M	[64, 81, 114 115]
	18 Mo Cr Ni 13	1	7,861	890	233	820	L	F+P+B	[64, 89, 114 115]
	Carbon I RNR	1,02	7,829	500	156	280	L	B+M	[9, 114, 115, 121]
	D 32 - 1	1,02	7,713	530	159	315	L	Aerosolana	[15, 63, 114, 121]
Oțeluri inoxidabile	Inox III RNR	1,02	7,769	550	159	380	L	50% M+ 50% F	[16, 63, 121]
	T09CuMoMnNiCr165-46	1	7,786	830	204	600	T	40%A+40%M+ +20%F	[63, 127]
	T09CuMoMnNiCr165-Ti	1	7,761	775	190	630	T	60%A+10%M+ +30%F	[63, 127]
	20 Cr 130	1	7,66	600	170	300	L	34%A+66%	[63, 134]
	2H13 ⇒ 20Cr130	1	7,66	600	170	300	L	34%M+66%F	[63, 133]
	DH 12 NDL	1	7,81	650	225	400	T	74%M+26%F	[63, 134]
	Inox austenito-feritic H4142-15	1	7,783	610	185	338	T	65%A+5%M+ +50%F	[63, 134]
Bronzurii alame navale	CuNiAl III RNR	1,02	8,278	590	165,5	245	T	Sol.sol.γ	[18, 115, 121]
	CuNiAl I RNR	1,02	8,183	440	138	175	T	Sol.sol.γ	[18, 115, 121]
	Alamă	1,02	8,43	345	80	140	T	Sol.sol.α	[115, 121 128]

L - laminat, F - ferită; P - perlită; G - grafit;

T - turnat; M - martensită; B - bainită; A - austenită

Tab. 3.3 Cantitatile procentuale de (Ni)e si (Cr)e pentru oteluri inoxidabile

Material	(Ni)e	(Cr)e
Inox III RNR	6,1	16,1
T07CuMoMnNiCr165-Nb	6,76	18,4
T09CuMoMnNiCr185-Ti	7,61	19,81
20 Cr 130 ; 2 H13	5,4	14,05
OH 12 NDL	4,45	13,2
H 4142 - 15 Inox austenita-ferita	8,125	20,23

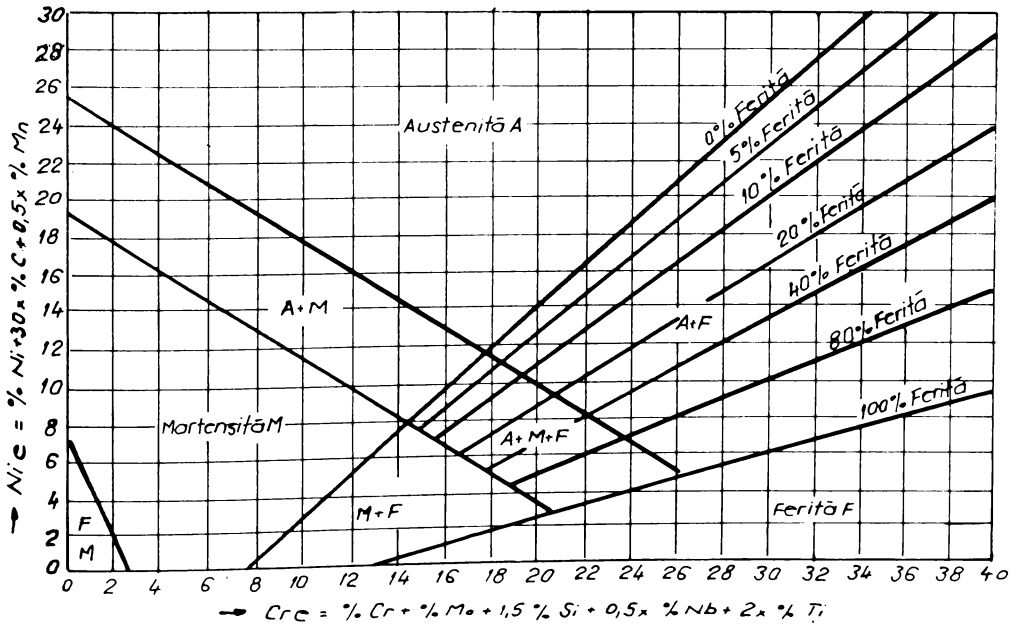


Fig.3.1 Structura otelurilor inoxidabile
Diagrama Schäffler [63]

figurile mentionate sunt construite si aceste curbe, $v(t)$. Valorile vitezelor de eroziune cavitionala medii, corespunzatoare perioadelor de atac cvtitional, sunt determinate cu relatia:

$$v = \frac{\sum_{j=1}^n v_j}{n} \quad \left\langle \frac{mm^3}{min} \right\rangle \quad (3.5)$$

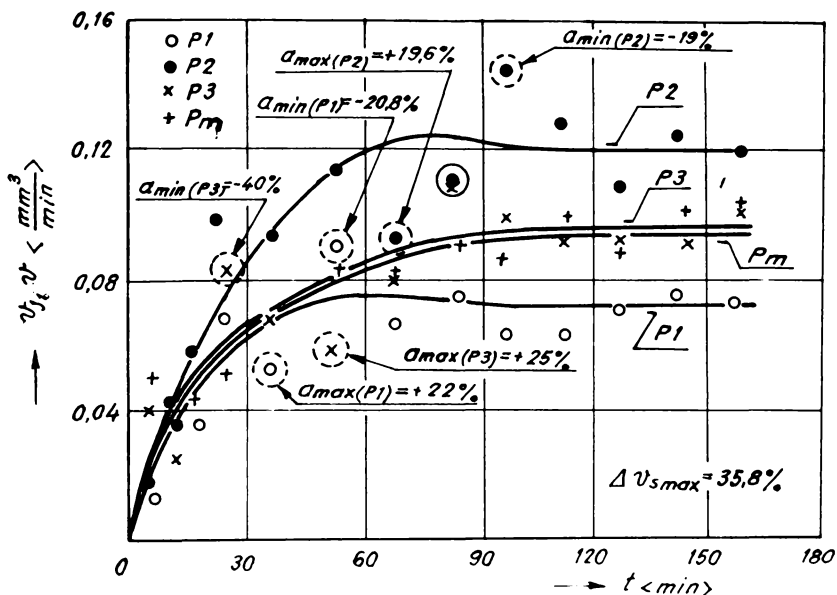


Fig.3.2 Variatia vitezei de eroziune cavitionala cu timpul de atac (D 32-1, T1)

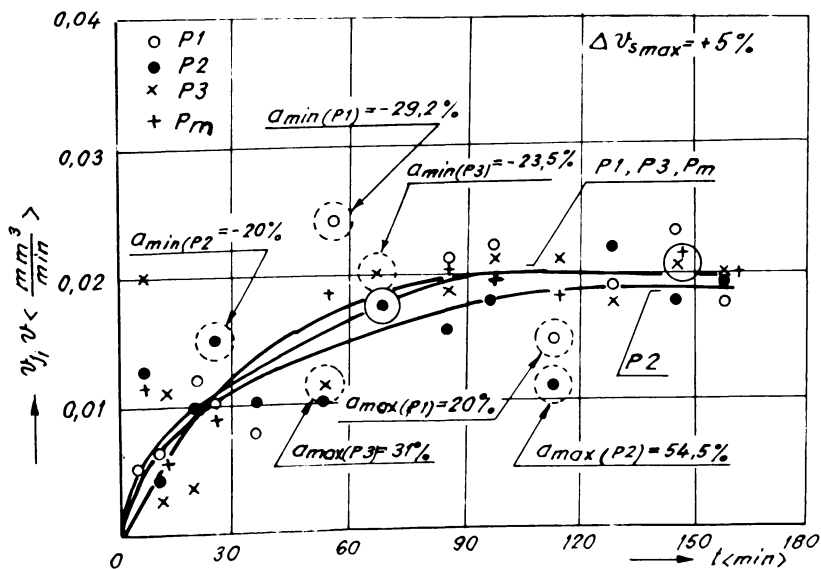


Fig.3.3 Variatia vitezei de eroziune cavitionala cu timpul de atac (Inox III-RNR, T1)

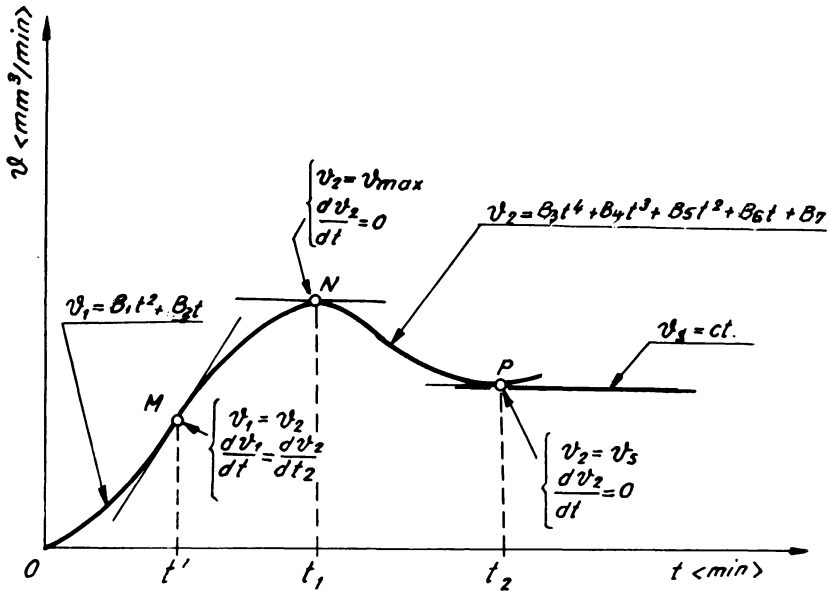


Fig. 3.4 Descrierea curbei experimentale a vitezei de eroziune cavitacionala

Constructia grafica s-a realizat cu calculatorul, utilizand 3 curbe de ecuatii diferite, astfel:

- in perioada $0 - t'$ ecuatia curbei este:
- pentru proba P_j

$$v_{ij} = B_{1j} t^2 + B_{2j} t \quad (3.6)$$

- pentru media probelor P_m

$$v_1 = B_1 t^2 + B_2 t \quad (3.7)$$

- in perioada $t' - t_2$
- pentru proba P_j

$$v_{2j} = B_{3j} t^4 + B_{4j} t^3 + B_{5j} t^2 + B_{6j} t + B_{7j} \quad (3.8)$$

- pentru media probelor P_m

$$v_2 = B_3 t^4 + B_4 t^3 + B_5 t^2 + B_6 t + B_7 \quad (3.9)$$

- in perioada $t_2 - \infty$ ($\infty = 165 \text{ min}$) aproximarea este data de o dreapta orizontala de ecuatie:

- pentru proba Pj

$$v_{sj} = ct. \quad (3.10)$$

- pentru media probelor Pm

$$v_s = ct. \quad (3.11)$$

tangenta la curba $v_j(t)$ - pentru fiecare proba; respectiv $V(t)$ - pentru curba medie .

In fig. 3.4 se exemplifica modul de constructie grafica a curbelor $v_j(t)$ si $V(t)$ cu conditiile necesare, numai pentru curba medie. S-a recurs la o descriere de acest tip din dorinta aproximarii cat mai fidele a punctelor experimentale ordonate statistic. Curba, astfel obtinuta, o vom denumi **curba experimentală**.

Coefficientii B_{1j} , B_{2j} , B_1 , si B_2 sunt determinati din conditiile de racordare a curbelor definite de ecuatiile (3.6) si (3.8) respectiv (3.7) si (3.9), la timpul t' :

$$\begin{cases} \frac{dv_{1j}}{dt} = \frac{dv_{2j}}{dt} \\ v_{1j} = v_{2j} \end{cases} \quad \text{- pentru proba Pj} \quad (3.12)$$

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{dv_2}{dt} \\ v_1 = v_2 \end{cases} \quad \text{- pentru media probelor Pm} \quad (3.13)$$

Valoarea v_s este determinata din conditia:

$$t = t_2 \Rightarrow \begin{cases} \frac{dv_{2j}}{dt} = 0 \\ v_{2j} = v_{sj} \end{cases} \quad \text{- pentru proba Pj} \quad (3.14)$$

$$t = t_2 \Rightarrow \begin{cases} \frac{dv_2}{dt} = 0 \\ v_2 = v_s \end{cases} \quad \text{- pentru media probelor Pm} \quad (3.15)$$

Introducerea timpului t_2 , ca parametru caracteristic al curbelor $v_j(t)$ si $V(t)$, s-a facut pe baza analizei mai multor curbe, prezentate in literatura. Spre exemplificare, in Tab.3.4 sunt afisati timpii t_1 si t_2 extrasi din curbele $V(t)$, ce caracterizeaza comportarea cavitationala a materialelor citate. Se constata ca timpul de la care viteza incepe sa se stabilizeze se admite a fi $t_2 = \max 3t_1$.

In cazul materialelor pentru care viteza de eroziune cavitationala tinde spre stabilizare la $+\infty$, asa cum arata Franc [30a], pentru compararea comportarii cavitationale a materialelor, dupa viteza de eroziune, se va accepta ca stabilizarea incepe de la $t_2 = 3t_1$. In acelasi tabel s-a afisat si durata totala a atacului cavitional (Aceasta durata se incadreaza in limitele recomandate de normele ASTM [120] (2 - 3 (5))ore pentru oteluri obisnuite si 8 (30) ore pentru oteluri foarte rezistente, de tip Stellite [32, 33]).

Dupa intervalul de timp afectat vitezei de stabilizare v_s , Tab 3.4, se disting doua cazuri: unul redus cu $-t_2 < t_2$ (alama [106], fonta [91], Nichel 20.1 [91] si 41MoCr11 [133]) si unul lung cu $t_2 < \tau - t_2 < 5t_2$ (25LII [107], E04 [107], OLC45 [106] si 33MoCr11 [133]). Extinderea acestui interval depinde atat de material cat si de aparat. In fiecare din cele doua cazuri exista materiale cu comportari cavitationale bune (25LII, OLC45, 33MoCr11, 41MoCr11, Fonta) si slabe (E04, Alama, Nichel 20.1)

Toti autorii, mentionati in Tab.3.4, sisteaza testele daca in intervalul $\tau - t_2$ se obtin cel putin trei valori ale vitezei de eroziune cavitationala apropiate de v_s .

Obtinerea unui interval $\tau - t_2 = 5t_2$ pentru E04 este o exceptie. Diferenta este determinata de comportarea cavitationala a otelului care se stabilizeaza foarte repede (dupa 20 minute) si obligativitatea respectarii duratei minime de testare (2 ore), conform normelor ASTM[120].

Pe baza datelor din Tab.3.4 rezulta ca intervalul $\tau - t_2$ minim, aferent vitezei de satbilizare v_s , este $0,3t_2$. Acest interval este necesar obtinerii rezultatelor care sa convinga stabilizarea eroziunii cavitationale.

Cum materialele prezentate in Tab. 3.4 sunt testate in aparate vibratorii cu parametrii functionali diferiti se poate admite ca interval aferent vitezei de stabilizare $- t_2 = (0,3 - 3)t_2$.

Pentru materialele testate in LMHT de Sisak s.a. [133] (33MoCr11 si 41MoCr11) si altele testate de Kuzman s.a. [52, 53, 54] intervalul, in care viteza de eroziune cavitationala este stabilizata se incadreaza in limitele mentionate. Deci $t_{max} = \tau = 165$ minute poate fi acceptat ca durata totala maxima pentru atacul cavitational realizat in aparatul vibrator magnetostriktiv T1.

Valorile coeficientilor B_{1j} , B_{2j} , B_{1j} , B_{2j} , B_{3j} ... B_{7j} , B_{3j} ... B_{7j} , sunt afisate in Tab.3.5' si 3.6'

Descrierea curbelor $v_j(t)$ si $v(t)$ sub forma mentionata permite realizarea unor discutii, privind comportarea materialelor la eroziune cavitationala. Alura curbelor si valorile maxime si de stabilizare, ale vitezelor de eroziune cavitationala, asigura, de asemenea, compararea materialelor dupa rezistenta la distrugere cavitationala.

Valorile marimilor statistice, caracteristice preciziei de aproximare a punctelor experimentale, Tab. 3.5 si 3.6, sunt determinate cu relatiile:

- abaterea standard empirica (pentru zona de stabilizare $t_2 - \tau$):

$$(\tilde{\sigma}_{n-1})_j = \tau \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (a_{ji} - \bar{a}_j)^2}{n-1}} \quad \text{- pentru proba } P_j \quad (3.16)$$

$$\tilde{\sigma}_{n-1} = \tau \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (a_i - \bar{a})^2}{n-1}} \quad \text{- pentru media probelor } P_m \quad (3.17)$$

unde:

$$\bar{a}_j = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p a_{ji} \quad \text{- abaterea medie a probei } P_j \quad (3.18)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p a_i \quad \text{- abaterea medie a mediei probelor } P_m \quad (3.19)$$

- abaterile maxime si minime

Tab.3.4 Timpi caracteristici curbelor $v(t)$

Material (autorul)	t_1 min	t_2 min	γ min	$\frac{t_1}{t_2}$	$\frac{3-t_2}{t_2}$	Bibliografie
25 \bar{u} (K-Steller)	30	65	180	2,166	1,77	[107]
E04 (K-Steller)	10	20	120	2	5	[107]
Alamă (R. Martinella)	85	135	170	1,588	0,3	[106]
DLC 45 (J. Noskiewicz)	65	125	500	1,92	3	[106]
Fontă (Thiruvengadam)	30	90	140	3	0,56	[91]
Nichel 20 (Thiruvengadam)	40	120	180	3	0,5	[91]
33 Mo Cr 11 (Sisak)	37,5	67,5	165	1,8	1,44	[133]
41 MoCr 11 (Sisak)	37,5	97,5	165	2,6	0,69	[133]

Tab. 3.5 Parametrii caracteristici curbelor de aproximatie a punctelor experimentale: D32-1

Proba	$\frac{v_{max,realj}}{v_{max}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\frac{v_{maxj}}{v_{max}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\frac{v_{s,j}}{v_s}$ $\frac{mm^3}{min}$	t' min.	t_1 min.	t_2 min.	$\frac{a_{j,max}}{a_{max}}$ %	$\frac{a_{j,min}}{a_{min}}$ %	$\frac{(v_{n-1})_j}{v_{n-1}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\bar{a} : \bar{a}_j$ $\frac{mm^3}{min}$
P1	0,093	0,077	0,07	7,5	67,5	97,5	+22	-20,8	$\pm 0,073$	+0,002
P2	0,145	0,124	0,12	7,5	82,5	82,5	+19,6	-19	$\pm 0,0033$	-0,003
P3	0,11	0,098	0,098	12,5	82,5	82,5	+25	-40	$\pm 0,0042$	+0,002
Pm	0,12	0,095	0,095	7,5	82,5	82,5	+39,4	-9,8	$\pm 0,0052$	-0,003

Tab.3.6 Parametrii caracteristici curbelor de aproximatie a punctelor experimentale: Inox III-RNR

Proba	$\frac{v_{max,realj}}{v_{max}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\frac{v_{maxj}}{v_{max}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\frac{v_{s,j}}{v_s}$ $\frac{mm^3}{min}$	t' min.	t_1 min.	t_2 min.	$\frac{a_{j,max}}{a_{max}}$ %	$\frac{a_{j,min}}{a_{min}}$ %	$\frac{(v_{n-1})_j}{v_{n-1}}$ $\frac{mm^3}{min}$	$\bar{a} : \bar{a}_j$ $\frac{mm^3}{min}$
P1	0,024	0,02	0,02	7,5	82,5	82,5	+20	-29,2	0,0026	-0,002
P2	0,022	0,019	0,019	7,5	112,5	112,5	+54,5	-20	$\pm 0,0036$	+0,002
P3	0,021	0,02	0,02	25	82,5	82,5	+31	-23,5	0,023	+0,002
Pm	0,026	0,02	0,02	25	82,5	82,5	+33,2	-21,4	$\pm 0,0031$	-0,002

Tab.3.5' Coeficientii ecuatiilor ce descriu curbele $v_j(t)$

Material	Nr. probă P_j	B_{1j} mm^3/min^3	B_{2j} mm^3/min^2	B_{3j} mm^3/min^5	B_{4j} mm^3/min^4	B_{5j} mm^3/min^3	B_{6j} mm^3/min^2	B_{7j} mm^3/min
D-32 - 1	P_1	$5,335 \cdot 10^{-5}$	0,002	$-6,008 \cdot 10^{-10}$	$3,563 \cdot 10^{-7}$	$-6,201 \cdot 10^{-5}$	$3,941 \cdot 10^{-3}$	$-6,196 \cdot 10^{-3}$
	P_2	$-4,168 \cdot 10^{-5}$	0,004	0	$1,362 \cdot 10^{-7}$	$-4,1007 \cdot 10^{-5}$	$3,958 \cdot 10^{-3}$	$1,529 \cdot 10^{-4}$
	P_3	$-2,167 \cdot 10^{-4}$	0,007	$-6,168 \cdot 10^{-11}$	$3,543 \cdot 10^{-8}$	$-9,918 \cdot 10^{-6}$	$1,338 \cdot 10^{-3}$	$3,244 \cdot 10^{-2}$
Otel inox III RNR	P_1	$-4,65 \cdot 10^{-5}$	0,001	0	$8,926 \cdot 10^{-9}$	$-3,568 \cdot 10^{-6}$	$4,469 \cdot 10^{-4}$	$2,422 \cdot 10^{-3}$
	P_2	$-1,553 \cdot 10^{-4}$	0,002	0	$-1,144 \cdot 10^{-9}$	$7,385 \cdot 10^{-8}$	$8,199 \cdot 10^{-5}$	$8,739 \cdot 10^{-3}$
	P_3	$-1,61 \cdot 10^{-5}$	$6,848 \cdot 10^{-4}$	$9,421 \cdot 10^{-10}$	$-3,279 \cdot 10^{-7}$	$3,723 \cdot 10^{-5}$	$-1,426 \cdot 10^{-3}$	$2,419 \cdot 10^{-2}$

Tab.3.6' Coeficientii ecuatiilor ce descriu curbele $v(t)$

Material	B_1 mm^3/min^3	B_2 mm^3/min^2	B_3 mm^3/min^5	B_4 mm^3/min^4	B_5 mm^3/min^3	B_6 mm^3/min^2	B_7 mm^3/min
D 32 - 1	$-7,786 \cdot 10^{-6}$	0,002	0	$9,0457 \cdot 10^{-8}$	$-2,1524 \cdot 10^{-4}$	$2,8484 \cdot 10^{-3}$	$-3,8309 \cdot 10^{-3}$
Otel inox III RNR	$-6,939 \cdot 10^{-6}$	$4,62 \cdot 10^{-4}$	0	$-7,6021 \cdot 10^{-9}$	$9,4687 \cdot 10^{-8}$	$2,5641 \cdot 10^{-4}$	$1,5312 \cdot 10^{-3}$

$$\sigma_{j \max}^{\min} = \frac{v_j - v_{j \min, \max}}{v_j} \cdot 100 \quad \text{- pentru proba } P_j \quad (3.20)$$

$$\sigma_{\max}^{\min} = \frac{v - v_{\min, \max}}{v} \cdot 100 \quad \text{pentru media probelor } P_m \quad (3.21)$$

unde

v_j, v_c - viteza de eroziune cavitacionala obtinuta experimental, pentru proba P_j respectiv media probelor P_m , in mm^3/min ,

v_j, v - viteza de eroziune cavitacionala, data de curba de aproximatie a probei P_j respectiv P_m , corespunzatoare aceluiasi timp la care se considera v_j respectiv v_c , in mm^3/min .

Dispersia punctelor experimentale si evolutia curbelor din fig.3.5 si 3.6, evidentiaza comportarile cavitationale, diferite, ale probelor testate. Cauzele acestor evolutii si distributii, ale punctelor experimentale, fata de aceste curbe cu abateri relative de pana la $a_{j \max} = 40\%$ pentru D 32-1 (proba P_3) respectiv $a_{j \max} = 54,5\%$ pentru Inox III-RNR (proba P_2), sunt determinate de:

1. - material, prin: proprietatile fizico -mecanice, concentratia elementelor chimice componente, raportul constituintilor structurali, microstructura, etc.[63, 35a, 115],

2. - aparatul vibrator, prin: variatia parametrilor functionali A, f si temperatura lichidului de lucru, chiar si pentru perioade scurte, in limitele admise de standardul american ASTM [120].

Din aceste motive, toti cercetatorii compara materialele, dupa rezistenta la eroziune cavitacionala, pe baza vitezelor de eroziune cavitacionala medii, $v(t)$, sau valorilor medii ale celorlalti parametri caracteristici, prezentati in Cap. I.

In continuare se prezinta curbele $v(t)$ pe grupe de materiale, astfel:

- 1.- oteluri nealiat si fonte, fig. 3.5,
- 2.- oteluri aliate pentru constructii, fig. 3.6,
- 3.- oteluri inoxidabile, fig 3.7,
- 4.- bronzuri si alame navale, fig.3.8.

In fig. 3.9 si 3.10 sunt prezentate aspecte ale suprafetelor probelor, testate in aparatul vibrator T1, la inceputul si sfarsitul perioadei totale de atac cavitacional.

Fotografiile evidentiaza distrugerea realizata dupa 165 minute de atac cavitacional.

In fig.3.10 sunt prezentate distrugerile realizate in suprafetele protejate prin rasini epoxidice si vopsele. Analiza acestor distrugereri, pe baza curbelor caracteristice sau valorilor parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale, nu s-a realizat datorita rezultatelor nesatisfacatoare, obtinute. Prezentarea distrugerilor in aceste suprafete are drept scop evidentierea capacitatii distructive a aparatului si modului de producere a rupei; cavernele realizate, in special in rasilile epoxidice, sunt elocvente, duratele de atac nedepasind 15 minute [78, 128].

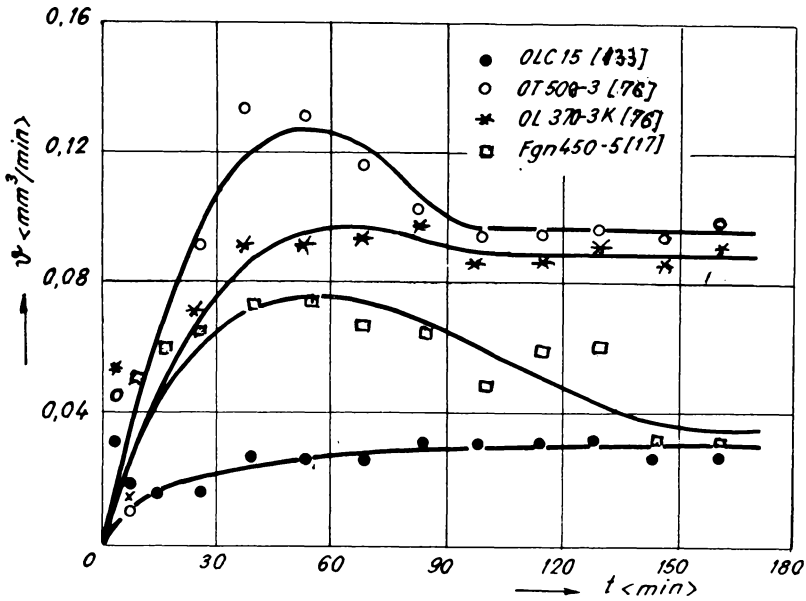


Fig.3.5 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (oteluri carbon si fonte - T1)

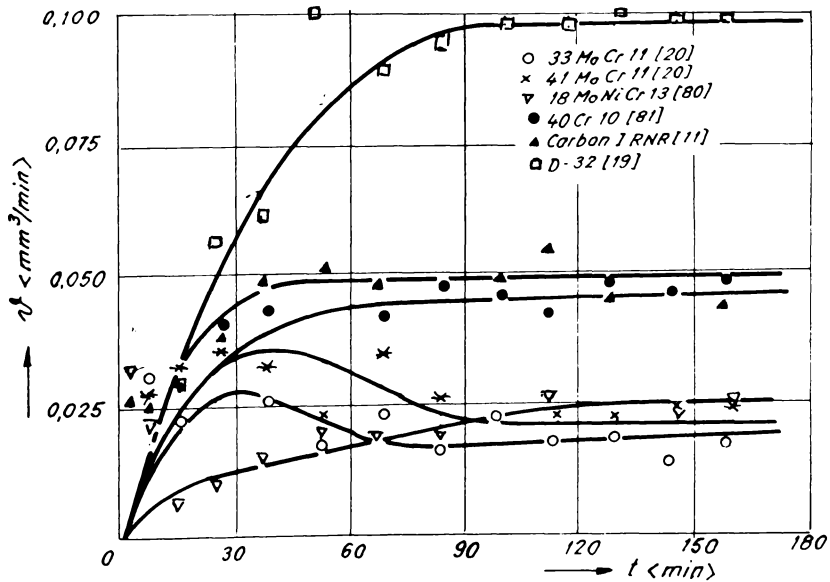


Fig. 3.6 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (oteluri aliate pentru constructii - T1)

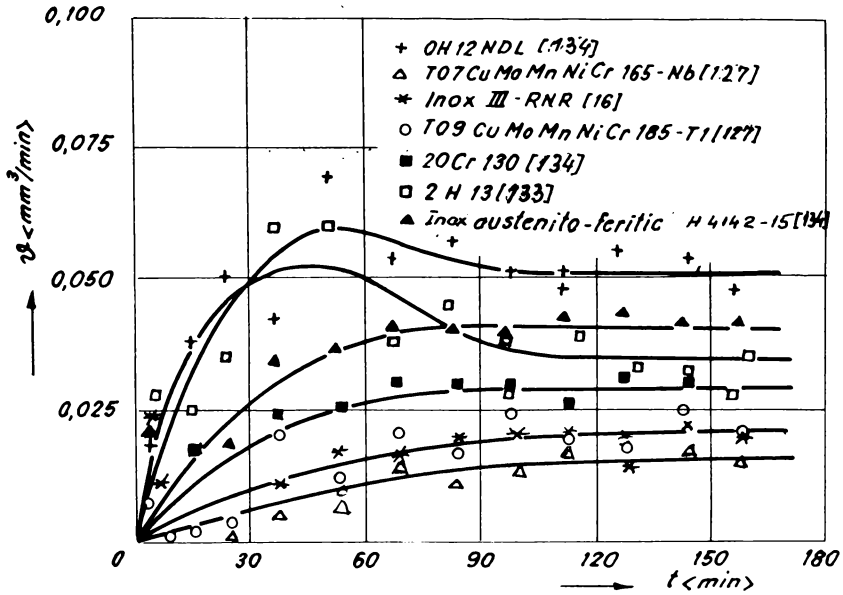


Fig. 3.7 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (oteluri inoxidabile - T1)

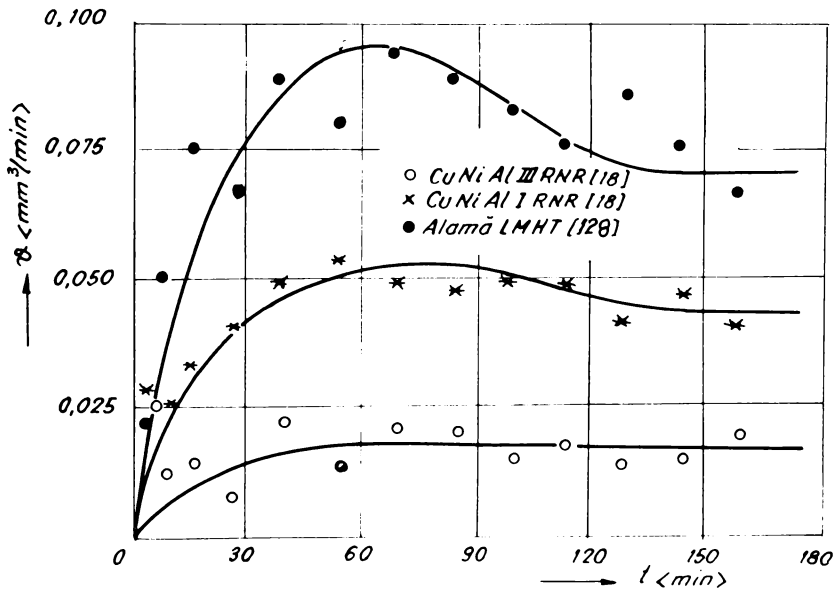


Fig. 3.8 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (bronzuri si alame navale - T1)

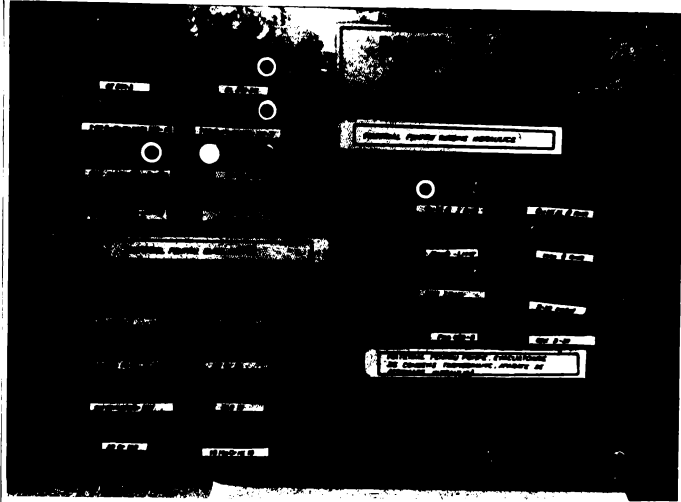


Fig.3.9 Probe distruse prin eroziune cavitionala in aparatul vibrator magnetostriectiv T1 [76,133,134]

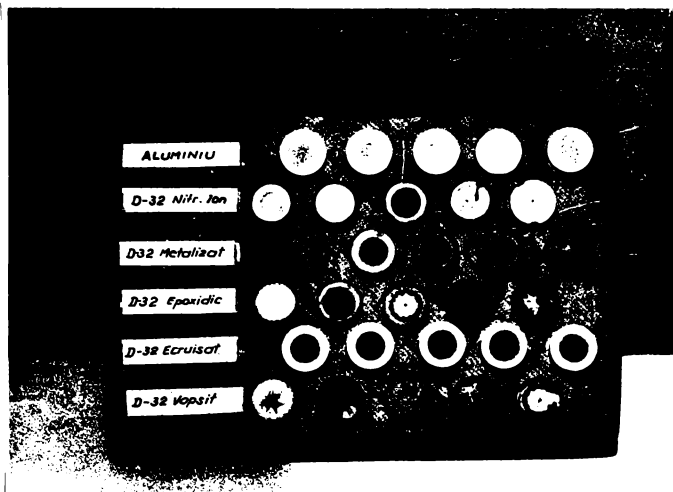


Fig.3.10 Suprafete protejate prin diferite metode si distruse cavitional in aparatul vibrator magnetostriectiv T1

Coefficientii B_1, B_2, \dots, B_7 din relațiile (3.7) și (3.9) ce descriu curbele vitezelor de eroziune cavitațională $v(t)$, determinați pe baza condițiilor precizate anterior, sunt afișați în Tab.3.7, iar marimile statistice și timpii caracteristici acestor curbe sunt prezentați în Tab.3.8. Pe baza timpilor t_1 și t_2 , Tab.3.8, de atingere a valorilor maxime și de stabilizare ale vitezelor de eroziune cavitațională, s-au construit histogramele de frecvență din fig. 3.11 și 3.12. Acestea oferă concluzii privind legătura dintre capacitatea distructivă a aparatului, rezistența cavitațională și ceilalți factori legați de calitatea materialului (structura, elemente chimice componente, tehnologie de fabricație și proprietăți fizico - mecanice) și permit stabilirea timpilor de referință pentru cele patru grupe de materiale.

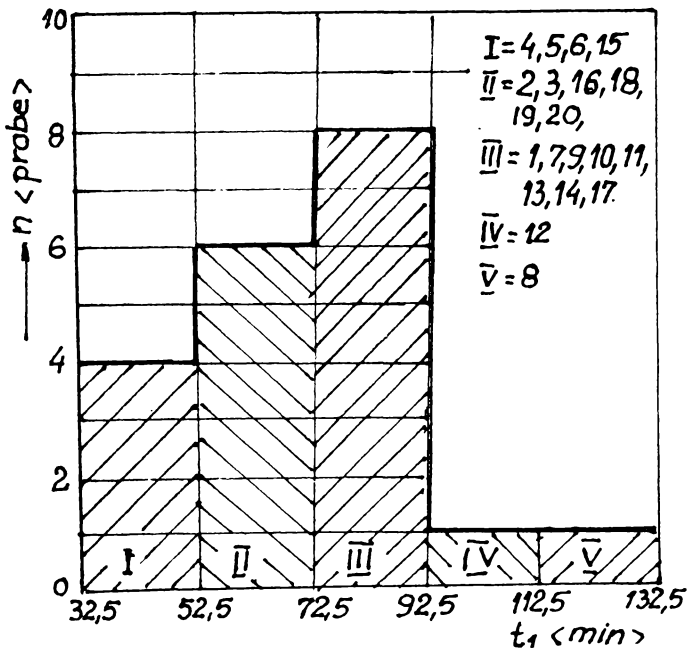


Fig.3.11 Frecvența timpului t_1 de atingere a vitezei maxime, v_{max}

Tab. 3.7 Coeficientii ecuatiilor ce definesc curbele $v(t)$ -T1

Material	B1 mm ³ /min ³	B2 mm ³ /min ²	B3 mm ³ /min ⁵	B4 mm ³ /min ⁴	B5 mm ³ /min ³	B6 mm ³ /min ²	B7 mm ³ /min
DL C 15	-6,133 · 10 ⁻⁵	0,002	0	-4,222 · 10 ⁻⁹	-5,8843 · 10 ⁻⁷	2,7253 · 10 ⁻⁴	1,363 · 10 ⁻²
OT 500 - 3	-4,538 · 10 ⁻⁵	0,005	0	2,9497 · 10 ⁻⁷	-8,089 · 10 ⁻⁵	6,127 · 10 ⁻³	-1,299 · 10 ⁻²
DL 370 - 3 K	-3,403 · 10 ⁻⁵	0,004	0	2,0484 · 10 ⁻⁷	-5,1823 · 10 ⁻⁵	4,0936 · 10 ⁻³	-4,7188 · 10 ⁻³
F 90 450 - 5	38,331	-574,96	0	8,518 · 10 ⁻⁸	-2,7154 · 10 ⁻⁵	2,2499 · 10 ⁻³	2,1986 · 10 ⁻²
33 Mo Cr 11	-4,01 · 10 ⁻⁵	0,002	0	2,8327 · 10 ⁻⁷	-4,3405 · 10 ⁻⁵	2,0142 · 10 ⁻³	7,1785 · 10 ⁻⁴
41 Mo Cr 11	-4,653 · 10 ⁻⁵	0,002	0	1,4746 · 10 ⁻⁷	-3,0853 · 10 ⁻⁵	1,7705 · 10 ⁻³	4,5029 · 10 ⁻⁴
40 Cr 10	-7,305 · 10 ⁻⁵	0,003	-1,0377 · 10 ⁻¹⁰	7,6391 · 10 ⁻⁸	-1,3576 · 10 ⁻⁵	1,0426 · 10 ⁻³	1,4778 · 10 ⁻²
18 Mo Cr Ni 13	-6,628 · 10 ⁻⁵	0,002	0	-1,6768 · 10 ⁻⁸	3,9037 · 10 ⁻⁶	-1,9378 · 10 ⁻⁴	1,5678 · 10 ⁻²
Carbon I RNR	-6,376 · 10 ⁻⁵	0,003	0	4,4675 · 10 ⁻⁸	-1,9223 · 10 ⁻⁷	1,6521 · 10 ⁻³	1,0276 · 10 ⁻²
D 32 - 1	-7,786 · 10 ⁻⁶	0,002	0	9,0477 · 10 ⁻⁸	-2,7524 · 10 ⁻⁴	2,8484 · 10 ⁻³	-3,8309 · 10 ⁻³
Inox III RNR	-6,939 · 10 ⁻⁶	0,002	0	-7,6027 · 10 ⁻⁹	9,4687 · 10 ⁻⁸	2,5647 · 10 ⁻⁴	3,1932 · 10 ⁻³
T 07 Cu Mo Mn Ni Cr 185-N6	-9,534 · 10 ⁻⁶	3,566 · 10 ⁻⁴	9,6755 · 10 ⁻¹¹	-3,9904 · 10 ⁻⁸	4,6862 · 10 ⁻⁶	-4,4408 · 10 ⁻⁵	2,9448 · 10 ⁻³
T 09 Cu Mo Mn Ni Cr 165-T1	-4,501 · 10 ⁻⁶	4,744 · 10 ⁻⁴	0	6,2602 · 10 ⁻⁹	-2,8887 · 10 ⁻⁸	4,2813 · 10 ⁻⁴	4,0506 · 10 ⁻⁴
20 Cr 130	-1,543 · 10 ⁻⁵	0,001	0	2,379 · 10 ⁻⁸	7,3533 · 10 ⁻⁶	7,6635 · 10 ⁻⁴	1,9764 · 10 ⁻³
2 H 13	-8,321 · 10 ⁻⁵	0,004	0	1,3873 · 10 ⁻⁷	-3,1886 · 10 ⁻⁵	2,0335 · 10 ⁻³	1,2483 · 10 ⁻²
OH 12 NDL	-1,796 · 10 ⁻⁵	0,002	0	1,5887 · 10 ⁻⁷	-3,4649 · 10 ⁻⁵	2,6322 · 10 ⁻³	2,8768 · 10 ⁻³
Inox austenitic H4142-15	-1,33 · 10 ⁻⁶	0,001	0	2,8474 · 10 ⁻⁸	-9,3028 · 10 ⁻⁶	1,1175 · 10 ⁻³	3,1971 · 10 ⁻⁴
Cu Ni Al III RNR	-4,221 · 10 ⁻⁵	0,002	0	1,7222 · 10 ⁻⁸	-4,2787 · 10 ⁻⁶	3,8669 · 10 ⁻⁴	8,5359 · 10 ⁻³
Cu Ni Al I RNR	-6,937 · 10 ⁻⁵	0,003	0	3,8973 · 10 ⁻⁸	-1,3107 · 10 ⁻⁵	1,2935 · 10 ⁻³	1,2917 · 10 ⁻²
Alama	3,339 · 10 ⁻⁶	0,004	0	1,0658 · 10 ⁻⁷	-3,215 · 10 ⁻⁵	2,7643 · 10 ⁻³	2,1672 · 10 ⁻²

Tab. 3.8 Marimi statistice si timpi caracteristici - T1

Nr. crt.	Material	Perioada <min>										t'	t ₁ min	t ₂ min	Bibliografie		
		t' - t ₂					t ₂ - 165										
		O _{max} mm ³ /min	O _{min} mm ³ /min	O _{max} mm ³ /min	O _{min} mm ³ /min	O _{max} mm ³ /min	O _{min} mm ³ /min	O _{max} mm ³ /min	O _{min} mm ³ /min	O _{max} mm ³ /min	O _{min} mm ³ /min						
1	DLC 15	+0,005	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	15	82,5	82,5	[133]
2	OT 500 - 3	+0,006	-0,015	+0,003	-0,003	+0,003	-0,002	+0,003	-0,002	+0,003	-0,002	+0,003	-0,002	25	52,5	82,5	[76]
3	OL 370 - 3K	+0,003	-0,003	+0,001	-0,001	+0,001	-0,001	+0,001	-0,001	+0,001	-0,001	+0,001	-0,001	25	67,5	97,5	[76]
4	Fgn 450 - 5	+0,012	-0,018	+0,005	-0,018	+0,005	-0,004	+0,005	-0,004	+0,005	-0,004	+0,005	-0,004	15	37,5	142,5	[177]
5	33 Mo Cr 11	+0,005	-0,006	+0,007	-0,006	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	15	37,5	67,5	[40]
6	41 Mo Cr 11	+0,01	-0,008	+0,002	-0,008	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	15	37,5	97,5	[20]
7	40 Cr 10	+0,004	-0,006	+0,001	-0,006	+0,001	-0,006	+0,001	-0,006	+0,001	-0,006	+0,001	-0,006	25	82,5	82,5	[81]
8	18 Mo Cr Ni 13	+0,008	-0,003	+0,002	-0,003	+0,002	-0,002	+0,002	-0,002	+0,002	-0,002	+0,002	-0,002	30	127,5	127,5	[80]
9	Carbon I RNR	+0,012	-0,005	+0,005	-0,005	+0,005	-0,005	+0,005	-0,006	+0,005	-0,006	+0,005	-0,006	15	82,5	82,5	[9]
10	D 32 - 1	+0,013	-0,005	+0,004	-0,005	+0,004	-0,002	+0,004	-0,002	+0,004	-0,002	+0,004	-0,002	15	82,5	82,5	[15]
11	Inox II RNR	+0,003	-0,003	+0,007	-0,003	+0,007	-0,006	+0,007	-0,006	+0,007	-0,006	+0,007	-0,006	15	82,5	82,5	[16]
12	T07 Cu Mo Mn Ni Cr 165-M	+0,006	-0,001	+0,007	-0,001	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	+0,007	-0,009	7,5	112,5	112,5	[127]
13	T09 Cu Mo Mn Ni Cr 185-T	+0,006	-0,009	+0,004	-0,009	+0,004	-0,003	+0,004	-0,003	+0,004	-0,003	+0,004	-0,003	7,5	82,5	82,5	[127]
14	20 Cr 130	+0,008	-0,006	+0,003	-0,006	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	7,5	82,5	82,5	[134]
15	2 H 13	+0,01	-0,01	+0,007	-0,003	+0,007	-0,003	+0,007	-0,003	+0,007	-0,003	+0,007	-0,003	7,5	37,5	97,5	[133]
16	OH 12 NDL	+0,01	-0,008	+0,003	-0,008	+0,003	-0,007	+0,003	-0,007	+0,003	-0,007	+0,003	-0,007	2,5	52,5	97,5	[134]
17	Inox aust feritic H4142-15	+0,003	-0,004	+0,003	-0,004	+0,003	-0,004	+0,003	-0,004	+0,003	-0,004	+0,003	-0,004	7,5	82,5	82,5	[134]
18	Cu Ni Al II RNR	+0,009	-0,002	+0,003	-0,002	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	7,5	22,5	97,5	[18]
19	Cu Ni Al I RNR	+0,006	-0,012	+0,003	-0,012	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	+0,003	-0,003	15	67,5	127,5	[18]
20	Alumina	+0,02	-0,018	+0,005	-0,018	+0,005	-0,012	+0,005	-0,012	+0,005	-0,012	+0,005	-0,012	15	67,5	127,5	[128]

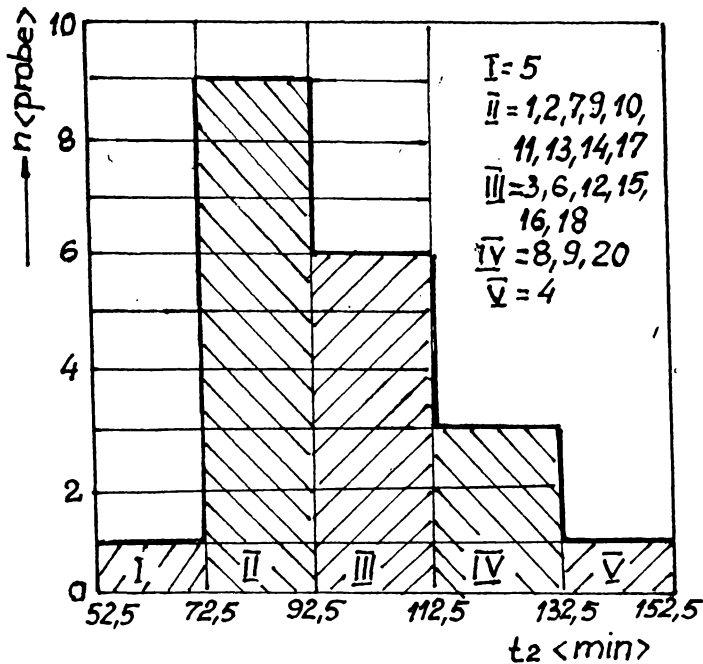


Fig.3.12 Frecventa timpului t_2 , de la care se stabilizeaza viteza de eroziune cavitacionala, v_s

3.2.2.2 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale

Principalii parametrii utilizati in lucrare, pentru caracterizarea comportarii materialelor la eroziune cavitacionala, sunt prezentati in tab.3.9 si au semnificatiile:

1.- viteza maxima a eroziunii cavitationale $v_{max,r}$ (viteza de eroziune instantanee maxima, obtinuta experimental, dupa care viteza de eroziune devine descrescatoare - recomandata de [120]), respectiv v_{max} (valoarea maxima a vitezei de eroziune cavitacionala definita de curba experimentală $v(t)$ - recomandata de Plesset si Devine [3], Hobbs [41]). In ultimul timp, majoritatea cercetatorilor folosesc viteza v_{max} [31, 40a, 65, 91, 127, 133].

2. - viteza de stabilizare (stationare) a eroziunii v_s (viteza finala de palier care se atinge, sau spre care se tinde asimptotic, dupa ce viteza a descrescut de la valoarea ei maxima - recomandata de Thiruvengadam [111, 113] si folosita cel mai des in compararea materialelor, dupa rezistenta la cavitate [8, 9 - 20, 30, 43, 50, 68, 78 - 89, 107, 111, 113]).

Tab. 3.9 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale (T1)

Grupa	Material	V_{maxr} mm ³ /min	V_{maxc} mm ³ /min	$V_{maxc} - V_{maxr}$ mm ³ /min	V_s mm ³ /min	R_{nmax}	R_{ns}	Bibliografie
Fontă și oțeluri carbon	OLC 15	0,033	0,03	-0,003	0,03	0,67	0,67	[133]
	OT 500-3	0,133	0,13	-0,003	0,1	2,88	2,22	[76]
	DL 370-3K	0,098	0,098	0	0,092	2,17	2,04	[76]
	Egn 450-5	0,076	0,077	+0,001	0,037	1,77	0,82	[17]
Oțeluri aliate pentru construcții	33 Mo Cr 11	0,03	0,027	-0,003	0,017	0,6	0,38	[20]
	41 Mo Cr 11	0,036	0,035	-0,001	0,02	0,77	0,44	[20]
	40 Cr 10 (etalon)	0,047	0,045	-0,002	0,045	1,0	1,0	[81]
	18 Mo Cr Ni 13	0,027	0,025	-0,002	0,025	0,55	0,55	[80]
	Carbon IRNR	0,052	0,048	-0,004	0,048	1,07	1,07	[9]
	D 32-1	0,012	0,095	-0,007	0,095	2,11	2,11	[15]
Oțeluri inoxidabile	Inox III RNR	0,026	0,02	-0,006	0,02	0,44	0,44	[16]
	T07CuMoMnNiCr165	0,025	0,016	-0,009	0,016	0,36	0,36	[127]
	T09CuMoMnNiCr185	0,023	0,02	-0,003	0,02	0,44	0,44	[127]
	20 Cr 130	0,03	0,028	-0,002	0,028	0,62	0,62	[134]
	2 H 13	0,061	0,051	-0,01	0,035	1,13	0,77	[133]
	0H 12 NDL	0,0675	0,06	-0,0075	0,052	1,33	1,16	[134]
	Inox aust. ferit. H4142-15	0,043	0,04	-0,003	0,04	0,88	0,88	[134]
Bronz și alame	Cu Ni Al III RNR	0,021	0,018	-0,003	0,017	0,4	0,38	[18]
	Cu Ni Al I RNR	0,052	0,052	0	0,044	1,16	0,98	[18]
	Alame	0,09	0,095	+0,005	0,072	2,11	1,6	[127]

Tab.3.9 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale (continuare) (T1)

Grupa	Material	$d_{pot\bar{a}}$ mm	V_2 mm ³	M DPR mm/h _r	$\frac{1}{M DPR}$ h _r /mm	Bibliogra- fic
Fonte și oteluri carbon	DLC 15	9,8	4,32	0,0208	48	[133]
	OT 500-3	9,8	15,11	0,0728	13,73	[76]
	OL 370-3K	9,8	12,8	0,0617	16,2	[76]
	Fgn 450-5	9,8	7,95	0,0383	26,1	[17]
Oteluri aliate ptr. constructii	33 Mo Cr 11	9,8	4,24	0,0170	58,8	[20]
	41 Mo Cr 11	9,8	5,1	0,02457	40,7	[20]
	40 Cr 10	9,8	6,7	0,03226	31	[81]
	18 Mo Cr Ni 13	9,8	3,14	0,01513	66,1	[80]
	Carbon [RNR	9,8	7,4	0,03567	28,03	[9]
	D 32-1	9,8	14,58	0,07032	14,22	[15]
Oteluri inoxidabile	Inox III RNR	9,8	2,73	0,01316	76	[16]
	T07Cu7Mo7MnNiCr16S-Nb	9,8	2,6	0,01205	83	[127]
	T09Cu7Mo7MnNiCr18S-N	9,8	2,65	0,01258	79,5	[127]
	20 Cr 130	9,8	5,22	0,02579	39,7	[134]
	2 H 13	9,8	7,38	0,03557	28,11	[133]
	OH 12 NDL	9,8	7,36	0,03546	28,2	[134]
	Inox austenito- fentic H4142-15	9,8	7,26	0,0350	28,57	[134]
Bronze și alame	CuNiAl III RNR	9,8	2,72	0,01311	76,3	[18]
	CuNiAl I RNR	9,8	5,43	0,02618	38,2	[18]
	Alame	9,8	12,65	0,06098	16,4	[128]

h_r=ore

3. - rezistența normalizată la cavitație $R_{n\max} = \sqrt{v_{\max}/v_{\max e}}$, respectiv $R_{nS} = v_s/v_{se}$. Maximile cu indicele "e" se referă la oțelul etalon, pentru LMHT, 40Cr10. Deși este recomandată de normele ASTM [120] utilizarea sa este redusă din cauza inexistenței unui material etalon pentru toate laboratoarele existente în lume [40a, 79, 111].

4. - viteza adâncirii medii a eroziunii cavitaționale MDP, respectiv inversul acesteia $1/MDP$. Acest parametru este recomandat de normele ASTM [120] și folosit, foarte mult, de Garcia [32, 33], Hammitt [39, 40, 40a], K. Steller [101], J. Steller [106, 107], Hobbs [41].

Principiul determinării parametrului MDP este definit de normele americane ASTM [120], astfel: "Se determină adâncimea medie de pătrundere MDP prin împărțirea pierderii de masă la densitatea materialului și aria suprafeței erodate cavitațional. MDP se calculează prin împărțirea adâncirii medii de pătrundere, MDP, la durata totală a atacului cavitațional"

Pentru rapiditatea calculelor, la determinarea parametrului MDP, normele ASTM recomandă "utilizarea ariei suprafeței frontale a probelor ($d/4$: d-diametrul probei)"

În compararea rezultatelor, ce dau comportarea cavitațională a materialelor, foarte mulți autori folosesc parametrul "maximul vitezei adâncirii medii de pătrundere, MDP_{\max} [30a, 33, 40b, 41a, 50a], sau inversul, $1/MDP_{\max}$ [32, 65]."

Din literatura rezultă două cai de calcul a acestui parametru. Se citează, în continuare, modul în care acesta s-a determinat de unii autori.

Dupa Knapp s.a. [50a], p.405-406 (traducere din limba engleză): "... media MDP este tangenta dintre MDP și timp pentru acele materiale care au o relație liniară între pierdere și timp (uzual după neglijarea primei porțiuni a lui $MDP(t)$), sau este MDP împărțit la timp, după o încercare îndelungată, pentru materialele la care nu se obține o astfel de relație liniară"

Dupa Hammitt și Bhatt [40b], p.4 (traducere din limba engleză): "... Viteza maximă a pierderii de greutate și viteza MDP sunt determinate din curbele mediate ($MDP(t)$ - precizarea aparține autorului tezei)... extrapolând porțiunea cu viteza maximă de distrugere până la abscisa (până la pierdere zero)".

Definiția este asemănătoare cu cea dată, în prima parte, de Knapp [50a] și arată că parametrul MDP_{\max} este tangenta unghiului maxim făcut de o dreaptă tangenta la curba $MDP(t)$ și abscisa (axa timpului).

Este de la sine înțeles că între valorile parametrului MDP_{\max} calculate pe baza tangentei unghiului maxim și a raportului MDP_{\max}/t_{\max} apar diferențe.

J. Steller [106], K. Steller [107] și Garcia [32,33] determină parametrul MDP_{\max} prin împărțirea lui MDP_{\max} la durata maximă a atacului cavitațional. S-a procedat sub această formă deoarece nu există o relație liniară $MDP-t$ (Definiția după Knapp [50a], partea a doua). Se precizează că Garcia [32,33] folosește notația MDP, deși valorile caracterizează pe MDP_{\max} (Tab.6, p.258 [32]). Spre certificare în Tab.1.4 sunt afișate câteva din valorile inverse ale lui MDP_{\max} , extrase din Tab.6 [32]

Hammitt și Bhatt [40b] determină parametrul MDP_{\max} pe baza tangentei unghiului maxim datorită liniarității $MDP-t$.

Atât Garcia [32, 33] cât și Hammitt [40a, 40b] utilizează, la calculul parametrului MDP, aria suprafeței frontale a probei ($d/4$; $d = 14$ mm, $d_{real} = 14,3$ mm).

Steller J. [106] si Steller K [107], folosesc aria suprafetei erodate cavitationale ($d_{pata}/4$).

In cadrul tezei calculul parametrului MDPR_{max} s-a realizat dupa metoda lui Steller si Garcia dar folosind volumul final obtinut prin eroziune cavitationala dupa durata maxima de inecare, $t_{max} = \tau = 165$ minute. Suprafata considerata fiind cea erodata cavitational.

Deoarece Garcia [32, 33], Hammitt [40a,40b] si Sakai-Shima [95a] utilizeaza (in tabele si legendele diagramelor) notatia MDPR in loc de MDPR_{max}, in teza s-a folosit numai notatia MDPR.

In Tab.3.9 mai sunt prezentati: diametrul urmei, obtinut dupa 165 minute de atac cavitational, d_{pata} , si volumul erodat in acest timp V .

Diametrul urmei s-a masurat pe patru probe, din materiale diferite (otel naval D 32-1, inox III-RNR, OL370-3k si 40Cr10), la microscopul optic cu scara gradata. Pentru fiecare proba s-au realizat cate doua masuratori, dupa doua diametre perpendiculare. Valorile obtinute s-au mediat aritmetic si s-au rotunjit la zecimala. Valoarea astfel obtinuta s-a considerat a fi aceeași pentru toate probele testate in aparatul vibrator T1 ($d_{pata} = 9,8$ mm).

Relatia de calcul a vitezei adancimii medii de patrundere este:

$$MDPR = \frac{4 \cdot V_z}{\pi d_{pata}^2} \cdot \frac{60}{\tau} \quad \langle mm/hr \rangle \quad (3.22)$$

$hr \equiv ore$

Diferentele mici ($-0,009 \div +0,005$ mm³/min) dintre valorile vitezelor maxime, obtinute experimental si definite de curba $v(t)$, arata ca modelul matematic propus pentru descrierea curbei de aproximare a punctelor experimentale este bun.

3.2.3 Discutii si concluzii

Investigarea comportarii cavitationale a materialelor, testate in aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, se va efectua pe baza curbilor $v(t)$ prezentate in fig.3.5 ÷ 3.8, pe fiecare grupa in parte.

a) Oteluri carbon nealiate si fonte, fig.3.5

Materialele prezentate in fig.3.5 pot fi grupate in doua categorii: OL370-3k cu OT500-3, cu comportari cavitationale asemanatoare (in general slabe) si OLC 15 cu fonta Fgn 450-5, cu comportari cavitationale mai bune, dar care pot fi discutate distinct.

Pentru fonta cu grafit nodular se constata, in prima perioada, o viteza mare de eroziune, generata de eliminarea rapida a incluziunilor nodulare de carbon [35a, 64, 115], a caror rezistenta, la cavitatie, este practic nula [44]. In continuare viteza de eroziune cavitationala scade considerabil datorita atacului asupra masei metalice, mult mai rezistenta [44]. Cu toate acestea, chiar in perioada de palier apar oscilatii importante ale rezistentei la cavitatie.

Otelul OLC 15 are o comportare cavitationala mult mai constanta, ceea ce arata ca suprafata supusa atacului este constant erodata.

Se remarca, de asemenea o comportare diferita pana in jurul minutului 70. Astfel, la otelul OLC 15 viteza de eroziune cavitationala creste si se stabilizeaza la valoarea maxima iar la otelurile OL 370-3k si OT 500-3 si fonta Fgn 450-5 viteza de eroziune cavitationala se stabilizeaza dupa atingerea unui maxim. Aceste evolutii evidentiaza multitudinea factorilor dependenti de material (constituenti structurali, retea cristalina, compozitia chimica, proprietati mecanice, omogenitate structurala, tehnologie de elaborare) si tehnologia de prelucrare a suprafetei probei, supuse atacului cavitional, ce influenteaza rezistenta la cavitate si modul de folosire a energiei absorbite de material in timpul distrugerii.

b) Oteluri aliate pentru constructii, fig.3.6

Spre deosebire de otelurile carbon nealiate, la aceste oteluri (cu exceptia lui D 32-1) se remarca, in zona de palier, o comportare cavitationala constanta, dovedind rolul benefic al elementelor de innobilare asupra rezistentei cavitationale, prin imbunatatirea caracteristicilor mecanice, intarirea legaturilor cristaline si finisarea structurii [35a, 65, 115].

Dintre otelurile, prezentate in aceasta figura, otelul naval D 32-1 are cea mai slaba rezistenta cavitationala, similar otelurilor OL 370-3k si OT 500-3. Explicatia acestui fenomen este data in Cap.4.

Cele mai bune comportari cavitationale la prezinta otelurile 33MoCr11, 41MoCr11 si 18MoCrNi13; curbele $v(t)$, in zona de stabilizare, situandu-se in domeniul dispersiilor.

Otelul 40Cr10 (etalon) si Carbon I-RNR au comportari aproape identice, datorita compozitiilor apropiate, Tab.3.1, care le confera structuri asemanatoare, Tab.3.2.

La fel ca la otelurile carbon nealiate si aici se observa comportarea cavitationala diferita pana in minutul 70. Astfel, la otelurile 40Cr10, Carbon I-RNR, D 32-1 si 18MoCrNi13 viteza de eroziune cavitationala se stabilizeaza la valoarea maxima, iar la restul otelurilor, din aceasta figura, viteza de eroziune cavitationala se stabilizeaza dupa atingerea maximului. Fenomenul este legat de cele afirmate la punctul a). Se observa ca otelul D 32-1 are, practic, o rezistenta cavitationala de aproximativ doua ori mai mica decat otelul etalon 40Cr10 (cu buna rezistenta cavitationala [81]).

c) Oteluri inoxidabile, fig.3.7

La aceste oteluri se observa, cel mai bine, influenta elementelor de aliere asupra rezistentei cavitationale a materialelor. Cu exceptia otelurilor austenito-fertic H4142-15, 2H13 si 20Cr130 celelalte oteluri au comportari cavitationale asemanatoare, curbele $v(t)$, din zona de stabilizare, situandu-se in domeniul dispersiilor.

Se remarca stabilizarea vitezei de eroziune cavitationala la valoarea maxima, pentru toate otelurile. Acest aspect dovedeste ca legea $v(t)$ stabilita de Thiruvengadam, fig.1.12, nu este general valabila, ea depinzand atat de material cat si de statiune de incercare. De fapt, acest fenomen a fost sesizat si de Steller [107], Franc [30a] si Noskievici [69].

Se observa, de asemenea comportarea cavitationala identica a otelurilor T09CuMoMnNiCr185-Ti si Inox II-RNR, care au tehnologii de elaborare si cantitati procentuale de elemente de innobilare principale Ni, Cr, Mn diferite.

Rezistența la eroziune cavitațională, mai slabă a oțelului turnat austenitoferitic H4142-15 față de oțelurile inoxidabile T09CuMoMnNiCr185-Ti și T07CuMoMnNiCr165-Nb, de asemenea turnate, este legată de prezența elementelor Mn și S, în proporții mai mari la primul, Tab.3.1, care duc la o structură fragilă și fibroasă reducând rezistența la oboseală [35a, 64, 65, 115].

Comportarea diferită a inoxurilor 2H13 [126a, 133] și 20Cr130 [124, 134], similare, mai evidentă în prima parte a distrugerii cavitaționale, se datorează diferențelor de proprietăți și cantități de elemente chimice, ce pot exista, admise a fi aceleași, din lipsa datelor în sursa de informație [133].

d) Bronzuri și alame navale, fig.3.8

Datorită omogenității structurale, specifice acestor materiale [121], comportarea la eroziune cavitațională este normală, vitezele de eroziune în zona de stabilizare fiind aproape constante.

Evident bronzul CuNiAl III-RNR are cea mai bună comportare ca urmare, în primul rând, a celor mai bune proprietăți mecanice, Tab.3.2, iar alama, așa cum era de așteptat, datorită slăbelor caracteristici mecanice, Tab.3.2, are cea mai slabă rezistență cavitațională. Rezistența cavitațională, mai mare, a bronzurilor CuNiAl se datorează și prezenței elementelor de aliere Ni și Mn, care sporesc proprietățile mecanice [35a, 65, 115] și implicit această rezistență.

Și la aceste aliaje se observă o comportare diferită în prima parte a distrugerii cavitaționale. Dacă la CuNiAl I-RNR și alama viteză de eroziune prezintă un maxim vizibil la CuNiAl III-RNR acesta este atât de mic încât nu se diferențiază prea mult de viteză de stabilizare ($v_{\max} - v_s = 0,001$ mm/min), ca urmare a celor mai mari valori pentru proprietățile mecanice și cantitatea de elemente de aliere.

Valorile foarte mari ale vitezelor de eroziune cavitațională din perioada 0 -15(30) minute, la toate materialele prezentate în fig.3.5 ÷ 3.8, nu caracterizează distrugerea materialului prin eroziune cavitațională, ele fiind puternic influențate de rugozitatea suprafețelor atacate și de cantitatea de praf abraziv rămas în aceste suprafețe, după spălare și uscare la turbosulfantă. Îndepărtarea prafului abraziv și distrugerea varfului asperităților, în perioada menționată, nu caracterizează rezistența la cavitație a materialelor, motiv pentru care, aceste puncte s-au eliminat la construirea curbelor experimentale $v(t)$. Din acest motiv, în perioada 0 - t' aproximarea s-a făcut cu o parabolă de ordinul 2, rel.(3.6), însă poate fi și dreaptă, așa cum procedea Noskieviči [67, 68].

De remarcat inexistența perioadei de incubare, prezentă în diagrama lui Thiruvengadam [111], fig.1.12, indiferent de tipul materialului testat. Cauza este intensitatea ridicată a distrugerii cavitaționale, caracteristică aparatelor vibratorii în general.

Analizând datele din Tab.3.8 se pot face următoarele aprecieri:

a. - în cazul oțelurilor carbon nealiat dispersia și abaterile cele mai mari, față de curba experimentală, le prezintă oțelul OT 500-3. Cauza este structura fibroasă, obținută prin turnare [64, 65, 115] care face, ca în timpul eroziunii cavitaționale, să fie expulzați graunți cristalini de mari dimensiuni.

In cazul otelurilor laminate, OL 370-3k si OLC 15, dispersia si abaterile sunt valoric apropiate, sugerand comportarea similara, dupa modul de folosire a energiei absorbite de material in timpul eroziunii cavitationale.

b. - in cazul otelurilor aliate pentru constructii, dispersia si abaterile cele mai mari, fata de curba experimentală, le prezinta oțelul naval D 32-1. Fenomenul este prezent atat in zona de acumulare cat si in zona de stabilizare. Cauza este fragilitatea ridicata si structura austenitica grosolana, determinate de cantitatea ridicata de Mn [35a, 65, 115], care duc, in timpul atacului cavitional, la eliminarea graunților cristalini de mari dimensiuni.

Abatere mare prezinta si oțelul Carbon I-RNR ($a_{max} = +0,012$ mm/min), datorita comportarii aleatorii in zona de acumulare.

La restul materialelor, din aceasta categorie, distributia punctelor experimentale fata de curba $v(t)$, este normala, specifica materialelor cu buna si foarte buna rezistenta cavitionala [33, 81].

c. - in cazul oțelurilor inoxidabile, cu exceptia oțelului 2H13 [126a, 127] restul prezinta o distributie normala, a punctelor experimentale fata de curba $v(t)$. Abateri, ceva mai mari, au oțelurile turnate T09CuMoMnNiCr185-Ti si T07CuMoMnNiCr165-Nb, datorita dimensiunilor graunților cristalini expulzati in timpul eroziunii cavitationale, mai ridicate decat la inoxurile laminate, dar mai mici decat la oțelurile carbon [35a, 64, 115].

d. - in cazul bronzurilor si alamelor navale, dispersia si abaterile cele mai mari le prezinta alama datorita structurii monofazice de solutie solida [35a, 64, 65, 115], care-i ofera o comportare aleatorie.

e. - in cazul fontei cu grafit nodular Fgn 450-5, abateri mari apar atat in zona de acumulare cat si in zona de atenuare. Cuza este diferenta dintre dimensiuni nodulilor de grafit expulzati in aceste perioade. Dispersia si abaterile normale din zona de stabilizare, a vitezei de eroziune cavitionala, arata evolutia distrugerii in matricea metalica.

Dupa extinderea domeniilor de variatie a timpului t_1 se poate face urmatoarea clasificare:

1. - bronzuri si alame navale: $\Delta t_1 = 15$ min,
2. - oțeluri carbon nealiate: $\Delta t_1 = 30$ min,
3. - oțeluri inoxidabile: $\Delta t_1 = 75$ min,
4. - oțeluri aliate pentru constructii: $\Delta t_1 = 90$ min.

unde:

$$t_1 = t_{1 \max} - t_{1 \min} \quad (3.23)$$

$t_{1 \max}$ - valoarea cea mai mare a timpului t_1 la care se atinge maximul vitezei de eroziune cavitionala, in minute,

$t_{1 \min}$ - valoarea cea mai mica a timpului t_1 la care se atinge maximul vitezei de eroziune cavitionala, in minute.

Dupa extinderea domeniului de variatie a timpului t_2 , clasificarea este:

1. - oțeluri carbon nealiate: $\Delta t_2 = 15$ min,
2. - oțeluri inoxidabile: $\Delta t_2 = 30$ min,
3. - **bronzuri si alame navale si oțeluri aliate pentru constructii: $\Delta t_2 = 45$ min.**

unde:

$$t_2 = t_{2 \max} - t_{2 \min} \quad (3.24)$$

$t_{2 \max}$ - valoarea cea mai mare a timpului t_2 de la care se stabilizeaza viteza de eroziune cavitionala, in minute,

$t_{2 \min}$ - valoarea cea mai mica a timpului t_2 de la care se stabilizeaza viteza de eroziune cavitionala, in minute.

Domeniul strans in care se realizeaza viteza maxima de eroziune si de stabilizare, pentru otelurile carbon nealiate, arata existenta acelorasi componente structurale (ferita si perlita), Tab.3.2, indiferent de tehnologia de elaborare.

Domeniul de variatie, larg, al timpilor t_1 si t_2 , pentru otelurile aliate si inoxidabile, evidentiaza structura diferita, efectul elementelor de aliere si tehnologiei de elaborare, Tab.3.1 si 3.2.

Histogramele de frecventa, fig.3.11 si 3.12 evidentiaza:

- la otelurile carbon nealiate, viteza de eroziune maxima apare dupa un timp, de atac cavitional, scurt. Fenomenul se datoreaza lipsei elementelor de innobilare, care sporesc rezistenta la cavitate [30a,40a, 44].

- la otelurile aliate pentru constructii si inoxidabile, atingerea vitezei de eroziune cavitionala maxima se realizeaza, cel mai des, la $t_1 = 82,5$ minute, Asta arata ca legaturile dintre graunți sunt mai tari si greu de distrus [14]. Acest fenomen este efectul benefic al elementelor de aliere asupra structurii si proprietatilor fizico-mecanice ale materialelor [35a, 40a,65].

- la bronzurile navale, atingerea vitezei de eroziune cavitionala maxima se realizeaza la un timp similar otelurilor nealiate, ca urmare a dimensiunii graunților obtinuti prin turnare.

Cu exceptia bronzurilor si alamelor navale, stabilizarea vitezei de eroziune apare frecvent la $t_2 = 82,5$ minute. Acest aspect arata controlul bun si constanta valorilor parametrilor tehnico-functionali, ai aparatului vibrator, in timpul testarii.

Dupa timpii de atingere a maximului si stabilizarii vitezei de eroziune cavitionala, rezulta ca cu cat materialul are elemente de innobilare mai bine corelate (D 32-1, 18MOCrNi13, otelurile inoxidabile (cu exceptia lui 2H13), CuNiAl III-RNR), cu atat viteza maxima de eroziune se extinde mai mult si apare mai tarziu, putand coincide cu cea de stabilizare.

Stabilizarea vitezei de eroziune intr-un timp mai scurt (oteluri nealiate) sau mai lung (inoxuri, oteluri aliate, bronzuri navale) arata nivelul tasarii materialelor (cresterea duritatii si rezistentei mecanice la rupere [58a, 95b]), obtinut prin solicitarea dinamica locala, repetata, cu variatii mari de temperatura la suprafata probei, in timpului atacului cavitional.

Evident, scaderea pierderilor si mentinerea lor constanta, mai ales in cazul metalelor cu slaba rezistenta cavitionala (OT 500-3, OL 370-3k, D 32-1, alama navala), se datoreaza si atenuarii varfurilor de presiune de catre pungile de gaz din cavernele obtinute prin expulzarea graunților cristalini [3, 6, 15, 20, 30a, 33, 40a, 69,111].

Din histogramele prezentate in Fig. 3.11 si 3.12, rezulta ca, pentru materialele testate la eroziune cavitationala, in aparatul vibrator T1, se pot folosi ca timpi de referinta urmatoarii:

- $t_1 = 67,5$ min, pentru oteluri carbon, bronzuri si alame navale,
- $t_1 = 82,5$ min, pentru oteluri aliate si inoxidabile,
- $t_2 = 82,5$ min, pentru oteluri,
- $t_2 = 127,5$ min, pentru bronzuri si alame navale.

Din cele prezentate rezulta ca acesti timpi depind de calitatea de material, parametrii tehnico-functionali si tipul statiunii de incercare. Ei pot fi utilizati la crearea unui model matematic pentru viteza de eroziune cavitationala, sau a unor relatii de efect de scara.

Valorile parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale, Tab.3.9, permit o prima clasificare a materialelor testate, dupa rezistenta cavitationala:

1. - materiale cu slaba rezistenta cavitationala (OI 370-3k, OT 500-3, D 32-1 alama navala), caracterizate de:

- viteza de stabilizare (stationare) a eroziunii cavitationale: $v_s = 0,053 \pm 0,1$ mm³/min,

- viteza de eroziune cavitationala maxima: $v_{max} = 0,078 \pm 0,13$ mm³/min,

- rezistenta normalizata la cavitate: $Rn_{max} = 2,11 \pm 2,88$; $Rn_s = 1,6 \pm 2,22$

2. - materiale cu buna rezistenta cavitationala (OLC 15, Carbon I-RNR, 40Cr10, CuNiAl I-RNR, 2H13, Inox austenito-feritic H4142-15, Fgn.450-5, OH12NDL), caracterizate de:

- viteza de stabilizare (stationare) a eroziunii cavitationale: $v_s = 0,03 \pm 0,052$ mm³/min,

- viteza de eroziune cavitationala maxima: $v_{max} = 0,03 \pm 0,077$ mm³/min,

- rezistenta normalizata la cavitate: $Rn_{max} = 0,67 \pm 1,71$; $Rn_s = 0,67 \pm 1,18$.

3. - materiale cu foarte buna rezistenta cavitationala (Inox III-RNR, 20Cr130, T09CuMoMnNiCr185-ti, T07CuMoMnNiCr165-Nb, 18MoCrNi13, 33MoCr11, 41MoCr11, CuNiAl III-RNR), caracterizate de:

1. - viteza de stabilizare (stationare) a eroziunii cavitationale: $v_s = 0,016 \pm 0,029$ mm³/min,

2. - viteza de eroziune cavitationala maxima: $v_{max} = 0,018 - 0,03$ mm³/min,

3. - rezistenta normalizata la cavitate: $Rn_{max} = 0,4 \pm 0,67$; $Rn_s = 0,36 \pm 0,64$

Din aceasta clasificare rezulta ca in fiecare grupa exista materiale cu comportari cavitationale diferite, evidentiind actiunea comuna a tuturor factorilor, ce determina marca de material, asupra rezistentei cavitationale.

Aceste limite, printr-o investigare mai profunda a comportarii materialelor la eroziune cavitationala, permit elaborarea unei metode de apreciere cantitativa a rezistentei materialelor la eroziune cavitationala. O astfel de metoda este prezentata, de autor, in Cap.4. De remarcat este posibilitatea intocmirii unei clasificari, de tipul celei prezentate, pentru orice tip de statiune vibratorie ce dispune de un material etalon, cu buna rezistenta cavitationala.

3.3 CERCETARI EXPERIMENTALE REALIZATE IN APARATUL VIBRATOR CU CRISTALE PIEZOCERAMICE (T2)

3.3.1 Materiale testate

Materialele testate in aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 sunt:

1. - oteluri carbon nealiate: OLC 15 si OL 370-3k,
- 2.- oteluri aliate pentru constructii: 33MoCr11, 40Cr10, 18MoCrNi13, Carbon I-RNR, D 32-1,
3. - oteluri inoxidabile: Inox III-RNR, T07CuMoMnNiCr165-Nb, T09CuMoMnNiCr185-Ti si 20Cr1130,
4. - bronzuri si alame navale: CuNiAl III-RNR, CuNiAl I-RNR, alama.

Din fiecare material s-a testat o singura proba. Cu exceptia probei din OLC15 (caracterizata de: 0,135%C, 0,05%P, 0,3%Mn, 0,17%Si, 0,04%S, Fe =rest, $R_m = 400$ N/mm², $R_{p0,2} = 240$ N/mm², HB = 144, daN/mm²) restul probelor au fost testate si in aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 (forma geometrica si dimensiunile fiind aproximativ aceleasi). Atacul cavitional distructiv s-a realizat dupa rectificarea plana si slefuirea suprafetei frontale, de atac, a probei pana la indepartarea completa a urmelor de distrugere obtinute in aparatul vibrator T1.

Operatiile pergititoare inaintea inceperii si la sfarsitul fiecarei perioade de atac cavitional sunt identice cu cele descrise la paragraful 3.1

Compozitia chimica a materialelor este prezentata in Tab.3.1, iar datele privind constituintii structurali, proprietatile fizico - mecanice si tehnologia de elaborare sunt afisate in Tab.3.2.

3.3.2 Rezultate experimentale

3.3.2.1 Curbe caracteristice

Toate incercarile s-au realizat in apa distilata la: $20 \pm 1^\circ\text{C}$, $f = 20 \pm 0,2$ kHz si $A = 32\mu\text{m}$. Durata totala a atacului cavitional este de 165 minute, impartita in cate o perioada de 5 si 10 minute si 10 perioade de 15 minute.

Pe baza pierderilor masice, cu relatia (3.4), s-au determinat vitezele de eroziune cavitionala aferente fiecarei perioade de atac, si s-au construit curbele $v(t)$ din fig. 3.13 ; 3.16. Constructia grafica s-a realizat cu calculatorul, pe baza

metodologiei prezentate la paragraful 3.2.2.1, astfel:

1.- in perioada 0 - t' aproximarea punctelor experimentale este realizata de o parabola definita de relatia (3.7),

2.- in perioada t' - t₁ aproximarea punctelor experimentale este realizata de o curba definita de ecuatie (3.9),

3.- in perioada t₁ - t₂ aproximarea punctelor experimentale este realizata printr-o dreapta orizontala $v_s = \text{const.}$ (rel. 3.11).

Coeficientii B₁, B₂, B₃...B₇, din relatiile de mai sus, determinati din conditiile de racordare a curbelor, (3.13) si (3.15), precum si de aproximare cat mai fidela a punctelor experimentale (utilizand metoda celor mai mici patrate) sunt afisati in Tab.3.10. Abaterile maxime si minime, calculate cu relatia (3.21) si abaterea standard, calculata cu relatia (3.17) (numai pentru zona de stabilizare), ce oglindesc precizia de aproximare, sunt date in Tab.3.11. Tot in acest tabel sunt prezentati si timpii caracteristici curbelor experimentale $v(t)$. Din acest tabel rezulta ca durata totala a atacului cavitional poate fi acceptata ca =165 minute, deoarece intervalul

$t - t_2$, in care viteza se stabilizeaza, se incadreaza in limitele (0,3 - 3)t₂. Pe baza timpilor t₁ si t₂, Tab.3.11, s-au construit histogramele de frecventa din fig. 3.17 si 3.18

3.3.2.2. Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale

Valorile parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale, realizate in aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, sunt afisate in Tab.3.12. In acest tabel s-au afisat si valorile volumului de material erodat si diametrului petei, din suprafata atacata a probei, obtinute dupa 165 minute de atac erozional.

Ca si la probele testate in aparatul vibrator magnetostrictiv T1, diametrul petei, d_{pata} , realizata prin eroziune cavitionala in aparatul vibrator T2, reprezinta media a doua masuratori efectuate cu microscopul optic, cu scara gradata, dupa doua diametre perpendiculare.

Viteza adancimii medii de patrundere s-a determinat cu relatia (3.22).

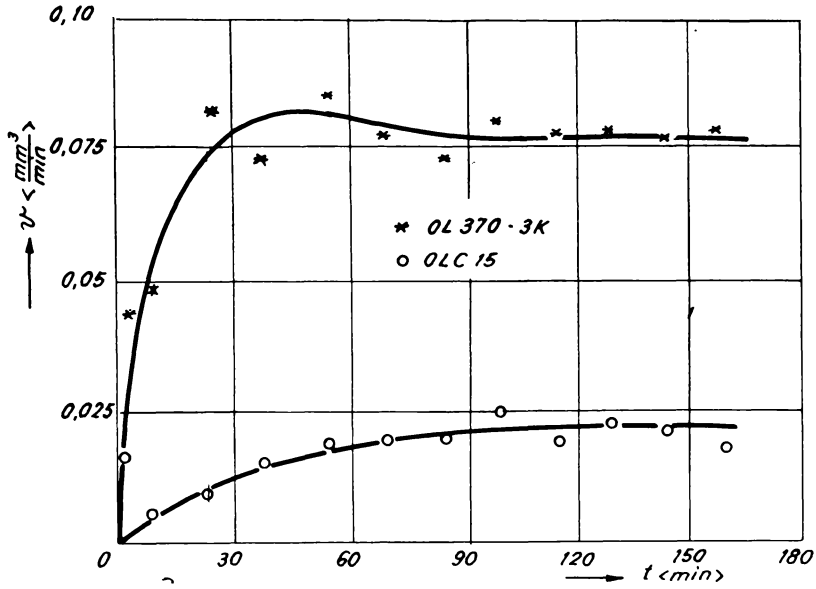


Fig.3.13 Variatia vitezei de eroziune cavitativa cu timpul de atac (oteluri carbon nealiate - T2)

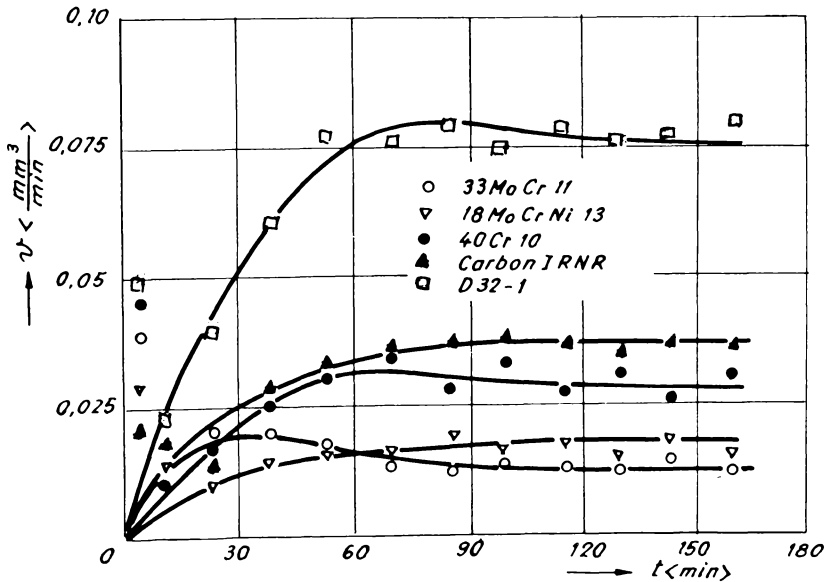


Fig.3.14 Variatia vitezei de eroziune cavitativa cu timpul de atac (oteluri carbon aliate pentru constructii - T2)

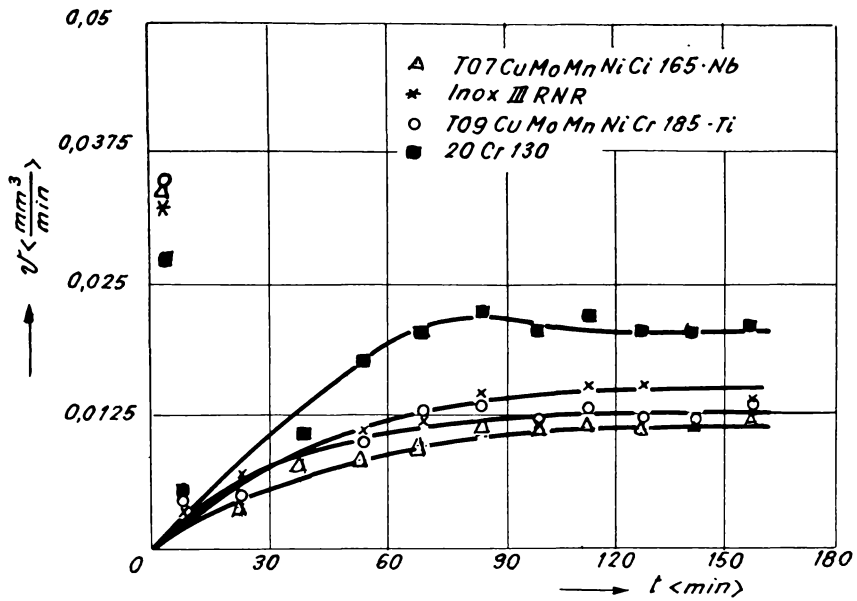


Fig. 3.15 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (oteluri inoxidabile - T2)

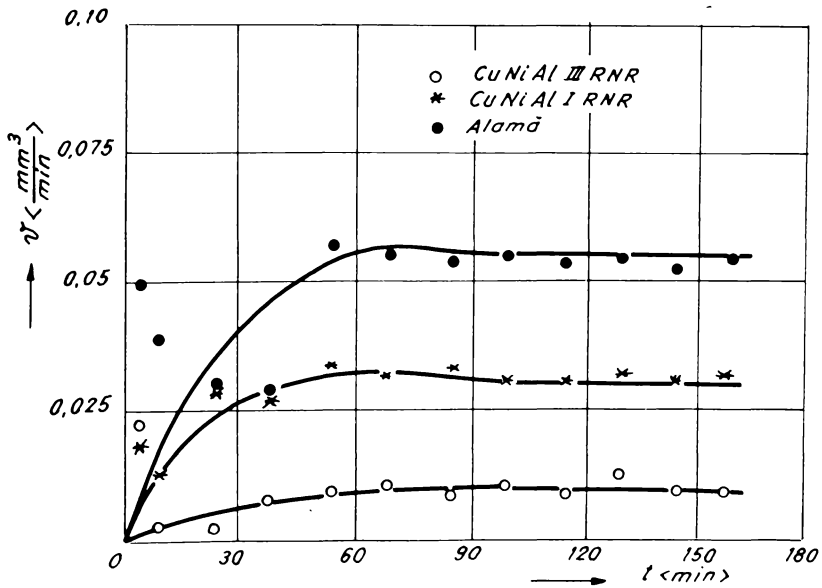


Fig. 3.16 Variatia vitezei de eroziune cavitacionala cu timpul de atac (bronzuri si alame navale - T2)

Tab. 3.10 Coeficientii ecuatiilor ce definesc curbele v(t) - T2

Grupă	Material	B1 mm ³ /min ³	B2 mm ³ /min ²	B3 mm ³ /min ⁵	B4 mm ³ /min ⁴	B5 mm ³ /min ³	B6 mm ³ /min ²	B7 mm ³ /min
Otelul	OLC 15	-1,234 · 10 ⁵	6,239 · 10 ⁴	0	-8,0682 · 10 ⁴	-1,8982 · 10 ⁶	4,1504 · 10 ⁴	1,044 · 10 ³
Otelul	OL 370 - 3K	-3,158 · 10 ⁴	0,008	-1,3023 · 10 ⁻⁹	4,9553 · 10 ⁹	-6,4642 · 10 ⁵	3,2948 · 10 ³	2,6064 · 10 ²
Otelul	33 MoCr 11	-7,688 · 10 ⁵	0,002	-5,969 · 10 ⁻¹⁰	2,1444 · 10 ⁻⁷	-2,5295 · 10 ⁵	1,0341 · 10 ³	5,5699 · 10 ³
Otelul	42 Cr 10 (etalon)	1,232 · 10 ⁵	6,684 · 10 ⁴	0	3,7496 · 10 ⁸	-1,1807 · 10 ⁵	1,1397 · 10 ³	-2,3373 · 10 ³
Otelul	18 MoCr Ni 13	-3,989 · 10 ⁶	4,759 · 10 ⁴	0	-5,3266 · 10 ⁻⁹	1,0329 · 10 ⁻⁶	-7,3548 · 10 ⁶	1,2299 · 10 ²
Otelul	Carbon I RNR	-1,665 · 10 ⁵	0,001	0	1,6577 · 10 ⁻⁸	-6,4957 · 10 ⁻⁶	8,4508 · 10 ⁴	5,1588 · 10 ³
Otelul	D 32 - 1	-3,188 · 10 ⁵	0,003	0	7,7434 · 10 ⁻⁸	-2,4549 · 10 ⁻⁵	2,4628 · 10 ³	8,8801 · 10 ⁴
Otelul	Inox III RNR	-3,025 · 10 ⁶	3,489 · 10 ⁴	0	-1,5204 · 10 ⁻⁹	-4,1336 · 10 ⁻⁷	1,5938 · 10 ⁴	3,5195 · 10 ³
Otelul	T09 Cu Mo Mn Ni Cr 165-Nb	-3,18 · 10 ⁶	3,292 · 10 ⁴	0	9,165 · 10 ⁻⁹	-3,0241 · 10 ⁻⁶	3,2336 · 10 ⁴	3,3957 · 10 ⁵
Otelul	T09 Cu Mo Mn Ni Cr 185-Ti	-6,548 · 10 ⁶	4,645 · 10 ⁴	0	5,4725 · 10 ⁻⁹	-2,0709 · 10 ⁻⁶	2,5468 · 10 ⁴	2,3914 · 10 ³
Otelul	20 Cr 130	-4,992 · 10 ⁶	3,576 · 10 ⁴	1,3368 · 10 ⁻⁹	3,9546 · 10 ⁻⁷	3,6883 · 10 ⁻⁵	-9,8715 · 10 ⁴	1,3219 · 10 ²
Brânză	Cu Ni Al III RNR	-7,06 · 10 ⁶	3,565 · 10 ⁴	0	4,3295 · 10 ⁻⁹	-1,90 · 10 ⁻⁶	2,5205 · 10 ⁴	5,2466 · 10 ⁴
Brânză	Cu Ni Al I RNR	-2,54 · 10 ⁵	0,002	0	3,2699 · 10 ⁻⁸	-9,93 · 10 ⁻⁶	9,198 · 10 ⁻⁴	8,577 · 10 ⁻³
Brânză	Alamă	-1,265 · 10 ⁵	0,002	1,2127 · 10 ⁻⁸	-2,933 · 10 ⁻⁶	2,3687 · 10 ⁻⁴	-6,7912 · 10 ³	8,8312 · 10 ²

Tab. 3.11 Marimi statistice si timpi caracteristici - T2

Nr. crt	Grupă	Material	Perioada <min>										t ₁ min	t ₂ min	$\frac{t_2 - t_1}{2}$
			t' - t ₂					t ₂ - 165							
			D _{max} mm ³ /min	D _{min} mm ³ /min	D _{max} mm ³ /min	D _{min} mm ³ /min	f _{n-1} mm ³ /min	D _{max} mm ³ /min	D _{min} mm ³ /min	D _{max} mm ³ /min	D _{min} mm ³ /min	f _{n-1} mm ³ /min			
1	DLC 15	+0,0013	-0,0014	+0,002	-0,005	±0,0026	10	97,5	97,5	0,69					
2	DL 370 - 3K	+0,001	-0,011	+0,001	-0,002	±0,0028	10	52,5	97,5	0,69					
3	33 MoCr 11	+0,001	-0,002	+0,002	-0,002	±0,0015	10	37,5	97,5	0,69					
4	40 Cr 11	+0,002	-0,003	+0,002	-0,003	±0,0024	10	82,5	112,5	0,47					
5	18 MoCrNi 13	+0,001	-0,003	+0,002	-0,001	±0,0013	52,5	112,5	112,5	0,47					
6	Carbon I RNR	+0,004	-0,002	+0,001	-0,001	±0,0007	22,5	97,5	97,5	0,69					
7	D32 - 1	+0,004	-0,006	+0,001	-0,003	±0,002	10	82,5	127,5	0,3					
8	Inox 17 RNR	+0,002	-0,001	+0,002	-0,001	±0,0015	37,5	112,5	112,5	0,47					
9	TOPUMoMnNiCr165 - Nb	+0,002	-0,001	+0,0005	-0,001	±0,0005	10	112,5	112,5	0,47					
10	TOPCuMoMnNiCr185 - Ti	+0,002	-0,002	+0,0005	-0,0005	±0,0005	22,5	112,5	112,5	0,47					
11	20 Cr 130	+0,002	-0,003	+0,003	-0,002	±0,0021	22,5	82,5	112,5	0,47					
12	CuNiAl 11 RNR	+0,001	-0,001	+0,001	-0,001	±0,001	10	112,5	112,5	0,47					
13	CuNiAl 1 RNR	+0,002	-0,002	+0,002	-0,0015	±0,0015	22,5	67,5	112,5	0,47					
14	Alomg	+0,007	-0,005	+0,003	-0,001	±0,0017	67,5	67,5	97,5	0,69					

T = 165 min

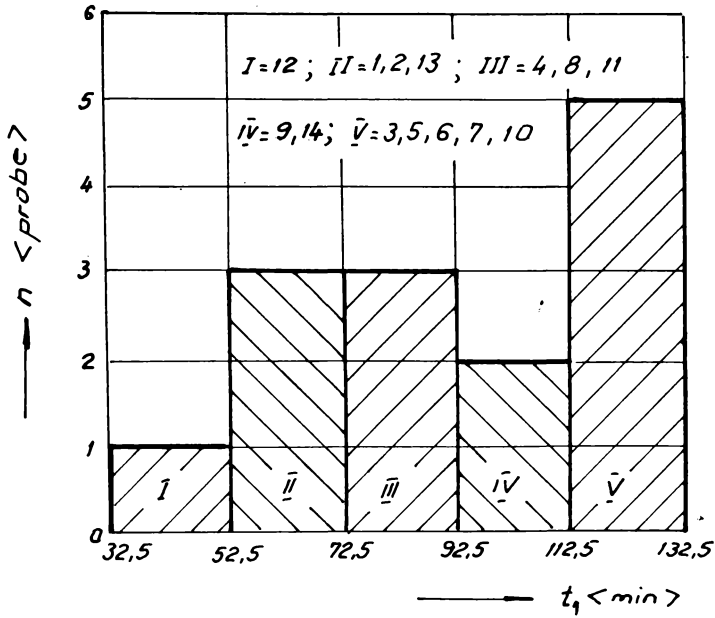


Fig. 3.17 Frecventa timpului t_1 , de atingere a maximumului vitezei de eroziune cavitacionala v_{max}

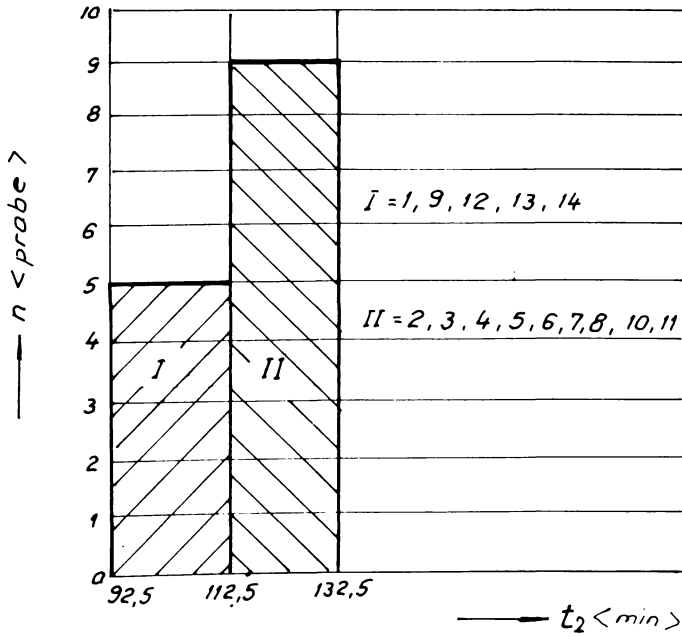


Fig. 3.18 Frecventa timpului t_2 , de la care se stabilizeaza viteza de eroziune cavitacionala v_s

Tab3.12 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale (continuare) (T2)

Grupa	Material	d _{pată} mm	V _g mm ³	MDPR mm/h _r	$\frac{1}{MDPR}$ h/mm
Oțeluri carbon	OLC 15	11,5	3,06	0,0107	93,3
	OL 370-3K	11,5	12,45	0,0436	22,97
Oțeluri aliate ptr. construcții	33 MoCr 11	11,5	2,41	0,0084	118,52
	40 Cr 10 (etalon)	11,5	4,61	0,0161	61,96
	18 MoCr Ni 13	11,5	2,57	0,009	111,14
	Carbon IRNR	11,5	5,4	0,0189	52,89
	D 32-1	11,5	11,51	0,0403	24,81
Oțeluri inoxidabile	Inox III RNR	11,5	1,91	0,00668	149,55
	T07CuMoMnNiCr165Nb	11,5	1,6	0,0056	178,52
	T09CuMoMnNiCr185-Ti	11,5	1,92	0,00671	148,77
	20Cr 130	11,5	3,01	0,0105	94,89
Bronzuri alame noi	Cu Ni Al III RNR	11,5	1,72	0,00602	166,07
	Cu Ni Al I RNR	11,5	5,34	0,0187	53,5
	Alamă	11,5	7,79	0,0273	36,66

h_r - ore

Tab.3.12 Parametrii caracteristici eroziunii cavitationale (T2).

Grupă	Material	V_{maxr} mm ³ /min	V_{maxc} mm ³ /min	$V_{maxc} - V_{maxr}$ mm ³ /min	V_s mm ³ /min	R_{nmax}	R_{ns}
Oțeluri carbon	0LC 15	0,025	0,023	-0,002	0,023	0,72	0,8
	0L 370 - 3K	0,086	0,083	-0,003	0,077	2,6	2,7
Oțeluri aliate pt. construcții	33 Mo Cr 11	0,02	0,019	-0,001	0,011	0,6	0,38
	40 Cr 10 (etalon)	0,035	0,032	-0,003	0,029	1,0	1,0
	18 Mo Cr Ni 13	0,018	0,017	-0,001	0,017	0,53	0,59
	Carbon IRNR	0,039	0,038	-0,001	0,038	1,19	1,31
	D 32 - 1	0,08	0,08	0	0,076	2,5	2,5
Oțeluri inoxidabile	Inox III RNR	0,015	0,014	-0,001	0,014	0,43	0,48
	T07CuMoMnNiCr165Nb	0,012	0,011	-0,001	0,011	0,34	0,38
	T09CuMoMnNiCr185Ti	0,013	0,0125	-0,0005	0,0125	0,39	0,43
	20 Cr 130	0,023	0,023	0	0,02	0,72	0,69
Bronzuri si alame noi.	CuNiAl III RNR	0,012	0,011	-0,001	0,011	0,34	0,38
	CuNiAl I RNR	0,035	0,035	0	0,033	1,09	1,14
	Alomă	0,059	0,059	0	0,056	1,84	1,93

3.3.3 Discutii si concluzii

Analiza comportarii cavitationale, a materialelor testate in aparatul vibrator piezoceramic T2, se va realiza pe baza curbelor $v(t)$, pe fiecare grupa in parte.

a) Oteluri carbon nealiate, fig.3.13

Cele doua materiale prezentate in fig.3.13 au comportari cavitationale complet diferite. La OL370-3k, stabilizarea vitezei de eroziune cavitationala are loc dupa realizarea unui maxim, iar la OLC 15 la valoarea maxima. In aceasta zona dispersia punctelor, fata de curba de aproximatie, este cu ceva mai redusa la OL 370-3k. Cauza o constituie efectul amortizant al gazului din caverne.

Modul, diferit, de evolutie al curbelor $v(t)$ arata dependenta rezistentei cavitationale de toti factorii caracteristici marcii de material (constitutie, omogenitate si fineta structurala, compozitie chimica, tip retea cristalina, proprietati mecanice).

Luand criteriu de comparatie valoarea vitezei din zona de stabilizare rezulta ca otelul OL370-3k are o rezistenta de aproximativ 3,3 ori mai mica decat OLC15.

b) Oteluri aliate pentru constructii, fig.3.14

Desfasurarea curbelor $v(t)$ evidentiaza trei tipuri de comportari cavitationale. Otelurile 33MoCr11 si 18MoCrNi13 cu foarte buna comportare cavitationala. Carbon I-RNR si 40Cr10 (cu structuri asemanatoare-Tab.3.2) cu rezistenta cavitationala medie. Si otelul naval D32-1 cu cea mai slaba comportare cavitationala (asemanatoare otelului OL370-3k). Cauza principala a scaderii rezistentei, acestui otel, la distrugere cavitationala, analizata in Cap.4, este legata de structura si compozitia sa chimica.

De remarcat, este comportarea cavitationala din zona de palier, aproape constanta. Acest aspect evidentiaza rolul benefic al principalelor elemente de aliere (Cr, Ni, Mn, Mo). Prezentia lor in compozitia chimica sporeste rezistenta cavitationala prin cresterea valorica a caracteristicilor mecanice, fortelor de legatura intercristalina si gradului de finisare a structurii [35a, 65, 115].

Desi, toate materialele, prezentate in fig.3.14, provin din semifabricate laminate, diferentele dintre cantitatile procentuale si natura elementelor de innobilare duc la comportari cavitationale diferite pana la inceperea stabilizarii. Astfel, la otelurile 33MoCr11, 40Cr10 si D32-1 viteza de eroziune cavitationala se stabilizeaza la o valoare mai mica decat cea maxima, iar la restul la valoarea maxima. De saemenea, la otelul 40Cr10 diferenta dintre valoarea maxima si cea de stabilizare ($\sim 0,003 \text{ mm}^3/\text{min}$) este nesemnificativa, de acelasi ordin cu abaterile.

Comportamentul cavitational diferit este ilustrat si de durata de atenuare, mult mai mica la 33MoCr11 in raport cu 40Cr10 si D32-1.

Toate aspectele prezentate sunt legate, in primul rand, de factorii caracteristici materialului (structura, compozitie chimica, tip retea cristalina, etc.)

c) Oteluri inoxidabile, fig.3.15

Cu exceptia otelului 20Cr130, celelalte trei au comportari cavitationale asemanatoare, curbele $v(t)$, din zona de stabilizare, aflandu-se in domeniul dispersiilor.

Rezistența cavitațională mai scăzută a oțelului 20Cr130 se datorează, în principal, lipsei martensitei, Tab.3.2, constituientul structural cu cea mai sporită rezistență cavitațională [40a, 44, 72].

Dispersiile reduse, ale punctelor experimentale, față de curbele de aproximație (cu excepția primelor, care nu caracterizează distrugerea materialului propriu-zis [81]) sunt o expresie elocventă a influenței, benefice, a elementelor de aliere asupra rezistenței cavitaționale.

d) Bronzuri și alame navale, fig. 3.16

Structurile, compozițiile chimice și proprietățile fizico-mecanice diferite, Tab.3.1 și 3.2, sunt principalii factori care determină diferențe, între comportările cavitaționale, exprimate prin curbele $v(t)$, ale celor trei aliaje.

Desfășurarea curbelor $v(t)$ și dispersia punctelor față de acestea definește cel mai bine calitățile cavitaționale ale fiecărui aliaj.

Cum era de așteptat, cea mai bună rezistență o prezintă CuNiAl III-RNR, datorită valorilor mai ridicate ale principalilor factori (proprietăți mecanice, cote procentuale de Ni și Mn).

Valorile foarte mari ale vitezelor de eroziune cavitațională din primele 10 minute, pentru toate materialele, sunt determinate de eliminarea prafului abraziv și distrugerea varfului asperitatilor. Datorită frecvenței mai mari ($f = 20 \pm 0,2\%$ kHz) decât la aparatul magnetostriktiv T1 ($f = 7000 \pm 3\%$ Hz), aceste procese au loc într-un timp mai scurt (10 minute față de 15 minute).

Datorită intensității ridicate a procesului cavitațional, similar curbelor $v(t)$ obținute la testele din aparatul T1, perioada de incubare este practic inexistentă.

Pe baza datelor din Tab.3.11, se pot face următoarele aprecieri:

a) în cazul oțelurilor carbon nealiat, dispersia și abaterile cele mai mari le prezintă OL370-3k în zona de acumulare. Cauza principală o constituie nivelul mai scăzut al proprietăților mecanice [40a, 33].

În zona de stabilizare dispersiile sunt apropiate valoric, iar abaterile ceva mai mari, însă nesemnificativ, la OLC15. Micile diferențe dintre abateri sunt determinate de pungile de gaz, mai mari la OL370-3k, care prin efectul amortizant determină o distrugere mai constantă.

Nivelul dispersiilor și abaterilor din zona de stabilizare, ca și la aparatul T1, sugerează aceeași tendință de utilizare a energiei absorbite de material în timpul eroziunii cavitaționale (Cap.4)

b) în cazul oțelurilor aliate pentru construcții, dispersia și abaterile cele mai mari le prezintă oțelul naval D32-1. Principala cauză este expulzarea graunților cristalini, sau grupurilor, de mari dimensiuni, în timpul atacului cavitațional [35a, 65, 115, 15, 128]

La restul materialelor se înregistrează abateri și dispersii normale, firește pentru comportamentul lor cavitațional [33,81].

c) în cazul oțelurilor inoxidabile, dispersia și abaterile punctelor experimentale față de curbele $v(t)$ sunt normale și mai mici decât la primele două categorii de oțeluri, evidențiind, încă o dată, efectul benefic al elementelor de inoxidare.

d) in cazul bronzurilor si alamelor navale, dispersia (abaterile) cele mai mari le prezinta alama, datorita structurii monofazice de solutie solida α [35a, 40a, 33 64, 65, 115].

Se remarca nivelul mai scazut al abaterilor si dispersiilor obtinute la apropierea punctelor experimentale, ce caracterizeaza comportarea cavitationala a materialelor in aparatul T2 (Tab.3.11), fata de cel obtinut la aparatul magnetostriktiv T1 (Tab.3.8). Acest aspect reflecta capacitatea distructiva, mai ridicata, a aparatului vibrator T1.

Histograma de frecventa, fig.3.18 arata ca stabilizarea vitezei de eroziune cavitationala, pentru toate materialele, tinde sa se realizeze in intervalul (92,5 - 132,5) minute. Pentru otelurile inoxidabile tinde spre $t_2 = 112,5$ minute. In cazul otelurilor aliate pentru constructii, o parte tind spre $t_2 > 112,5$ minute (40Cr10, 18MoCrNi13 si D 32-1) si o parte la $t_2 = 97,5$ minute (33MoCr11 si Carbon I-RNR). Pentru cele doua oteluri carbon nealiate (OL370-3k si OLC15) stabilizarea vitezei de eroziune cavitationala tinde spre $t_2 = 97,5$ minute.

Variatia timpului de stabilizare a eroziunii cavitationale este expresia influentei variatiilor de: procent si natura constituintii structurali, concentratie elemente chimice de innoibilare si valori proprietati mecanice ($R_{p0,2}$, HB, R_m) asupra rezistentei cavitationale.

Domeniu larg de variatie al timpului t_1 , fig.3.17, la care se inregistreaza maximum vitezei de eroziune cavitationala, denota dependenta comportarii materialului de proprietati, structura, compozitie chimica si tehnologie de elaborare [6, 29, 33, 40, 41, 69, 72, 77, 100, 107].

Numarul mic de materiale, testate in aparatul T2, nu permite aprecierea unor timpi de referinta, t_1 , pentru fiecare grupa. O tendinta exista pentru inoxuri, in jurul timpului $t_1 = 112,5$ minute. Din punct de vedere al timpului t_2 , se poate admite ca timp de referinta valoarea 112,5 minute, iar pentru alama, unele oteluri aliate pentru constructii si oteluri carbon nealiate $t_2 = 97,5$ minute.

Valorile parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale, Tab.3.12, permit o prima clasificare a materialelor testate dupa rezistenta cavitationala:

- materiale cu slaba rezistenta cavitationala (OL 370-3k, D 32-1, alama navala) caracterizate prin:
 - valorile maxima si de stabilizare a vitezei de eroziune cavitationala: $v_{max} = v_s = 0,058 \div 0,083$ mm³/min,
 - valorile rezistentelor normalizate la cavitatie: $R_{n_{max}} = R_{n_s} = 1,8 \div 2,6$.
- materiale cu buna rezistenta cavitationala (40Cr10, Carbon I-RNR, 20Cr130, CuNiAl I-RNR), caracterizate prin:
 - valorile maxima si de stabilizare a vitezei de eroziune cavitationala $v_{max} = v_s = 0,023 \div 0,057$ mm³/min,
 - valorile rezistentelor normalizate la cavitatie: $R_{n_s} = R_{n_{max}} = 0,72 \div 1,79$.
- materiale cu foarte buna rezistenta cavitationala (33MoCr11, 18MoCrNi13, Inox III-RNR, T09CuMoMnNiCr16S-Nb, T09CuMoMnNiCr18S-Ti, CuNiAl III-RNR), caracterizate prin:
 - valorile maxima si de stabilizare a vitezei de eroziune cavitationala: $v_{max} = v_s = 0,011 \div 0,022$ mm³/min,
 - valorile rezistentelor normalizate la cavitatie: $R_{n_{max}} = R_{n_s} = 0,34 \div 0,71$.

Aceasta clasificare arata ca in fiecare grupa exista materiale cu comportari cavitationale diferite si evidentiaza actiunea comuna a tuturor factorilor, ce determina marca de material, asupra rezistentei la eroziune cavitationala.

Coincidenta dintre limitele rezistentelor normalizate si vitezelor de eroziune cavitationala demonstreaza dependenta comportarii cavitationale a materialului de caapacitatea distructiva a aparatului.

CAP.4 ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

4.1 CONSIDERATII ASUPRA DISTRUGERII CAVITATIONALE A MATERIALELOR IN CELE DOUA APARATE

Distrugerea materialelor prin eroziune cavitionala, in aparatele vibratorii, este efectul cumulat al mecanismelor hidrodinamic si mecanic [3, 6, 30a, 40a].

Procesul hidrodinamic consta in formarea si surparea norului de bule cavitationale pe suprafata de atac a probei si depinde de parametrii tehnico-functionali ai aparatului: frecventa si amplitudinea vibratiilor, diametrul probei, natura si temperatura lichidului de lucru [3, 6, 33a, 40a, 69, 107]. Prin surparea norului de bule cavitationale apar varfuri de presiuni care solicita local materialul probei de incercare. Pe aparatele vibratorii, aceste presiuni, in general, raman constante datorita mentinerii valorilor parametrilor functionali in limitele admisibile [120].

Procesul mecanic, al distrugerii cavitationale, este dat de modul in care materialul preia energia transmisa prin surparea bulelor cavitationale. Energia absorbita de material depinde de: proprietatile fizico-mecanice, structura cristalina si intercrystalina si este folosita pentru deformatii elasto-plactice, fisurari si expulzari de graunti sau parti din acestia [3, 30a, 41, 40a, 44, 47, 81].

Examinarea suprafetelor erodate cavitional, la microscopul optic (marire 6,3x) si cu ochiul liber, la sfarsitul fiecarei perioade de atac cavitional, a evidentiat umatoarele aspecte:

- in primele minute ale atacului cavitional, 0 - 15(30), pe suprafata activa (atacata) apare o pata, aproximativ circulara, cu urme de: curgeri radiale, deformari plastice fisurari si asperitati cu varfurile distruse.

Datorita presiunilor create pe suprafata probei si frecventelor mari de vibratie praful abraziv este, practic, indepartat in intregime.

- in perioada 15(30) - 90(105) minute pata devine mai inchisa la culoare, cu mici caverne, evidentiind ruperile inter si transcristaline cu expulzari de graunti cristalini, sau parti din acestia.

- din minutul 90(105), pe suprafata probei apare o pata stelara, cu caverne ce se largesc si adancesc pe masura continuarii testelor. Acest fenomen este efectul propagarii fisurilor pe directii radiale si verticale, in functie de locul unde se produce solicitarea locala si legatura intercrystalina este mai slaba.

In fig.4.1 este prezentata fotografia suprafetei distruse prin eroziune cavitionala, pentru inoxul 20Cr130. In aceasta fotografie, realizata prin microscopul optic, marire 1000x, se remarca toate etapele distrugerii cavitationale a materialului. Primele componente ce se distrug sunt carburile formate la limitele dintre grauntii cristalini [44]. **Indeprtarea acestora genereaza amorse de fisuri Propagarea fisurilor se face atat axial (in adancime) 1 cat si radial 2, functie de locul in care legaturile sunt mai slabe.**

La suprafața probei (zona 3) se realizează o durificare locală, prin tasare, datorită solicitării locale repetate [3]. Datorită rețelei cristaline de tip hexagonală cu volum centrat, durificarea la suprafața se realizează pe o adâncime mai mică. Grupurile de graunți 4, bine legați structural, sunt mai întâi deformați plastic și apoi rupeți de restul materialului.

La probele prelevate din materiale cu slabă rezistență cavitațională (D 32-1, OT 500-3, OL 370-3k, alama navala), pe suprafața de atac, apar caverne ce dau impresia

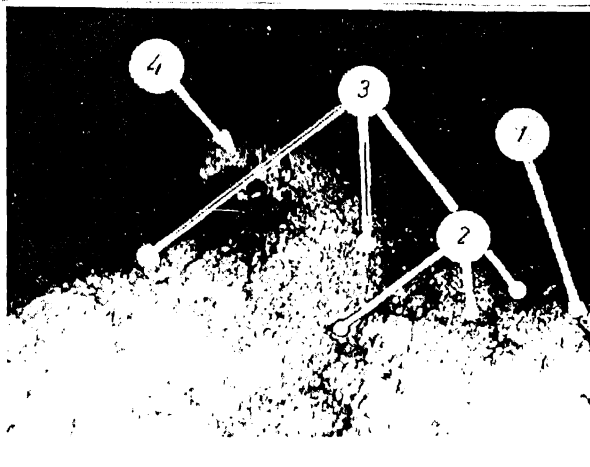


Fig. 4.1 Secțiune prin suprafața erodată cavitațional (20 Cr 130 marire 1000x)

1. Fisură axială (în adâncime)
2. Fisură radială
3. Zonă tasată
4. Material (grup de graunți) deformat plastic.

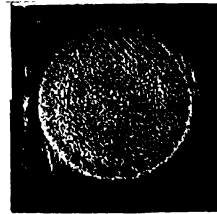


Fig. 4.2 Suprafața erodată cavitațional (20Cr 130 marire 6,3x)

unui crater de vulcan, cu multe guri de scurgere. Acest mod de distrugere este cauzat de neomogenitatea structurală și caracterul fibros, al structurii [35a, 65, 115], care determină expulzări de graunți sau grupuri de graunți. Fenomenul se observă, cel mai bine, la probele testate în aparatul vibrator magnetostrictiv T1, datorită capacității distructive mai ridicate (Cap.5: D 32-1, OL 370-3k, alama)

La probele prelevate din oțeluri inoxidabile și bronzuri navale de înaltă rezistență pata erozională este uniformă și cu crateri greu observabili cu ochiul liber. Cauza este structura mai omogenă, mai fină și cu puternice legături intercristaline determinate de elementele de imobilizare [35a, 115]. La aceste tipuri de materiale, în general, distrugerile cavitaționale sunt caracterizate de spargeri de graunți și expulzarea partilor disociate [77, 44, 47].

În cazul oțelurilor aliate, în funcție de gradul de aliere (înalt, mediu, slab) forma suprafeței distruse, prin cavitație, se apropie de cea a inoxurilor sau a oțelurilor carbon nealiate.

Dispersia punctelor experimentale, fata de curbele $v(t)$, fig.3.2, 3.3, 3.5 - 3.8 si 3.13 - 3.16, in zona de stabilizare a eroziunii cavitationale, redade calitativ in fig. 4.3, denota tendinta de folosire a energiei absorbite de material. Astfel;

- in perioada I cea mai mare parte din energia absorbita de material, in timpul atacului cavitational, este dirijata spre ruperea legaturilor inter si transcristaline si expulzarii materialului rupt, si restul spre deformari elasto-plastice. Fenomenul este caracteristic, in special, otelurilor carbon nealiate, fontelor, alamelor turnate, si la unele oteluri aliate ca D 32-1 [15, 33, 44].

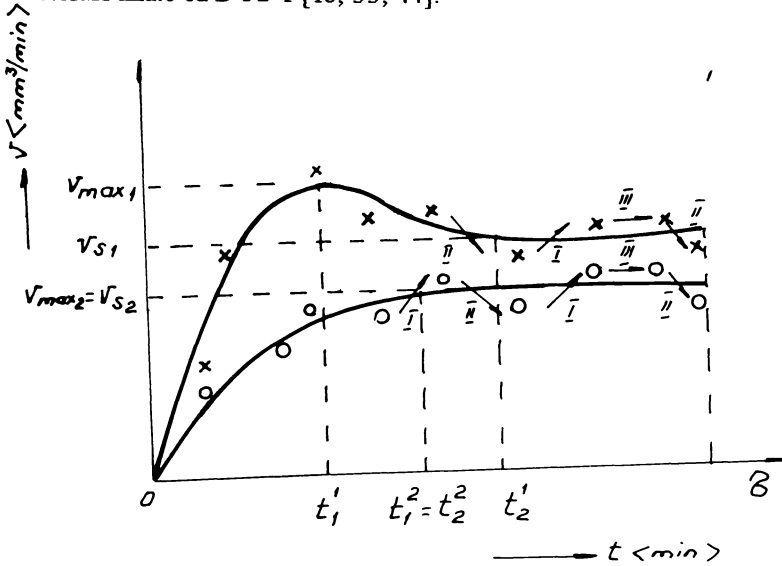


Fig. 4.3 Tendinte de distributie a punctelor experimentale fata de curbele $v(t)$

- in perioada II cea mai mare parte din energia absorbita de material, in timpul atacului cavitational, este consumata pentru deformari elasto-plastice si ruperea legaturilor inter si transcristaline si restul pentru expulzarea materialului dislocat. fenomenul este specific otelurilor inalt si mediu aliate pentru constructii, inoxurilor si bronzurilor navale de inalta rezistenta (40Cr10, Carbon I-RNR, Inox austenito-feritic H4142-15, OH12NDL, 20Cr130, CuNiAl I-RNR).

- in perioada III energia consumata pentru deformari elasto-plastice, ruperea lagaturilor si expulzarea materialului desprins, ramane aproximativ constanta. Fenomenul este caracteristic otelurilor inalt aliate si inoxidabile tenace (T07CuMoMnNiCr165-Nb, T09CuMoMnNiCr185-Ti, Inox III-RNR, 33 MoCr11, 41MoCr11, 18MoCrNi13, CuNiAl III-RNR)

4.2 INFLUENTA ELEMENTELOR CHIMICE COMPONENTE

De cantitatea procentuala a elementelor chimice componente depinde raportul constituintilor structurali, gradul de finisare si omogenizare al structurii si nivelul proprietatilor fizico-mecanice [35a, 64, 65, 114, 115]. Elementele chimice de innobilare (Ni, Cr, Mn, Mo, Va, Nb), in general, au un rol benefic asupra calitatii materialului. In functie de scopul urmarit, cresterea nivelului valoric al unei anumite caracteristici mecanice sau obtinerea unui anumit raport intre principalii constituinti structurali si a unui anumit grad de finisare, se pot folosi unul sau mai multe elemente de aliere [35a].

Experienta acumulata de colectivul Catedrei de Masini Hidraulice din Timisoara, in cei peste 35 ani de cercetari [9 - 20, 44, 52, 53, 127, 128, 133], si alte colective [33a, 40a, 41, 107, 111], arata ca unul si acelasi material are comportari cavitationale diferite de la o sarja la alta, pentru semifabricate de acelasi tip (bare, table, turnate, etc.). Cauza principala o constituie imposibilitatea obtinerii unei rețete stricte in timpul elaborarii semifabricatelor, dovedita de domeniile standard de variatie a elementelor chimice componente [122 - 126a].

In lucrare se discuta tendinta influentei principalelor elemente de aliere asupra performantelor cavitationale ale materialelor, din cadrul fiecărei grupe. Discutiile se realizeaza pe baza datelor prezentate in Tab. 3.1 si a curbelor $v(t)$, obtinute prin incercarile de eroziune cavitacionala in cele doua aparate vibratorii T1 si T2.

a. - Oteluri carbon nealiat si fonte, fig.3.3 si 3.13

Otelurile OL 370-3k si OT 500-3 au rezistenta cavitacionala scazuta datorita prezentei elementelor de aliere in cantitati insuficiente ($Mn = 0,4 \div 0,7 \%$, Tab.3.1) pentru intarirea legaturilor intercrystaline, finisarii si creerii constituintilor structurali de tip: martensita sau austenita, cu proprietati mecanice ($R_m, R_{p0.2}, HB, A_5, Z, KCU$) ridicate, care pot spori aceasta rezistenta [44, 77].

De asemenea, in anumite conditii, se pot forma silicatii fragili [115], ce influenteaza negativ rezistenta la cavitate, prin lipsa elementelor Cr si Ni necesare prevenirii acestui fenomen [30a, 40a, 77].

Slaba comportare cavitacionala a otelului OL 370-3k, se datoreaza si prezentei fosforului si sulfurii. Influenta negativa a fosforului este data prin tendinta de fragilizare a structurii si producerii segregatiilor [35a, 115]. Efectele nefaste ale sulfurii, asupra rezistentei cavitationale, sunt reducerea rezistentei la oboseala si tenacitatii, precum si tendinta de formare a amorselor de rupere, prin sulfurile FeS si MnS [65, 115].

Rezistenta cavitacionala redusa a otelului OT 500-3 este efectul structurii grosolane, obtinuta prin turnare, si lipsei elementelor de aliere Cr si Ni, cu efectul mentionat la OL 370-3k.

Buna comportare cavitacionala a otelului OLC 15, probabil, este legata de cantitatea redusa de carbon, tenacitatea, gradul de finete si omogenitatea structurala mai ridicate, obtinute prin conditiile de elaborare mai speciale [35a, 115]. De

asemenea, cantitatea de Mn si S, prezente in compozitia acestui otel, este nesemnificativa (Tab.3.1) pentru formarea unei structuri fibroase sau cu sulfuri.

Comportarea cavitationala, a fontei Fgn 450-5, aleatorie in perioada de acumulare si atenuare (0 -90 minute) este datorata cantitatii ridicate de Si (3,1%) si C (3,1%), care determina aparitia nodurilor de grafit, duri si fragili [65, 115], expulzati in aceasta perioada. Comportarea cavitationala buna din ultima parte a atacului cavitional (zona de stabilizare) arata ca distrugerea se realizeza in matricea metalica (P+F). Asa se explica comportamentul cavitional superior fata de OT 500-3 si OL 370-3k.

b. - Oteluri aliate pentru constructii, fig. 3.4 si 3.14

Comportarile cavitationale foarte bune, ale otelurilor 33MoCr11 si 41 MoCr11, sunt efectul prezentei in compozitie a Cr si Mo , care asigura o structura destul de omogena, cu proprietati mecanice (in special Rm, HB si Rp0,2) ridicate si cantitatii de Mn sub limita fragilizarii structurii si dezvoltarii excesive a grauntilor cristalini [65, 115]. De asemenea, cantitatea ridicata de carbon (0,33%, respectiv 0,41%) asigura valori mari rezistentei mecanice la rupere si duritatii materialului, care, in acest caz, sporeste rezistenta la eroziune cavitationala.

Otelul 18MoCrNi13 se comporta foarte bine la cavitate si datorita prezentei in structura a tuturor elementelor de aliere (Cr, Ni, Mo, Mn) care, impreuna, sporesc gradul de finisare si omogenizare a structurii, cresc fortele de legatura dintre cristale si elimina defectele de tip silicati si sulfuri ce pot aparea [35a, 63, 65, 115].

Slaba comportare cavitationala a otelului D 32-1 este si efectul cantitatilor ridicate de Mn (12,5 %) si Si (2,5 %), Tab.3.1, ce favorizeaza aparitia grauntilor de mari dimensiuni si a grafitului (element fragilizant) [65, 115], care , in timpul atacului cavitional, sunt expulzati in intregime sau partial. Cavernele foarte adanci din suprafata erodata, observabile si cu ochiul liber, demonstreaza cele afirmate.

Otelul Carbon I-RNR are o rezistenta cavitationala buna datorita cantitatii moderate de Mn (1,1 % - Tab.3.1) care, in prezenta elementelor Cr si Ni, nu poate mari excesiv dimensiunile grauntilor si asigura o structura putin mai fina si omogena, ce determina pierderi mai mici (valori mai scazute ale vitezei de eroziune cavitationala).

Otelul 40Cr10 se comporta bine la eroziune cavitationala dar mai slab decat otelurile 33MoCr11, 41MoCr11 si 18MoCrNi13 datorita cantitatilor reduse de elemente de innobilare (0,44 % Cr, 0,56 % Mn - Tab.3.1), care, practic, au acelasi efect ca si la otelul Carbon I-RNR.

c) - Oteluri inoxidabile, fig. 3.5 si 3.15

Cu exceptia otelurilor OH12NDL si Inox austenito-feritic H4142-15, restul otelurilor se comporta foarte bine la atacul acvitional datorita procentelor insemnate de Cr si Ni care maresc rezistenta la eroziune cavitationala [3, 30a, 40a, 44, 72, 77]. Elementele cu tendinta negativa asupra rezistentei cavitationale Mn, S, Si si P sunt in cantitati prea mici pentru a diminua efectul produs de Cr si Ni, Tab.3.1.

Rezistenta cavitationala mai slaba, dar buna, a Inoxului austenito-feritic H4142-15, este cauza cantitatii mai ridicate de Mn (3,45 %-Tab.3.1) ce determina fragilizarea structurii si cresterea grauntilor.

La oțelurile din aceasta grupa se observa cel mai bine capacitatea elementelor de aliere de a realiza o structura cat mai fina si omogena (vezi alura curbelor $v(t)$ si distributia punctelor experimentale fata de aceste curbe), precum si cresterea fortelor interioare de legatura (vezi aspectul suprafetelor erodate, Tab5.2)

d) - Bronzuri si alame navale, fig. 3.6 si 3.16

Bronzurile CuNiAl I-RNR si CuNiAl III-RNR au comportari cavitationale bune si foarte bune datorita cantitatilor importante de Ni si Al, Tab3.1, care ridicand nivelul valoric al proprietatilor mecanice sporesc rezistenta la cavitate [47].

Alama navala are o rezistenta cavitationala scazuta din cauza structurii monfazice si lipsei elementelor de innobilare. De altfel, scaderea cuprului in favoarea zincului reduce rezistenta la cavitate [30a].

Comportarea cavitationala a bronzului CuNiAl III-RNR superioara celorlalte doua (CuNiAl I-RNR si alama) se datoreaza, in primul rand, continutului mai ridicat de Ni (4,5%), absent la alama si de 2,33 % la CuNiAl I-RNR.

4.3 INFLUENTA CONSTITUENTILOR STRUCTURALI

Un alt rol impotant in comportarea cavitationala a materialului il are constitutia structurala. Influenta sa asupra rezistentei cavitationale a materialelor este analizata pe fiecare grupa, in baza datelor din Tab.3.2 si curbelor $v(t)$.

a) - Oțeluri carbon nealiate si fonte, fig.3.3 si 3.13

Oțelurile Ol 370-3k si OT 500-3 au comportare cavitationala scazuta datorita cantitatii ridicate de ferita, 65 % si 85 %, constituinti moale, plastic [65, 115] si cu cea mai slaba rezistenta la eroziune cavitationala [44, 77].

Cantitatea de perlita lamelara (amestec mecanic de ferita si cementita), este prea mica, 40 % si 15 %, pentru a influenta favorabil rezistenta la cavitate, chiar daca rezistenta sa este mai ridicata [44].

Oțelul carbon OLC 15 se comporta cel mai bine din aceasta grupa din cauza elementului gamagen, Mn, prezent in cantitate mica (0,5 % - Tab.3.1) care-i marestea duritatea fara a-i fragiliza structura [35a, 115], facandu-l mai rezistent si decat oțelul Carbon I-RNR, ce are o cantitate mai mare de Mn (1,1 %). Absenta sulfului, fosforului si siliciului, care pot forma compusi duri si fragili, respectiv segregatii [65, 115], il face cu mult mai rezistent cavitional decat OL 370-3k si OT 500-3, chiar daca este constituit din mai multa ferita (90 %) si mai putina perlita (10 %).

Fonta cu grafit nodular Fgn 450-5 se comporta cavitional mai bine dupa expulzarea nodulilor de grafit (zona de stabilizare a eroziunii cavitationale) datorita cantitatii ridicate de perlita (70% -Tab.3.2), care o face mai rezistenta decat OL370-3k si OT 500-3.

b) - Oțeluri aliate pentru constructii, fig. 3.4 si 3.14.

Determinarea cantitatii procentuale in care constituintii structurali participa la formarea stucturii nu s-a putut realiza din lipsa mijloacelor materiale (aparate) si

documentare (diagrame, relatii). Din acest motiv in Tab.3.2 s-au afisat numai denumirile constituintilor, a caror stabilire s-a efectuat pe baza tipurilor de structuri prezentate in [64, 114] si a metodologiilor din [35a, 65, 115].

Otelul naval D 32-1 are rezistenta cavitationala scazuta datorita austenitei grosolane, dure si fragile, determinata de continutul ridicat de Mn [65, 115], din care in timpul atacului sunt expulzati graunti, sau parti din ei, de mari dimensiuni.

Otelurile 33MoCr11 si 18MoCrNi13 se comporta foarte bine la eroziune cavitationala din cauza prezentei, alaturi de ferita aliata (cu rezistenta cavitationala sporita fata de cea nealiata [44]) si perlita, a amestecului mecanic bainita care contribuie la cresterea caracteristicilor de rezistenta mecanica HB, Rm, si As [114]. Micile diferente de comportament, evidentiata de curbele $v(t)$, fig.3.4 si 3.14 sunt cauzele diferentelor procentuale in care se afla cei trei constituinti: F, P si B.

Comportarea cavitationala foarte buna a otelului 41MoCr11 se datoreaza, in primul rand, martensitei, constituint structural cu foarte buna rezistenta cavitationala [40a, 44, 77] si in al doilea rand bainitei. Comportarea, oarecum, mai modesta decat a otelului 33MoCr11 este determinata de martensita, a carei structura, probabil, nu-i de finetea necesara sporului insemnat la eroziune cavitationala.

Otelurile 40Cr10 si Carbon I-RNR se comporta bine cavitational, dar mai slab decat 33MoCr11, 18MoCrNi13 si 41MoCr11, datorita cantitatilor mai ridicate de carbon si mai reduse de elemente de aliere, in special Cr (vezi Tab.3.1).

c) - Oteluri inoxidabile, fig.3.5 si 3.15.

Otelurile T07CuMoMnNiCr165-Nb si T09CuMoMnNiCr185-Ti se comporta excelent la eroziune cavitationala datorita structurii formate din A, M si F care le confera rezistenta sporita. Datorita cantitatii de martensita mai ridicata (40 %) si ferita mai scazuta (20 %), Tab.3.2, inoxul T07CuMoMnNiCr165-Nb, rezista, atacului cavitational, putin mai bine decat T09CuMoMnNiCr185-Ti cu cantitate mai mica de M (10 %) si mai mare de F (30 %).

Otelul inoxidabil III-RNR se comporta foarte bine la eroziune cavitationala datorita cantitatii ridicate de martensita (50 %).

Comportarea asemanatoare dintre Inox III-RNR, laminat, si inoxurile T07CuMoMnNiCr165-Nb si T09CuMoMnNiCr185-Ti, turnate, se datoreaza cantitatii de ferita mai ridicata la primul si structurii mai fibroase (obtinuta prin turnare) la cele din urma.

Otelurile 20Cr130 si 2H13 se comporta foarte bine, dar mai slab decat cele mentionate la aceasta grupa, din cauza cantitatii sporite de ferita (66 %). Diferentele ce apar, exprimate prin curbele de eroziune cavitationala $v(t)$ si valorile parametrilor caracteristici, Tab.3. sunt efectul compozitiei chimice care poate nu este asa cum s-a admis, din lipsa informatiei, si ca urmare sa nu existe acelasi raport de constituinti structurali.

Otelul Inox austenito-feritic H4142-15 se comporta bine la eroziune cavitationala dar mai slab decat cele dinainte, datorita continutului ridicat de Mn (3,45 %-Tab3.1) care face ca acele de martensita si austenita sa fie mai grosolane, iar structura mai fibroasa si fragila, detrimand pierderi mai ridicate.

Inoxul OH12NDL are cea mai scazuta rezistenta cavitationala dintre toate inoxurile, datorita structurii fibroase formata preponderent din ace mari de martensita (76

%), obtinute in urma procesului de turnare. De altfel, practica a dovedit ca paletele de turbina turnate din acest otel au avut o durata de viata mai mica decat cele turnate din otelurile T07CuMoMnNiCr165-Nb si T09CuMoMnNiCr 185-Ti [127]. Deci, cauza principala este tehnologia de elaborare si turnare.

d) - **Bronzuri si alame navale, fig.3.6 si 3.16.**

CuNiAl III-RNR si CuNiAl I-RNR au rezistenta cavitationala sporita datorita solutiei solide γ . CuNiAl III-RNR are cea mai buna performanta datorita elementelor gamagene Ni si Mn, in cantitatile cele mai mari, care extind domeniul de existenta al solutiei solide γ [48]. Alama navala are o comportare cavitationala slaba datorita structurii mnofazice de solutie solida α , care-i distrusa foarte repede [33,47].

4.4 INFLUENTA PROPRIETATILOR MECANICE

Investigarea gradului si sensului de dependenta al rezistentei materialelor la eroziune cavitationala de proprietatile mecanice este in atentia multor cercetatori de mai bine de 100 ani. Semnificative sunt rezultatele obtinute de Garcia [32, 33], Hammitt [39, 40, 40a], Hobbs [41, 42], Thiruvengadam [111], Karimi [48] si altii. Din pacate, majoritatea investigatiilor realizate de acesti autori, cu exceptia celor intreprinse de Karimi [48] pe bronzuri manganoase, nu sunt efectuate pe clase de materiale si nu ofera concluzii clare asupra tendintelor de comportare cavitationala a materialelor in cadrul diferitelor grupe (oteluri nealiate, oteluri aliate, inoxuri, aliaje ale cuprului, etc.) sau al unei grupe in raport cu cealalta, asa cum se procedeaza in prezenta lucrare. Remarcabila ramane relatia lui Hammitt [39, 40a] care coreleaza parametrul $1/MDPR$ cu duritatea materialului HB, indiferent de clasa de calitate, acceptata de majoritatea cercetatorilor [3, 30, 30a, 95a, 102, 113] in verificarea rezultatelor experimentale obtinute, indiferent de tipul statiunii de incercare:

$$\frac{1}{MDPR} = C (HB)^n \quad (4.1)$$

unde $C = 0,734$ si $n = 1,8$. De mentionat: constanta C are rolul unui parametru de scara.

Utilizand aceasta forma a relatiei (4.1) in descrierea curbelor de aproximare a punctelor experimentale, ce caracterizeza comportarea cavitationala a materialelor testate in aparatele T1 ($A = 47$ m, $f = 7000 + 3\%$ Hz, $d = 14$ mm, $Pe = 500$ W) si T2 ($A = 32$ m, $f = 20 + 0,2$ kHz, $d = 14$ mm, $Pe = 274,4$ W) fig. 4.4 - 4.10, se constata ca parametrul de forma oscileaza in jurul valorii " $n = 1,8$ ", diferentele fiind neseemnificative, Tab. 4.1.

Tab.4.1 Coeficienti si exponenti

Grupa Coef.	Oțeluri carbon		Oțeluri aliate ptr. construcții		Oțeluri inoxidabile		Bronzuri și alame navale	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
C	0,039	—	0,0025	0,0048	0,0046	0,0134	0,007	0,0134
n	1,7974	—	1,8	1,8	1,7801	1,78	1,8	1,8
$\frac{C_{T2}}{C_{T1}}$	—		1,92		2,9		1,91	

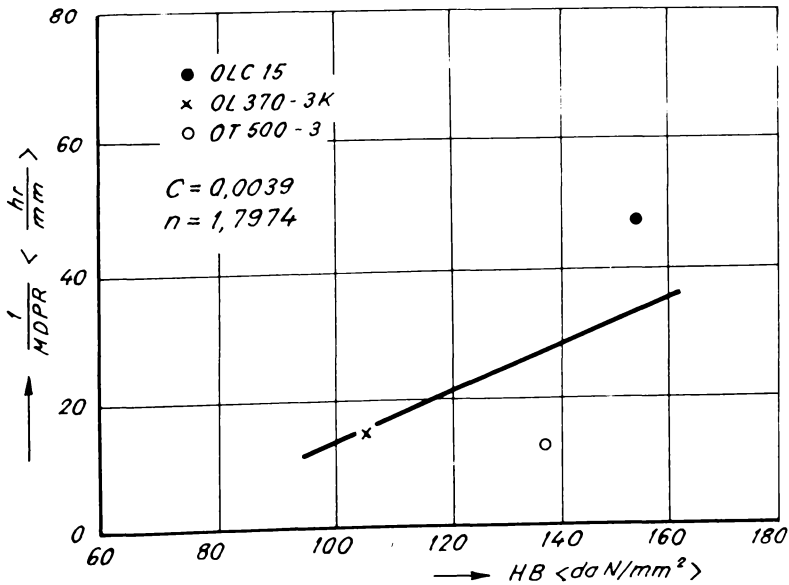


Fig. 4.4 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Oteluri carbon nealiate - T1)

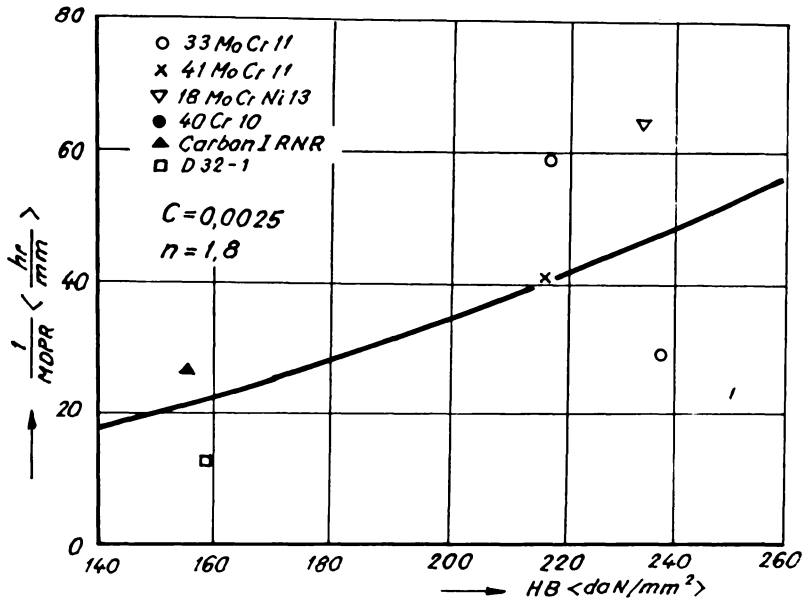


Fig.4.5 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Oteluri aliate pentru constructii - T1)

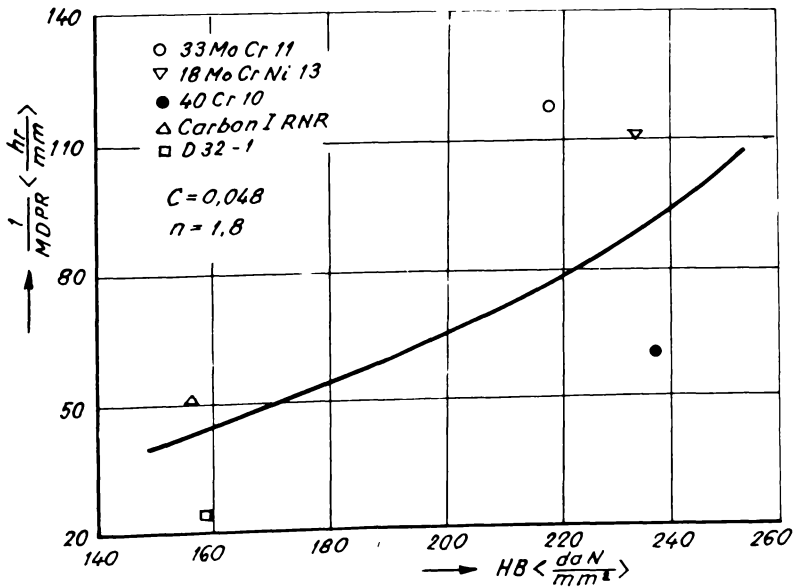


Fig.4.6 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Oteluri aliate pentru constructii - T2)

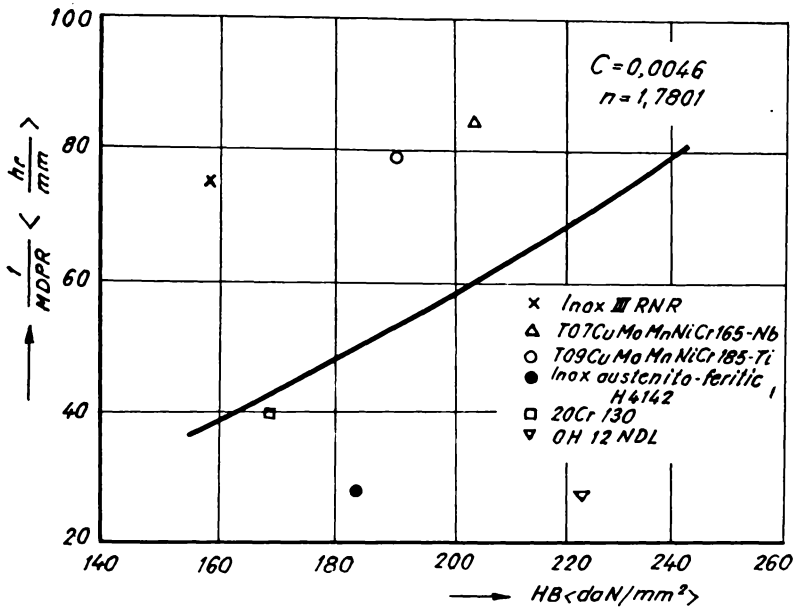


Fig. 4.7 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Oteluri inoxidabile - T1)

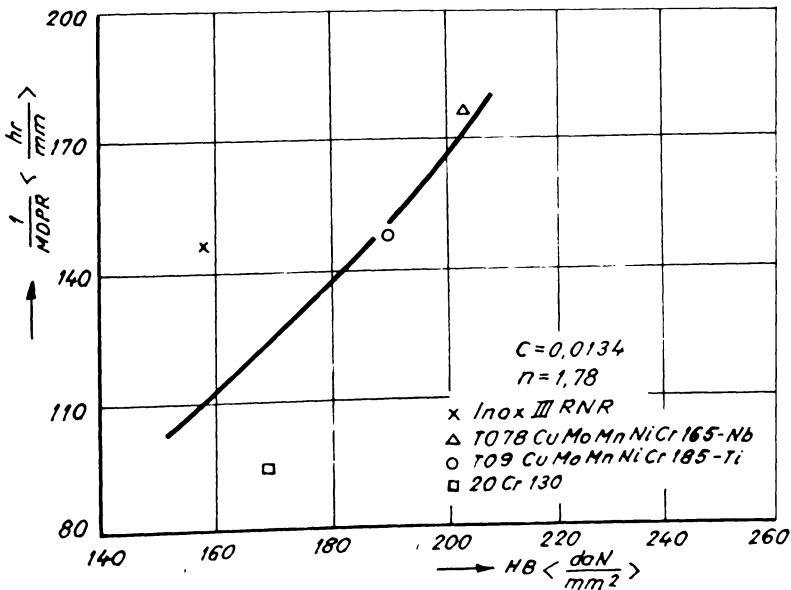


Fig. 4.8 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Oteluri inoxidabile - T2)

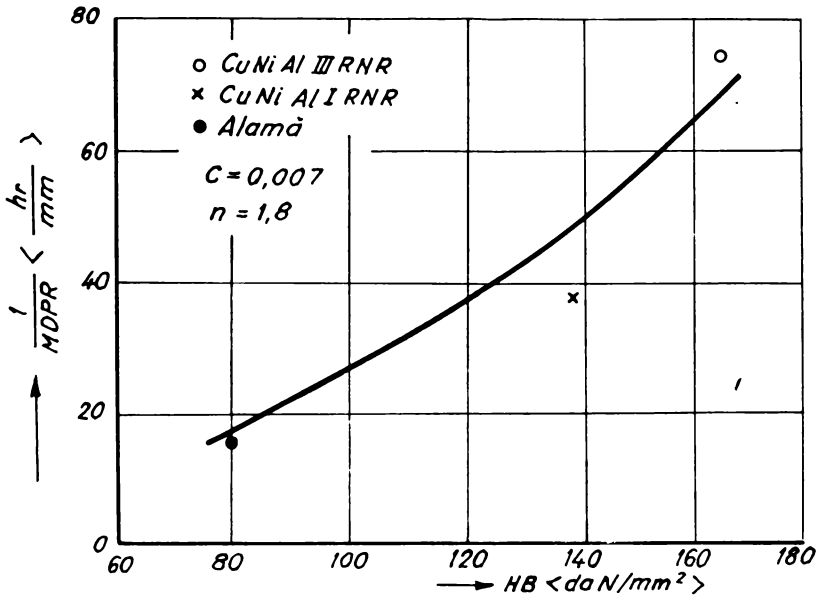


Fig. 4.9 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Bronzuri si alame navale -T1)

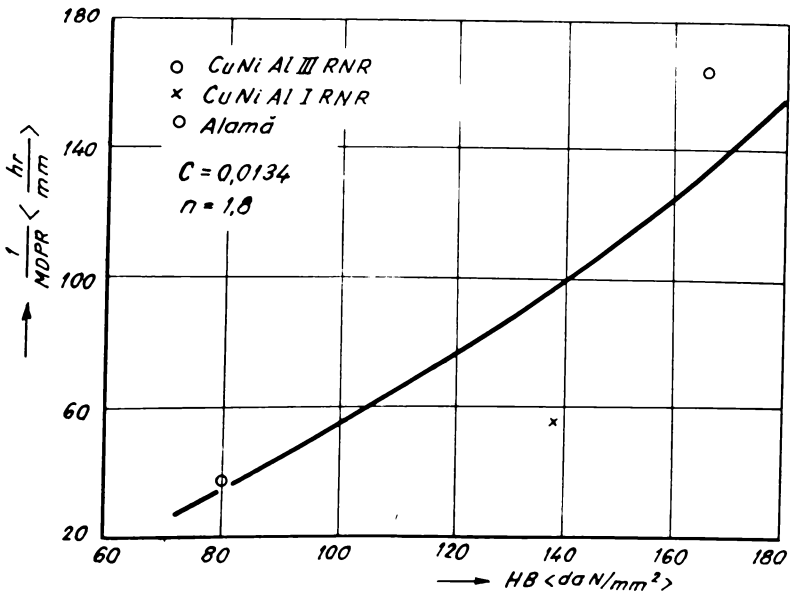


Fig. 4.10 Corelarea parametrului 1/MDPR cu duritatea materialului HB (Bronzuri si alame navale - T2)

Variatiile valorilor parametrului de scara "C", Tab. 4.1, arata dependenta sa de nivelul parametrilor tehnico-funcionali ai aparatului si de natura materialului. Capacitatea de distrugere a aparatului T1, in functie de natura materialului, este de $CT_1/CT_2 = 1,91 - 2,9$ ori mai mare decat a aparatului T2. Prin urmare raportul $CT_1/CT_1 =$ poate servi in stabilirea unei relatii de legatura intre parametrii tehnico-funcionali ai aparatelor vibratoare.

Curbele prezentate in fig. 4.4 ÷ 4.10, arata tendinta de scadere a vitezei adancimii medii de patrundere, respectiv de crestere a rezistentei cavitationale (scaderea vitezei de eroziune cavitationala), cu cresterea duritatii materialului.

Cum determinarea parametrului $1/MDPR$ necesita un timp mai mare decat stabilirea vitezelor de eroziune cavitationala v_{max} si v_s , se propune analiza influentei proprietatilor mecanice pe baza dependentelor grafice dintre acestea si vitezele de eroziune cavitationala.

Unii autori, ca Plesset si Devine [3], Hobbs [41], Hammitt [40a], Franc [30a], considera ca parametrul cel mai indicat in compararea materialelor dupa rezistenta la cavitate este valoarea maxima a vitezei de eroziune cavitationala, fig. 4.11 si 4.12, se prezinta corelatiile $HB(v_{max})$ pentru grupa otelurilor aliate pentru constructii. Din aceste figuri rezulta ca tendinta influentei duritatii materialului, asupra comportamentului cavitional, se mentine.

Insa, Thiruvengadam [3, 111] motiveaza si sustine compararea materialelor dupa valoarea vitezei de stabilizare a eroziunii cavitationale. Aceasta opinie este impartasita si aplicata de foarte multi autori, printre care Kuzman [52, 53], Steller [107], Noskievici [66, 67], Karimi [47, 48], Popoviciu [78 ÷ 79]. Reprezentarea grafica a dependentei $HB(v_s)$, fig. 4.13, pentru aceeasi grupa de materiale (oteluri aliate pentru constructii) evidentiaza mentinerea tendintei de influenta a rezistentei cavitationale de duritatea materialului, ca si in cazul corelatiei $HB(v_{max})$. Dat fiind faptul ca se urmareste tendinta de influenta a rezistentei cavitationale de principalele proprietati mecanice ($R_m, R_{p0.2}, HB$) care se pastreaza, indiferent de viteza utilizata, s-a preferat discutarea pe baza corelarii acestora cu v_s , redate pe grupe, astfel:

- oteluri carbon nealiate in fig. 4.14, 4.15 si 4.16,
- oteluri aliate pentru constructii in fig. 4.13, 4.17 si 4.18,
- oteluri inoxidabile in fig. 4.19, 4.20 si 4.21,
- bronzuri si alame navale in fig. 4.22, 4.23 si 4.24.

Constructia grafica s-a realizat cu calculatorul. S-au folosit mai multe curbe, dar s-a constatat ca dreptele redau cel mai bine tendinta de corelare a proprietatilor mecanice cu viteza de eroziune cavitationala. La curbele de ordin superior s-a renuntat, deoarece, in functie de distributia punctelor, evolutia curbei capata o forma ce poate crea impresia ca la crestere valorice ale lui R_m, HB sau $R_{p0.2}$, viteza de eroziune trebuie sa creasca, ceea ce contrazice toate rezultatele obtinute de specialisti [3]. Aceasta crestere este posibila doar pentru materialele cu o structura fibroasa (grosolana) si foarte fragila (fonte, oteluri cu foarte mult Mn [48]).

In Tab.4.2 sunt afisati coeficientii curbelor, erorile maxime si minime precum si abaterea atandard empirica. Relatiile ce stau la baza calculului marimilor statistice sunt:

- **abaterele standard empirice**

$$(\sigma_{n-1})_j = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_{ji} - \bar{a}_j)^2}{n-1}} \quad \begin{array}{l} j = 1, 2, 3 \\ j = 1 \text{ - pt. } R_m \\ j = 2 \text{ - pt. } R_{p0,2} \\ j = 3 \text{ - pt. } HB \end{array} \quad (4.2)$$

- abaterile medii:

$$a_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_{ji} \quad (4.3)$$

- abaterile maxime si minime relative:

- pentru rezistenta mecanica:

$$a_{1, \max/\min} = \frac{(R_m)_c - (R_m)_{i \min, \max}}{(R_m)_c} \quad (4.5)$$

- pentru duritatea materialului:

$$a_{3, \max/\min} = \frac{(HB)_c - (HB)_{i \min, \max}}{(HB)_c} \quad (4.6)$$

- pentru limita de curgere:

$$a_{2, \max/\min} = \frac{(R_{p0,2})_c - (R_{p0,2})_{i \min, \max}}{(R_{p0,2})_c} \quad (4.7)$$

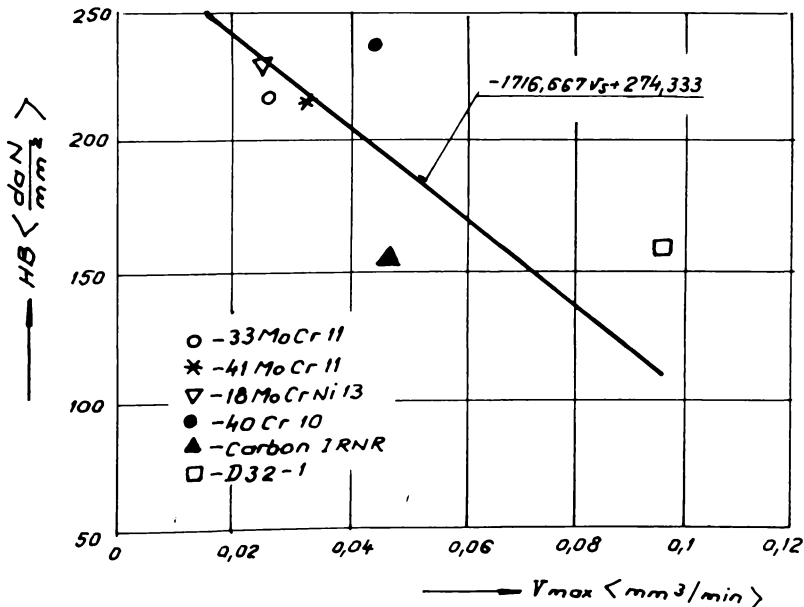


Fig. 4.11 Corelarea duritatii materialului cu viteza de eroziune cavitationala (oteluri aliate pentru constructii - T1)

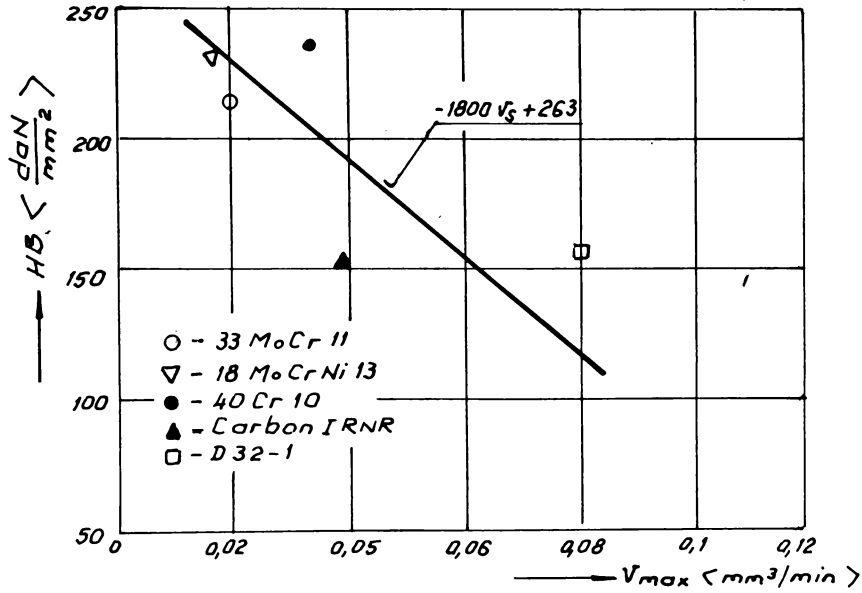


Fig. 4.12 Corelarea duritatii materialului cu viteza de eroziune cavitacionala (oteluri aliate pentru constructii - T2)

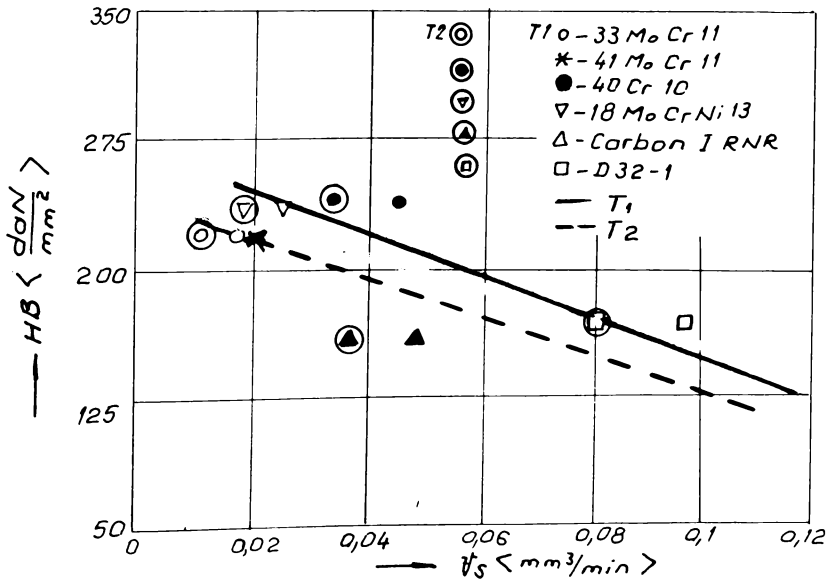


Fig. 4.13 Corelarea duritatii materialului cu viteza de eroziune cavitacionala (oteluri aliate pentru constructii)

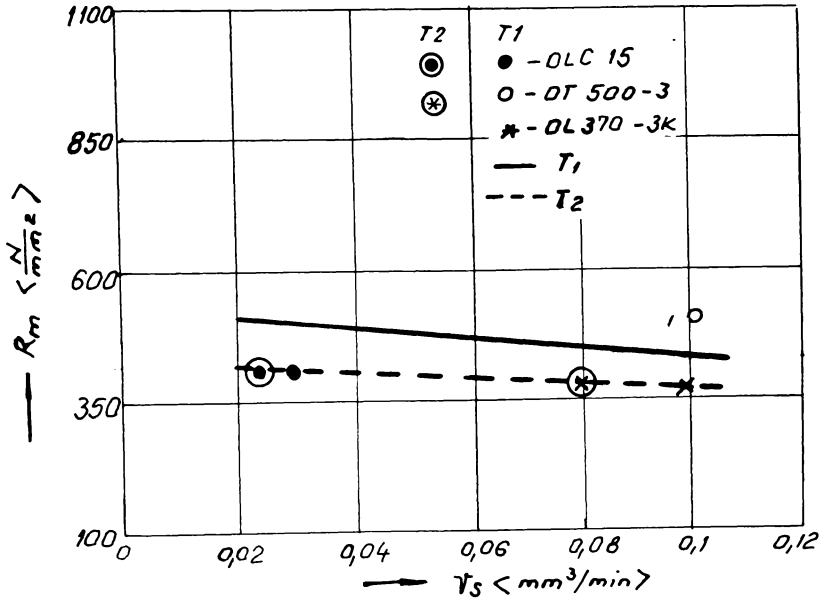


Fig. 4.14 Corelarea rezistenței mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitațională (oteluri carbon nealiat)

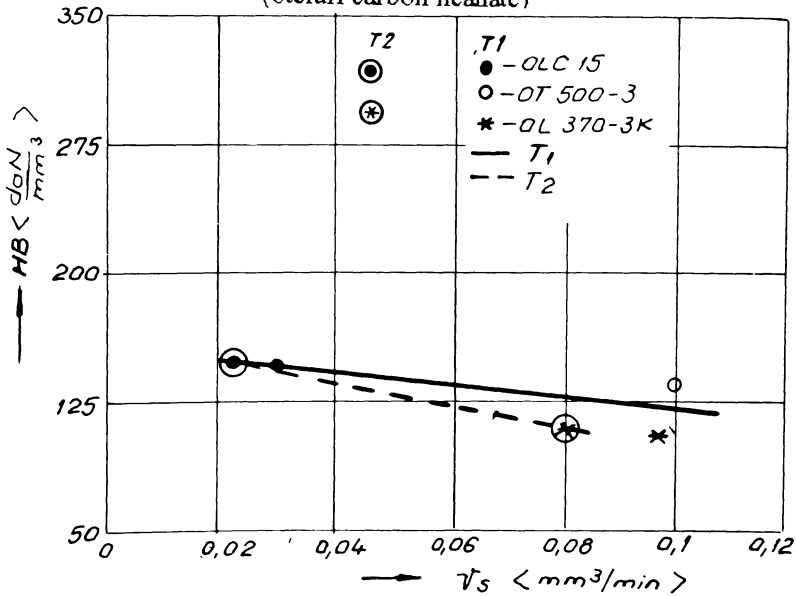


Fig. 4.15 Corelarea durității materialului cu viteza de eroziune cavitațională (oteluri carbon nealiat)

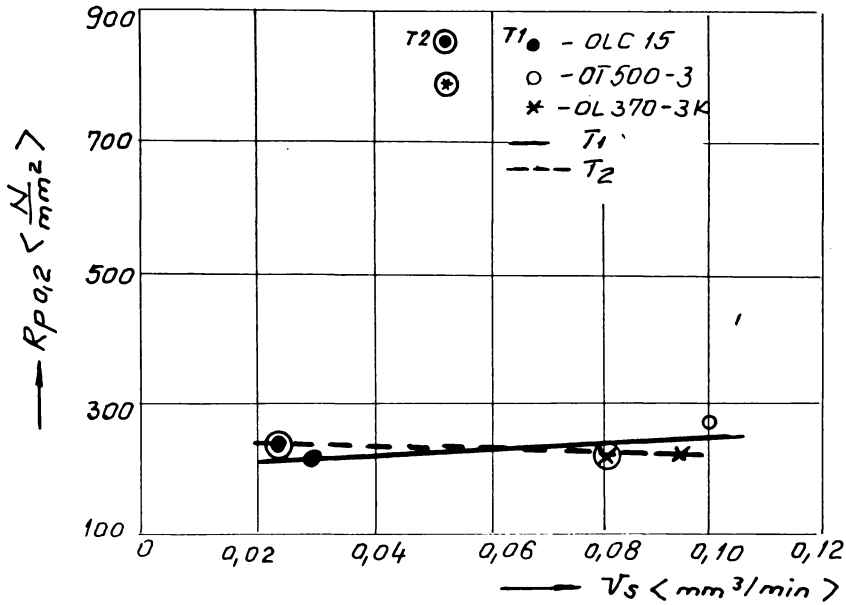


Fig. 4.16 Corelarea limitei de curgere cu viteza de eroziune cavitacionala (oteluri carbon nealiate)

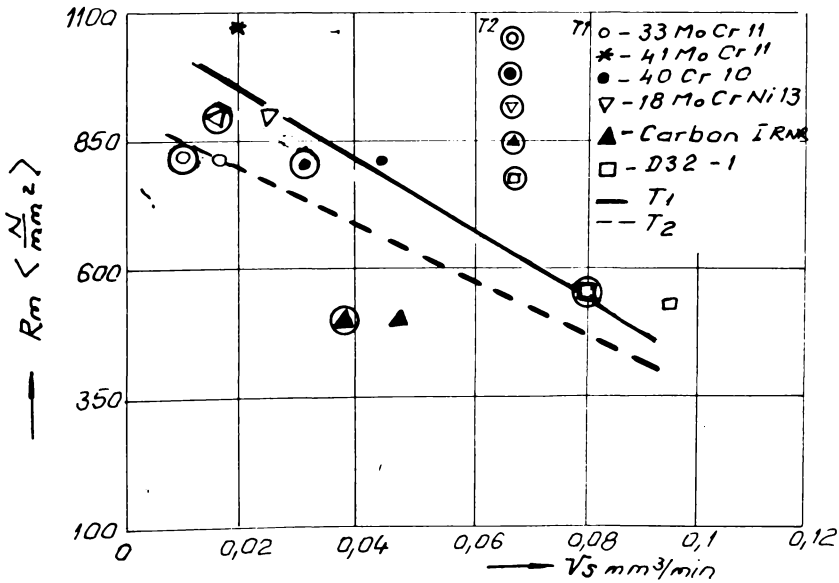


Fig. 4.17 Corelarea rezistentei mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitacionala (oteluri aliate pentru constructii)

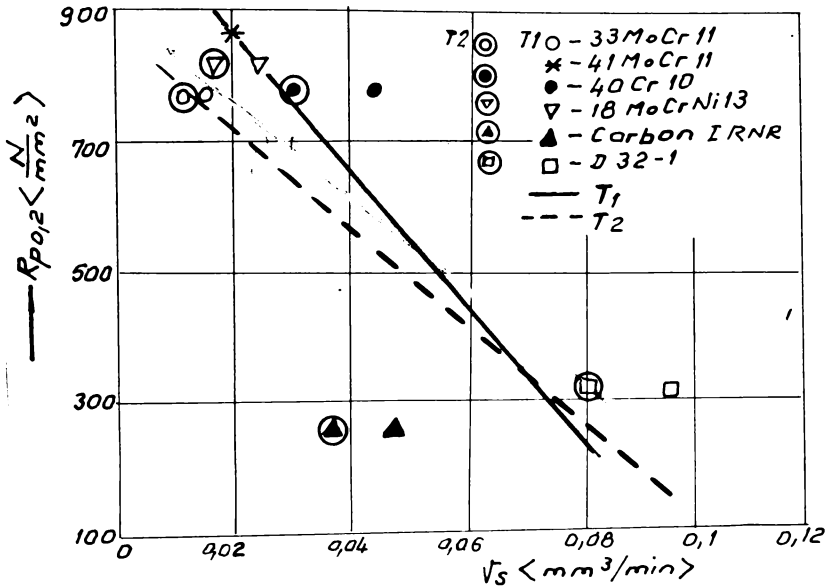


Fig. 4.18 Corelarea limitei de curgere cu viteza eroziune cavitationala (oteluri aliate pentru constructii)

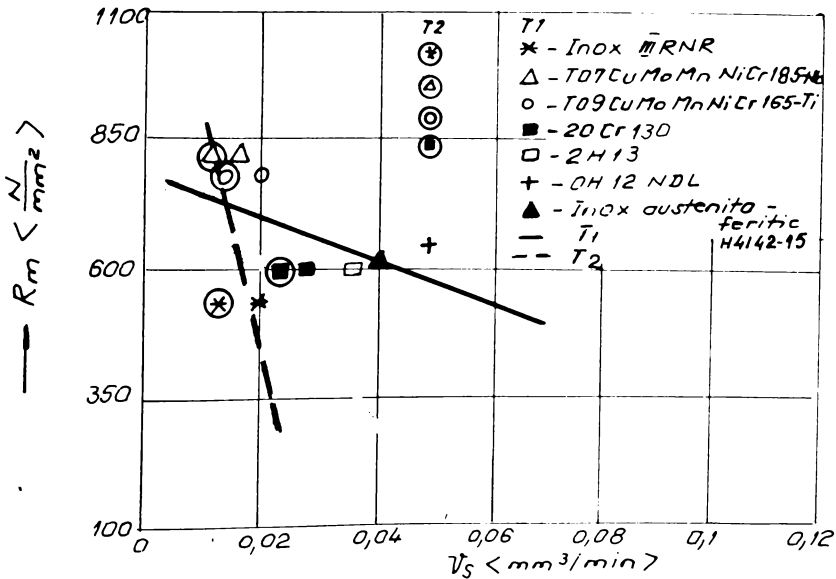


Fig. 4.19 Corelarea rezistentei mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitationala (oteluri inoxidabile)

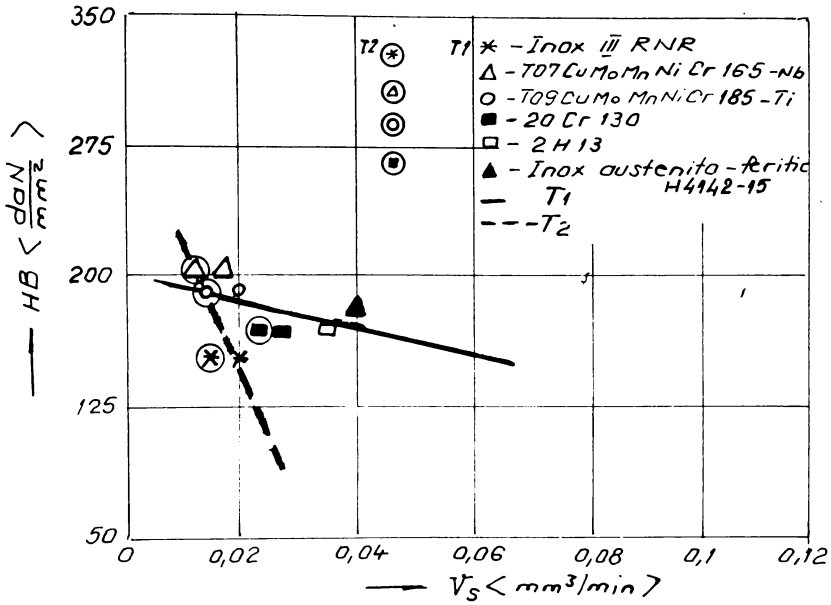


Fig. 4.20 Corelarea duritatii materialului cu viteza de eroziune cavitacionala (oțeluri inoxidabile)

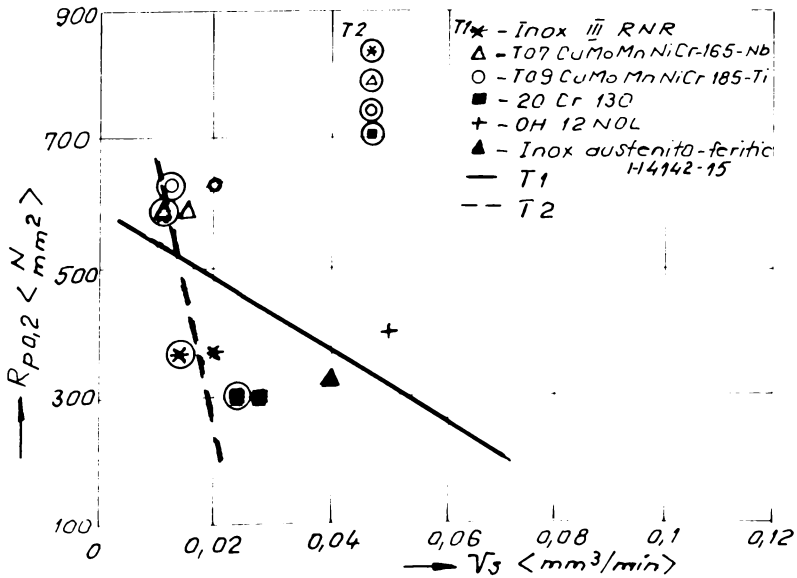


Fig. 4.21 Corelarea limitei de curgere cu viteza de eroziune cavitacionala (oțeluri inoxidabile)

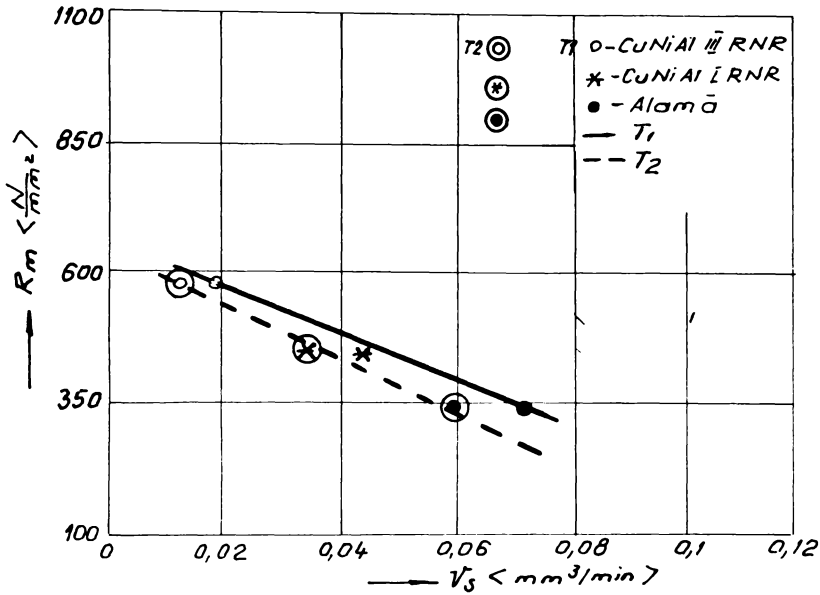


Fig.4.22 Corelarea rezistentei mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitacionala (bronzuri si alame navale)

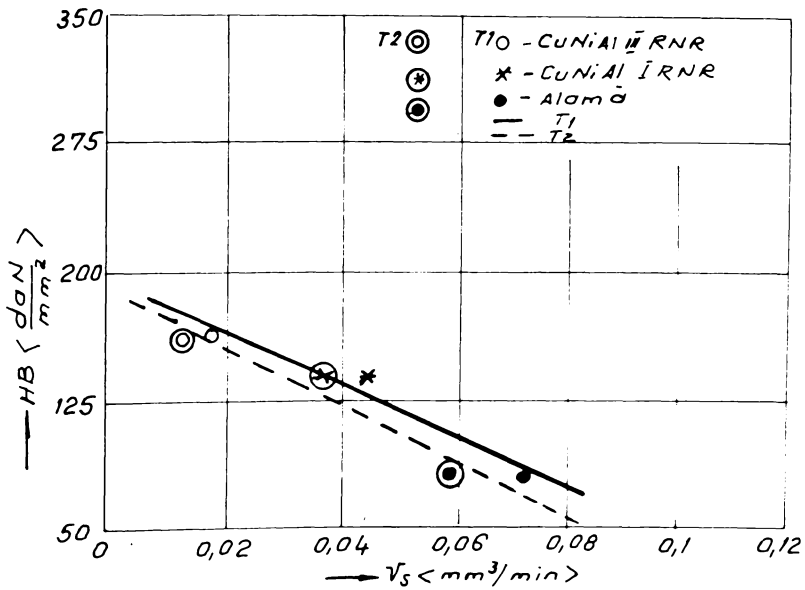


Fig. 4.23 Corelarea duritatii materialului cu viteza de eroziune cavitacionala (bronzuri si alame navale)

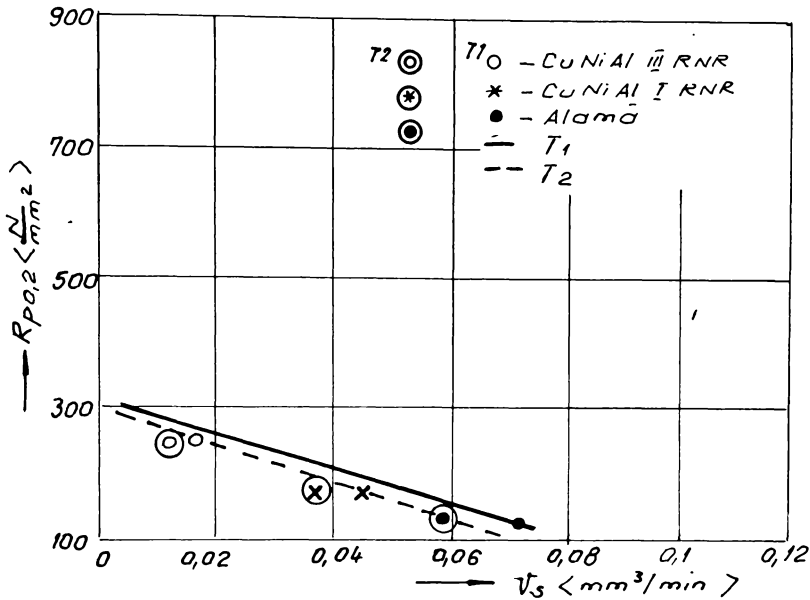


Fig. 4.24 Corelarea limitei de curgere cu viteza de eroziune cavitionala (bronzuri si alame navale)

In expresiile abaterilor marimile indexate cu "c" se refera la cele de pe curba iar cele cu "P" la cele reale corespunzatoare aceleiasi viteze de eroziune cavitionala.

Modul de evolutie al curbelor $R_m(v_s)$, $HB(v_s)$, $R_{p0,2}(v_s)$, fig.4.13 ÷ 4.24 si valorile parametrilor statistici, Tab.4.2, sunt o relevanta a modului in care proprietatile mecanice isi pun amprenta asupra rezistentei cavitationale a materialului. Din analiza acestora se desprind urmatoarele:

1. - in general, cu cresterea nivelului principalelor proprietati mecanice (R_m , HB , $R_{p0,2}$) viteza de eroziune cavitionala tinde sa scada (creste rezistenta cavitionala).

2. - in cazul otelurilor carbon nealiate, cele mai mari abateri fata de dreapta de aproximatie, pentru corelatia $HB(v_s)$, fig. 4.15, sunt inregistrate la otelurile cu slaba rezistenta cavitionala OL 370-3k si OT 500-3, Tab.4.2. Se observa dispunerea aproape simetrica a celor doua materiale fata de dreapta de aproximatie. Fenomenul poate fi explicat prin :

- efectul benefic al duritatii mai mari a otelului OT 500-3 ($HB = 138$ daN/mm) care-l departeaza de dreapta de apoximatie, fig.4.15, determinata de cantitatea mai mare de perlita (40% - Tab 3 2) in raport cu OL 370-3k (15% - Tab.3.2), este diminuat de structura mai fibroasa obtinuta prin turnare, ce conduce la pierderi mari prin eroziune cavitionala.

Tab. 4.2 Marimi statistice

Grupa de materiale		Corelatia														
		$R_{m} = C_1 \sqrt{S} + C_2$				$R_{p0,2} = C_3 \sqrt{S} + C_4$				$H_B = C_5 \sqrt{S} + C_6$						
		Coeficientii relatiei de legatură; mărimi statistice														
APARAT		C1	C2	σ_{1max} %	σ_{1min} %	$\bar{\sigma}_1$ N/mm ²	C3	C4	σ_{2max} %	σ_{2min} %	$\bar{\sigma}_2$ daN/mm ²	C5	C6	σ_{3max} %	σ_{3min} %	$\bar{\sigma}_3$ N/mm ²
Oteluri carbon nealiate	T1	-887,29	523,65	+15,5	-14,9	±66,3	354,22	217,12	+7,9	-6,9	±18,7	-327,13	1557,13	+13,25	-12,8	±13,06
	T2	-526,31	412,11	0	0	0	+175,44	244,04	0	0	0	-666,67	1559,333	0	0	0
Oteluri aliate ptr. constructii	T1	-6250	1038	+32,3	-19,3	±157,6	-10530	1068	+50,2	-36,5	±195,3	-1333	2157,333	+26,2	-10,2	±29,7
	T2	-5556	905,56	+28,0	-11,02	±110,8	-7547	866,048	+57,7	-26,5	±177,8	-1050	241	+30,7	-48,4	±60,7
Oteluri inoxidabile	T1	-5150	813	+22,5	-13,7	±105,3	-5714	597,14	+31,4	-33,3	±118,4	-805,156	203,22	+15,02	-31,4	±29,97
	T2	-4680	1413	+27,3	-39,2	±130,7	-50000	1250	+30,1	-40,0	±162,7	-7000	284	+14,5	-38,2	±31,1
Alame și bronzuri nobile	T1	-4448	655,53	+4,3	-2,9	±17,15	-1905,02	271,12	+6,6	-4,5	±10,65	-1557,7	196,89	+5,6	-7,5	±8,34
	T2	-5104,1	636,98	+4,0	-2,73	±15,87	-2187,8	263,23	+6,25	-4,34	±10,1	-1781,23	190,17	+5,9	-7,9	±8,8

- duritatea scazuta a otelului OL 370-3k, cauzata de cantitatea ridicata de ferita (85 %- Tab.3.2) - componenta cu cea mai mica rezistenta cavitationala [44]- duce la pierderi cavitationale de ordinul celor inregistrate pentru OT 500-3, chiar daca structura obtinuta prin laminare este mai fina [35a, 65, 115].

Aceleasi materiale inregistreaza cele mai mari abateri si in cazul corelatiilor R_m (v_s) si $R_{p0,2}(v_s)$, Tab.4.2. Explicatia este legata de problemele expuse mai sus.

3. - in cazul otelurilor aliate pentru constructii, la corelatia $HB(v_s)$, fig. 4.13, abateri mari fata de dreapta de aproximatie se inregistreaza la otelurile 40Cr10 si Carbon I-RNR, Tab.4.2. Probabil, aceste abateri se datoreaza martensitei (componenta dura [114,115]) existenta in cantitati diferite, dar nu in proportii prea mari, astfel incat se modifica, esential, numai proprietatile mecanice, dar nu si comportamentul cavitional al celor doua materiale.

In cazul legaturilor $R_m(v_s)$ si $R_{p0,2}(v_s)$, fig.4.17 si 4.18, cele mai mari abateri, fata de dreptele de aproximatie, le prezinta otelurile 41MoCr11 si Carbon I-RNR, Tab.4.2. Aceste abateri pot fi determinate de expulzarea acelor de martensita sau bainita, de mari dimensiuni, rupte intr-un timp mai mare de atac cavitional. Si din aceste figuri rezulta ca 40Cr10 are o concentratie mai mare de martensita decat Carbon I-RNR, dar mai grosolana, evidentiata de comportarile cavitationale asemanatoare (viteze de eroziune apropiate valoric). Acest aspect ilustreaza foarte clar actiunea comuna a structurii si proprietatilor mecanice asupra rezistentei materialului la atacul cavitional.

4. - in cazul otelurilor inoxidabile, fig.4.19, 4.20 si 4.21, cele mai mari abateri le prezinta otelul inoxidabil III-RNR, Tab.4.2. Abaterile mai mari ale acestui otel, provenit din semifabricat laminat, fata de inoxul turnat T09CuMoMnNiCr185-Ti cu rezistenta cavitationala similara si bine dispus fata de dreapta de aproximatie, se datoreaza cantitatii de ferita mai ridicate la Inox III-RNR (50 %-Tab.3.2). Acest aspect arata legatura dintre proprietati, structura si tehnologia de elaborare ce influenteaza unitar distrugerea cavitionala a materialului.

5. - in cazul bronzurilor si alamelor navale, fig.4.22, 4.23 si 4.24 s-a obtinut cea mai buna aproximare. Un factor important in buna aproximare o constituie realizarea celor trei aliaje prin turnare. Aceste figuri arata cel mai bine tendinta de influenta a proprietatilor mecanice asupra comportarii materialelor la atacul cavitional.

4.5 INFLUENTA MATERIALULUI ASUPRA CORELATIILOR $R_m(v_s)$, $HB(v_s)$ SI $R_{p0,2}(v_s)$

Alegerea unui material pentru aplicatii practice, cel mai des, se face pe baza proprietatilor mecanice rezistenta mecanica la rupere, R_m , duritatea HB si limita de curgere $R_{p0,2}$ [65, 115].

Ca o sinteza a influentei proprietatilor mecanice asupra rezistentei materialelor la distrugerea cavitionala in fig.4.25 - 4.30 s-au suprapus dreptele ce dau corelatiile dintre proprietatile mecanice si viteza de stabilizare a eroziunii cavitationale, pentru

cele 4 grupe de materiale testate in cele doua aparate vibratorii T1 si T2. Panta dreptelor din aceste figuri este un indicator pentru compararea rezistentei cavitationale a materialelor. Asadar, materialele cu cea mai mare rezistenta la eroziune cavitationala sunt otelurile inoxidabile (dreapta 1), iar cu cea mai scazuta otelurile carbon nealiatate (dreapta 3). Astfel, in cazul testelor din aparatul T1, pentru cresterea vitezei de eroziune cavitationala din zona de stabilizare cu $v_s = 0,02 \text{ mm}^3/\text{min}$ este necesara o scadere a valorilor proprietatilor mecanice cu

$R_m = 103 \text{ N/mm}^2$, (HB) = 16,1 daN/mm² si $R_{p0,2} = 114,3 \text{ N/mm}^2$ - pentru oteluri inoxidabile si $R_m = 17,7 \text{ N/mm}^2$, (HB) = 6,56 daN/mm² si $R_{p0,2} = 7,09 \text{ N/mm}^2$ - pentru oteluri carbon nealiatate; iar in cazul testelor din aparatul vibrator T2, pentru cresterea vitezei cu $v_s = 0,01 \text{ mm}^3/\text{min}$ este necesara o scadere a nivelului proprietatilor mecanice cu $R_m = 48,8 \text{ N/mm}^2$, (HB) = 70 daN/mm² si $R_{p0,2} = 500 \text{ N/mm}^2$ pentru inoxuri si $R_m = 5,26 \text{ N/mm}^2$, (HB) = 6,67 daN/mm² si $R_{p0,2} = 1,75 \text{ N/mm}^2$ pentru oteluri carbon nealiatate.

Se remarca, de asemenea, o zona in jurul vitezei $v_s = 0,038 \text{ mm}^3/\text{min}$, la aparatul T1 si $v_s = 0,02 \div 0,04 \text{ mm}^3/\text{min}$, la aparatul T2, in care tind sa se intalneasca dreptele otelurilor carbon nealiatate si inoxidabile cu cea a bronzurilor navale, ceea ce denota existenta unor materiale din cele 3 grupe ce pot avea comportari cavitationale similare (OLC15, Inoxul austenito - feritic H4142-15, CuNiAl I-RNR).

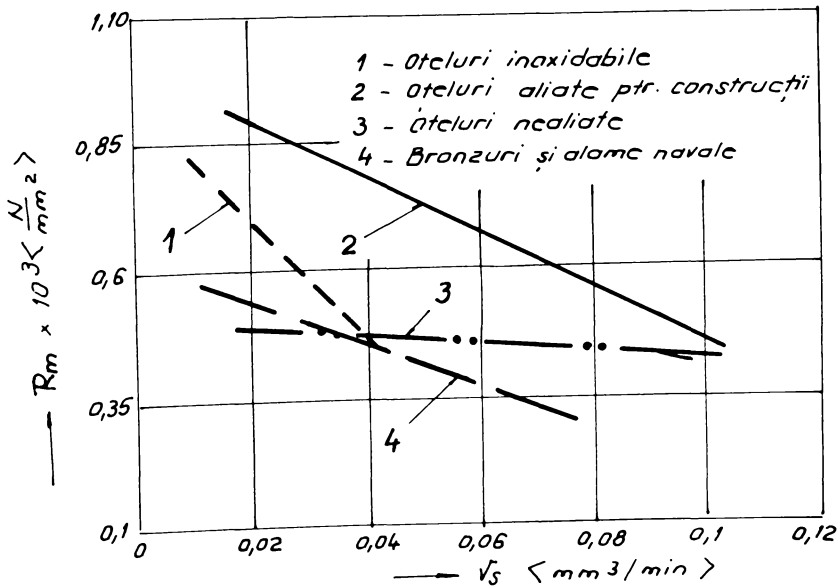


Fig.4.25 Comparatie intre corelarea rezistentei mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitationala, pentru diverse grupe de materiale (T1)

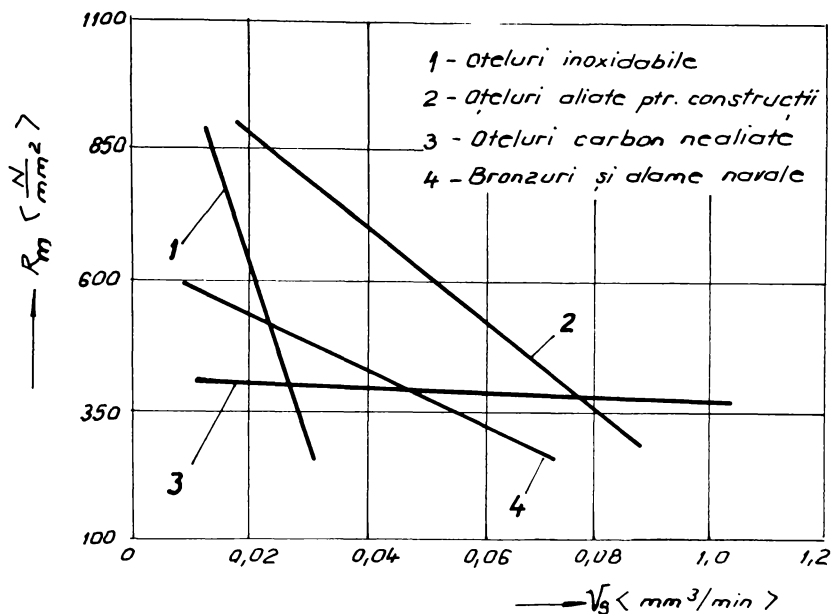


Fig.4.26 Comparatie între corelarea rezistenței mecanice la rupere cu viteza de eroziune cavitațională, pentru diverse grupe de materiale (T2)

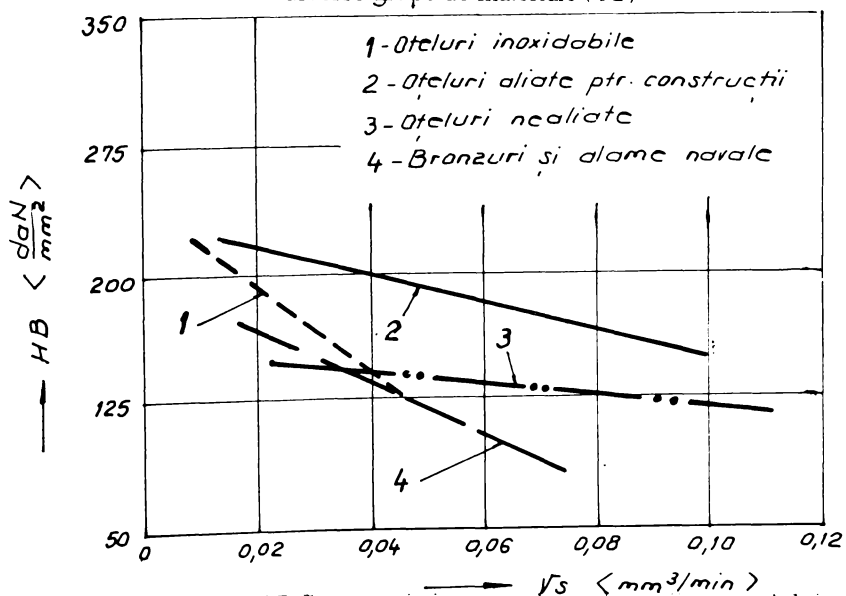


Fig.4.27 Comparatie între corelarea duntatului materialului cu viteza de eroziune cavitațională pentru diverse grupe de materiale (T1)

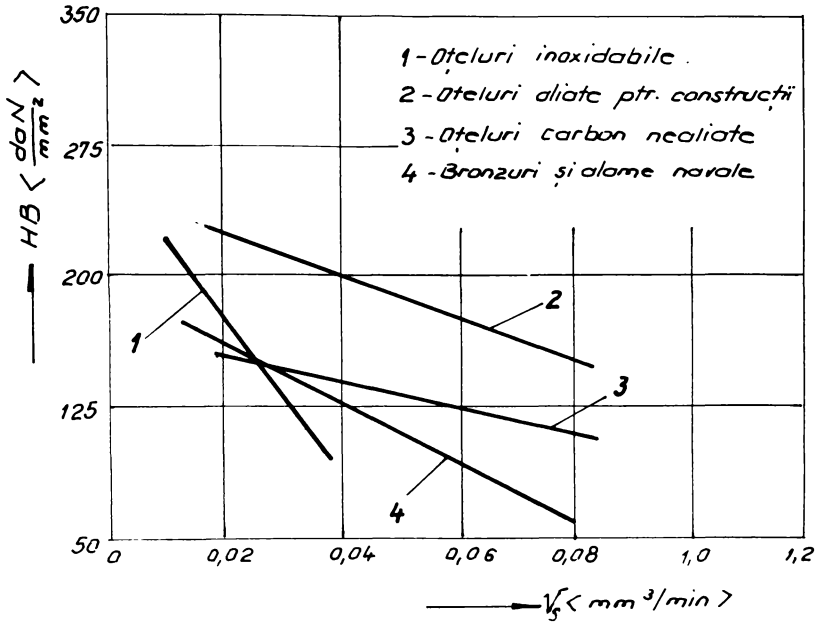


Fig.4.28 Comparatie intre duritatea materialului cu viteza de eroziune cavitacionala pentru diverse grupe de materiale (T2)

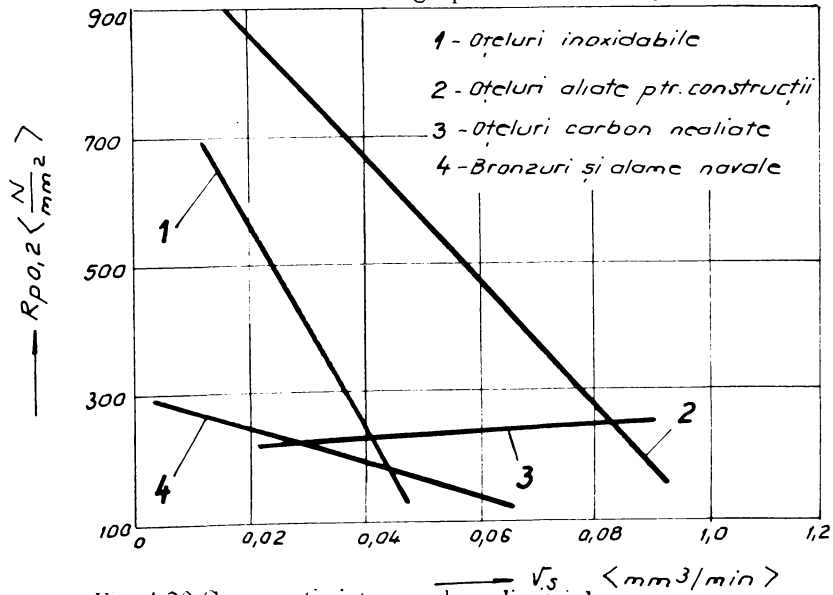


Fig. 4.29 Comparatie intre corelarea linutei de curgere cu viteza de eroziune cavitacionala pentru diverse grupe de materiale (T1)

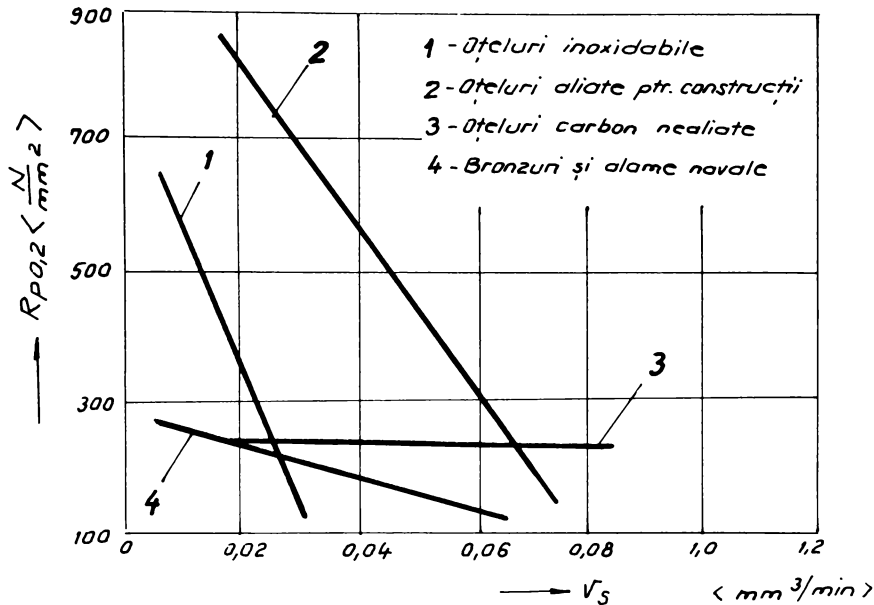


Fig. 4.30 Comparatie între corelarea limitei de curgere cu viteza de eroziune cavitacionala pentru diverse grupe de materiale (T2)

Pantele apropiate dintre dreptele oțelurilor aliate pentru construcții și bronzurilor navale arată comportamentul cavitacional similar. Acest aspect pune în evidență, încă odată, legătura dintre proprietățile fizico-mecanice, compoziția chimică, structura și tehnologia de fabricație a materialelor. Suportul afirmației este argumentat de:

- 1.- constituția structurală a oțelurilor aliate pentru construcții este formată din: ferită, perlită, bainită și martensită (Tab.3.2),
2. - constituția structurală a bronzurilor navale este: soluție solidă, total diferită de a oțelurilor aliate pentru construcții (Tab.3.2),
3. - cota procentuală de participare a elementelor de aliere (Mn, Ni, Cr, Mo) este diferită la oțeluri aliate și bronzuri, Tab.3.1,
4. - probele din oțelurile aliate provin din semifabricate laminare, iar cele din bronzuri din semifabricate turnate.

4.6. O METODA DE APRECIERE A COMPORTARII MATERIALELOR LA EROZIUNE CAVITATIONALA

O problema, neabordata de specialistii in eroziunea cavitationala, o constituie limitele pana la care materialele testate pot fi considerate:

- a. - cu slaba rezistenta la eroziune cavitationala,
- b. - cu buna rezistenta la eroziune cavitationala,
- c. - cu foarte buna rezistenta la eroziune cavitationala,
- d. - cu excelenta rezistenta la eroziune cavitationala,
- e. - superrezistente la eroziune cavitationala.

In majoritatea studiilor aprecierea rezistentei la eroziune cavitationala se face prin una din metodele:

1. - compararea pantei curbelor ce dau variatia volumului erodat $V(t)$, respectiv a masei erodate $m(t)$, in functie de timpul de atac cavitational, cu ale materialului etalon [2 - 4, 16 - 19, 53, 68, 77, 89, 106, 128, 133]

2. - compararea valorilor maxime, v_{max} , sau de stabilizare, v_s , a vitezelor de eroziune cavitationala cu ale materialului etalon [9 - 12, 80, 52, 53, 68, 111].

3. - compararea vitezelor adancimilor maxime, $MDPR_{max}$, si medii, $MDPR$, cu ale materialului etalon [3, 30a, 33, 40, 40a]-in prezent utilizata cel mai putin.

De obicei ca material etalon se utilizeaza un otel cu rezistenta cavitationala buna s-au foarte buna. Pentru Laboratorul Universitatii din Michigan materialul etalon il constituie ionxul 304 SS [33, 95a]. Pentru Laboratorul de Masini Hidraulice din Timisoara (LMHT) ca material etalon se foloseste otelul 40Cr10. Pana in anul 1994, s-a utilizat otelul inoxidabil OH12NDL.

Aprecierea comportamentului cavitational prin primele doua metode necesita, de fiecare data, construirea curbelor $V(t)$ (respectiv $m(t)$) sau $v(t)$, pentru materialul analizat si cel etalon.

Pentru definirea limitelor de existenta a domeniilor de apreciere a rezistentei cavitationale a materialelor s-a preferat folosirea formelor adimensionale $R_{ns} = v_s/v_{s_e}$ sau $R_{n_{max}} = v_{max}/v_{max_e}$ (marimile cu indicele "e" se refera la otelul etalon 40Cr10). Desigur, cele doua limite, pentru o rezistenta cavitationala excelenta, trebuie sa fie foarte apropiate, in timp ce pentru una slaba cele doua limite trebuie sa fie cat mai departate.

Prin analiza rezultatelor obtinute in LMHT se propun valorile din Tab. 4.3, in ordinea scaderii rezistentei la eroziune cavitationala.

Tab.4.3 Limite pentru diferite rezistente la eroziune cavitionala

<i>Clasa</i>	<i>Super-rezistentă</i>	<i>Excelentă</i>	<i>Foarte bună</i>	<i>Bună</i>	<i>Slabă</i>
R_{ns}	$< 0,2$	$[0,2 \div 0,4)$	$[0,4 - 0,8)$	$[0,8 - 1,6)$	$\geq 1,6$
R_{nmax}	$< 0,25$	$[0,25 \div 0,5)$	$[0,5 - 1,0)$	$(1,0 - 2,0)$	$\geq 2,0$

Limitele au fost stabilite dupa regula dublarii intervalului la fiecare descrestere (de trecere de la o clasa superioara la una inferioara). Aceasta regula a fost aplicata atat la clasificarea dupa R_{ns} cat si dupa R_{nmax} . O astfel de procedura corespunde principiului extinderii clasei [86], dar nu are nici un alt suport teoretic.

Luand in calcul aceste limite, materialele testate in LMHT, pe cele doua aparate vibratorii, sunt prezentate in Tab.4.4. in grupa ce corespunde cel mai bine comportarii cavitationale.

Este interesant de notat ca in clasele "excelente" si "slabe" sunt incluse materiale ce respecta criteriile din Tab.4.3. Pentru clasele de mijloc (foarte bune si bune) apar cateva diferente care sunt prezentate in Tab.4.5. Majoritatea diferentelor prezentate in Tab.4.5 se refera la materialele a caror rata constanta de eroziune esta egala cu rata de eroziune maxima ($R_{ns} = R_{nmax}$).

Cand limitele celor doua metode nu difera una de alta este recomandat ca ordonarea materialelor sa se faca dupa metoda R_{ns} . Evident variatiile mari ale valorilor rapoartelor R_{nmax}/R_{ns} releva cateva deficiente in ceea ce priveste comportarea la cavitate. Aceste rapoarte sunt prezentate, pentru cateva materiale, in Tab. 4.6. Este interesant de notat ca valori importante R_{nmax}/R_{ns} apar in toate clasele de calitate, indiferent de tipul aparatului utilizat.

Verificarea metodei s-a facut si pe baza rezultatelor experimentale obtinute de Garcia la distrugerea cavitionala a sase oteluri, testate in aparatul vibrator de la Michigan [32] ($A = 25,4\mu m$, $f = 20$ kHz, $d = 14,3$ mm). Materialul etalon pentru acest aparat este otelul 304 SS. Din prelucrarea rezultatelor, obtinute de Garcia [32], s-au obtinut, pentru parametri R_{ns} si R_{nmax} , valorile din Tab. 4.7.

Se constata ca, dupa valorile celor doi parametri adimensionali, materialele testate de Garcia, Tab.4.7, se incadreaza in limitele claselor ce corespund comportamentului lor cavitional, Tab.4.3.

Aceasta verificare arata ca metoda poate fi extinsa si la alte aparate vibratorii.

Metoda propusa de autor arata ca ordonarea materialelor dupa rezistenta la distrugere cavitionala, Tab.4.4, nu concorda cu criteriile standard de clasificare pe grupe de calitate (oteluri carbon nealiate, oteluri aliate pentru constructii, oteluri inoxidabile, etc.) [65, 115, 122 -126]. Datorita acestui dezacord se impune cuprinderea in normele standard a unor prevederi legate de comportamentul cavitional al materialelor, in special al celor utilizate, frecvent, in fabricarea pieselor de tipul: palete de turbine hidraulice, rotoare de pompe, elici navale.

Tab.4.4 Clasificarea dupa parametrii eroziunii cavitationale

Rezist. cavit.	Material	T ₁		T ₂	
		R _{ns}	R _{nmax}	R _{ns}	R _{nmax}
excellentă	T07 CuMoMnNiCr 165-Nb	0,36	0,36	0,38	0,34
	33 Mo Cr 11	0,38	0,6	0,38	0,66
	Cu Ni AL III RNR	0,38	0,4	0,38	0,34
foarte bună	Inox III RNR	0,44	0,44	0,48	0,43
	T09 CuMoMnNiCr 165-Ti	0,44	0,44	0,43	0,39
	20 Cr 130	0,62	0,62	0,69	0,72
	2 H 13	0,77	1,13	-	-
	18 MoCr Ni 13	0,55	0,55	0,59	0,53
	41 MoCr 11	0,44	0,77	-	-
	DLc 15	0,67	0,67	0,8	0,72
bună	Inox austenito-feritic H 4142 - 15	0,88	0,88	-	-
	DH 12 NDL	1,16	1,33	-	-
	40 Cr 10	1,0	1,0	1,0	1,0
	Carbon I RNR	1,07	1,07	1,31	1,19
	Fgn 450 - 5	0,82	1,71	-	-
	CuNiAl I - RNR	0,98	1,16	1,14	1,09
slabă	DT 500 - 3	2,22	2,88	-	-
	DL 370 - 3K	2,04	2,17	2,66	2,7
	D 32 - 1	2,11	2,11	2,6	2,5
	Alamă	1,6	2,11	1,93	1,84

Tab.4.5 Diferente între clasificarea după R_{nmax} și R_{ns}

Material	Clasa / R_{ns}		Clasa R_{nmax}	
	T_1	T_2	T_1	T_2
33 MoCr 11	Excelentă 0,38	Excelentă 0,38	f.bună 0,6	f.bună 0,66
Inox austenita-feritic H4142 - 15	bună 0,88	—	f.bună 0,88	—
2 H 13	f.bună 0,77	—	bună 1,13	—
T09CuMoMnNiCr 185-Ti	f.bună 0,44	f.bună 0,43	excelentă 0,44	excelentă 0,39
Inox III RNR	f.bună 0,44	f.bună 0,48	excelentă 0,44	excelentă 0,43

Tab. 4.6 Valoarea R_{nmax}/R_{ns} pentru materialele testate

Material	$\frac{R_{nmax}}{R_{ns}}$		Clasa
	T_1	T_2	
33 MoCr 11	1,58	1,74	excelentă
CuNiAl III RNR	1,05	0,89	excelentă
2 H 13	1,47	-	foarte bună
H1 MoCr 11	1,75	-	foarte bună
0H 12 NOL	1,29	-	bună
Fgn 450 - 5	2,08	-	bună
CuNiAl I - RNR	1,18	0,96	bună
0T 500 - 3	1,30	-	slabă
0L 370 - 3K	1,09	1,04	slabă

Tab.4.7 Comportamentul cavitațional și parametrii săi caracteristici [32]

Material	R_{ns}	R_{nmax}	MDPR $\mu\text{m/hr}$	Comportare cavitațională
Oțel carbon	2,0	2,3	5,8	slabă
304 SS (oțel etalon)	1,0	1,0	2,54	bună
316 SS	0,9	0,9	2,28	bună
Mo - $\frac{1}{2}$ Ti	0,9	0,9	2,28	bună
Cb - IZr	1,25	1,5	3,7	bună
Cb - IZr (A)	1,8	1,8	4,57	bună

hr - ore

4.7. CONCLUZII

Investigatiile realizate in acest capitol au evidentiat ca in fiecare grupa exista materiale cu rezistenta cavitationala corespunzatoare diferitelor domenii (slaba, buna, foarte buna, excelenta) dependenta de factorii ce determina marca de material (constitutie structurala, compozitie chimica, tehnologie de elaborare si prelucrare, omogenitate structurala, etc.). Intrucat, pentru unele materiale caracteristici ca: rezistenta mecanica la rupere si limita de curgere tehnica, nu au fost masurate si s-au admis valorile medii standardizate, rezultatele prezentate au un anumit grad de subiectivitate. De aceea, pentru cresterea nivelului de obiectivitate, se impune obligativitatea insotirii probelor de un buletin de incercari si analize care sa cuprinda date privind rezultatele defectoscopiei, analizei metalografice si chimice si valorile proprietatilor fizico-mecanice. Necesitatea este dictata, in special, de variatia caracteristicilor mecanice in cadrul aceleiasi marci de material si aceleasi semifabricate provenite chiar si din aceeasi sarja [65, 115, 121 - 126a].

Dintre materialele studiate, cele mai inalte performante, din punct de vedere al rezistentei cavitationale, le au otelurile inoxidabile. Acestea se datoreaza buneii corelari dintre cotele procentuale de participare ale elementelor de aliere (Cr, Ni, Mn, Mo) si constituintilor structurali: austenita, martensita si ferita aliata, prin care se asigura o finete structurala si valori ale caracteristicilor mecanice ridicate.

Rezistenta cavitationala scazuta a otelurilor carbon nealiata se datoreaza lipsei elementelor de aliere, cantitatii ridicate de ferita (30 ± 90 %) si dimensiunilor mai mari ale grauntilor cristalini.

Rezistenta otelurilor aliata pentru constructii depinde de gradul si natura elementelor de aliere tinzand spre oteluri carbon nealiata sau inoxidabile.

Prin urmare, o clasificare a acestor metale, dupa rezistenta la distrugere prin eroziune cavitationala arata astfel:

- 1.- oteluri inoxidabile,
- 2.- oteluri aliata pentru constructii si bronzuri navale,
- 3.- oteluri nealiata si alame navale.

Metoda de stabilire a limitelor cantitative pentru rezistenta cavitationala a materialelor, prezentata de autor, poate fi utilizata si la alte aparate vibratoare. Din compararea acestor limite pot rezulta cai de corelare a rezultatelor experimentale.

CAP.5 COMPARAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE OBTINUTE IN CELE DOUA APARATE

O imagine de ansamblu asupra capacitatii distructive a aparatelor vibratorii T1 si T2, o ofera compararea rezultatelor experimentale prin valorile parametrilor eroziunii si curbele caracteristice $v(t)$, obtinute pentru fiecare material.

Se reaminteste ca in ambele aparate distrugerea materialelor se realizeza in acelasi mod. Vibratiile longitudinale duc la oscilatii ale presiunii lichidului la suprafata frontala a probei. La valorile minime ale acestor presiuni, pe suprafata probei apare un nor de bule cavitationale care la valori maxime se surpa provocand atacul cavitionalal..

Astfel, compararea celor doua aparate din LMHT pe baza curbelor $v(t)$ si valorilor parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale va evidentia, in principal, diferentele dintre intensitatile distructive si modul in care acestea depind de natura materialului.

5.1 COMPARATII INTRE CURBELE CARACTERISTICE

Compararea rezultatelor experimentale pe baza curbelor caracteristice este realizata pe grupe de materiale astfel:

- oteluri carbon nelaliate. fig.5.1.
- oteluri aliate pentru constructii. fig.5.2.
- oteluri inoxidabile. fig.5.3.
- bronzuri si alame navale. fig.5.4

Modul de evolutie al curbelor ilustreaza existenta unor elemente comune si diferite.

Elementele comune sunt:

- aceeasi ordonare a materialelor dupa rezistenta la atacul cavitionalal. exprimata prin palierul vitezei de eroziune cavitionalal.
- aceeasi tendinta de desfasurare a curbelor $v(t)$. cu mici diferente, nesemnificative, la otelurile D 32-1 si 40Cr10. fig.5.2 si 20Cr130. fig.5.3.

Aceste elemente depind atat de intensitate distructiva a aparatului cat si de natura materialului.

Diferentele semnificative apar intre:

- timpii la care se inregistreaza valoarea maxima si inceputul stabilizarii vitezei de eroziune cavitionalal. Cei corespunzatori materialelor testate in aparatul vibrator piezoceramic T2 tind spre valori mai mari.

- modul de atenuare a curbelor $v(t)$. La materialele testate in aparatul T2. care prezinta un maxim al vitezei de eroziune cavitionalal, atenuarea se realizeza ceva mai lent. Cauza principala o constituie intensitatea distructiva. mai mica, a aparatului.

Aceste diferente depind, in principal de parametrii functionali ai aparatului.

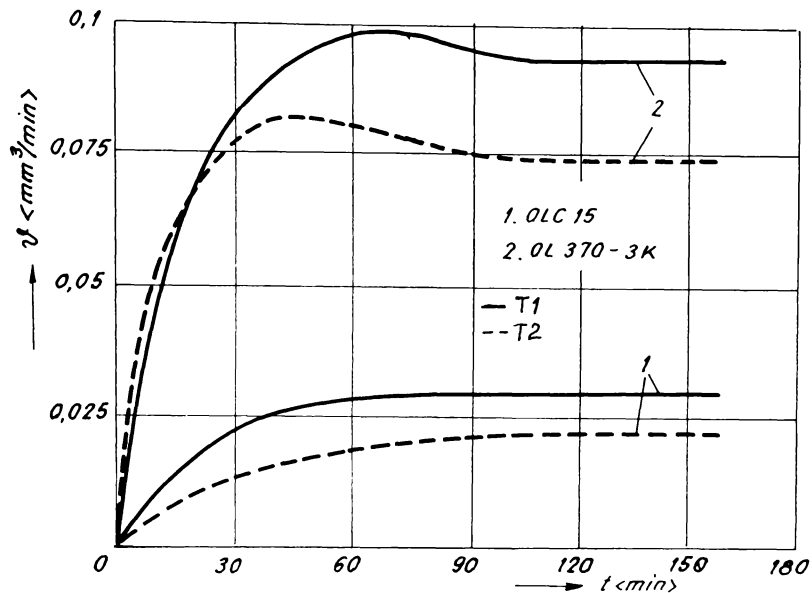


Fig.5.1 Comparatie intre curbele vitezelor de eroziune cavitationala (oteluri carbon nealiate)

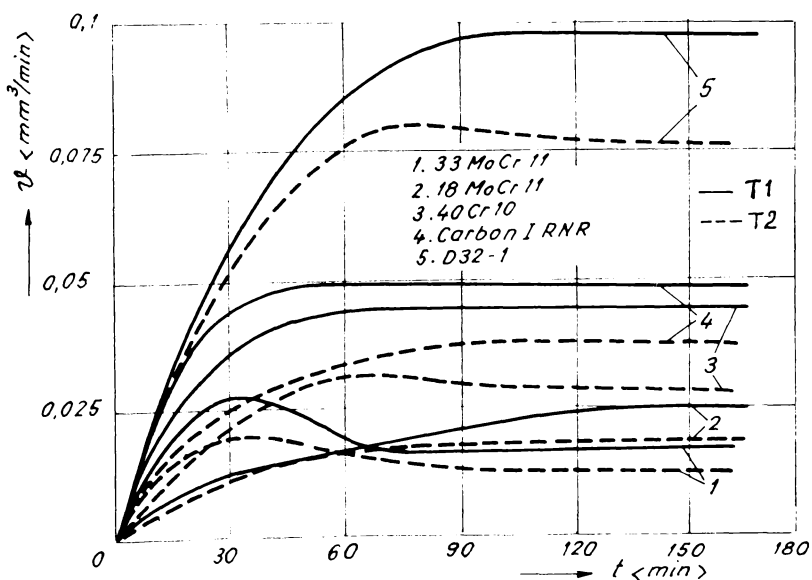


Fig.5.2 Comparatie intre curbele vitezelor de eroziune cavitationala (oteluri aliate pentru constructii)

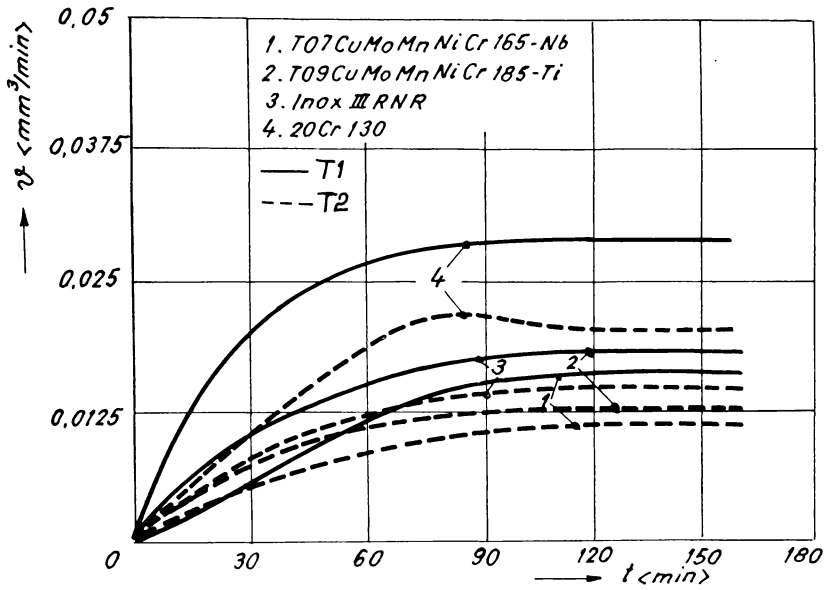


Fig.5.3 Comparatie intre curbele vitezelor de eroziune cavitacionala (oteluri inoxidabile)

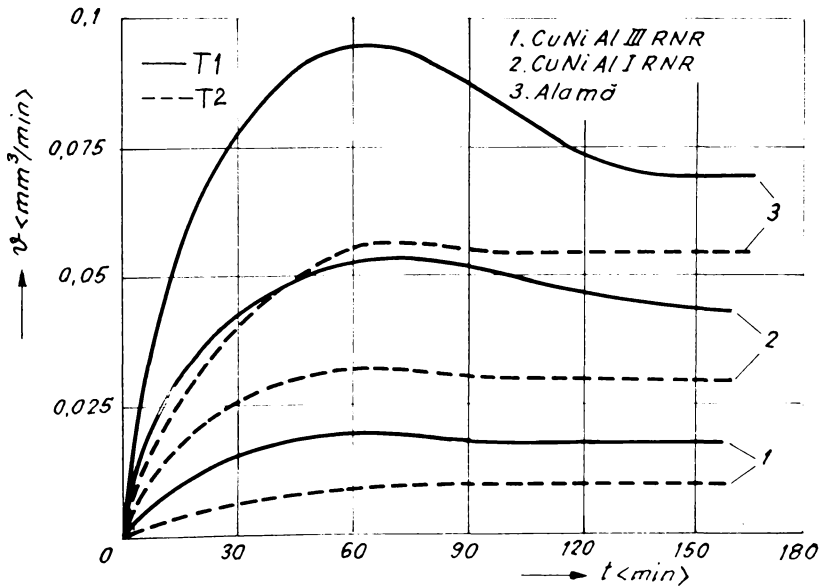


Fig.5.4 Comparatie intre curbele vitezelor de eroziune cavitacionala (bronzuri si alame navale)

Alura curbelor prezentate in fig.5.1 ÷ 5.4 este cea mai clara dovada a actiunii cumulate a tuturor factorilor, ce determina marca de material, asupra comportarii lor cavitationale, indiferent de aparatul folosit.

Prin urmare, forma curbei $v(t)$ este determinata de natura materialului si parametrii tehnico-functionali ai aparatului utilizat.

5.2 COMPARATII INTRE PARAMETRII CARACTERISTICI EROZIUNII CAVITATIONALE

Valorile rapoartelor parametrilor caracteristici proceselor de eroziune cavitationala produse in aparatele T1 si T2, Tab.5.1, evidentiaza capacitatea de distrugere mai mica a aparatului T2.

Tab.5.1 Comparatie intre parametrii caracteristici eroziunii cavitationale

Nr crt.	Material	$(V_{max})_{T1}$	$(Vs)_{T1}$	$(R_{nmax})_{T1}$	$(R_{ns})_{T1}$	$(MDPR)_{T1}$
		$(V_{max})_{T2}$	$(Vs)_{T2}$	$(R_{nmax})_{T2}$	$(R_{ns})_{T2}$	$(MDPR)_{T2}$
1	OLC 15	1,3	1,3	0,93	0,84	1,94
2	OL 370 -3K	1,18	1,19	0,83	0,76	1,42
3	33 MoCr 11	1,42	1,54	1,0	1,0	2,02
4	40 Cr 10	1,41	1,55	1,0	1,0	2,0
5	18 MoCrNi 13	1,47	1,47	1,04	0,93	1,68
6	Carbon IRNR	1,26	1,26	0,9	0,82	1,89
7	D 32 - 1	1,19	1,25	0,84	0,81	1,74
8	Inox III RNR	1,43	1,43	1,02	0,92	1,97
9	T07CuMoMnNiCr165-Nb	1,45	1,45	1,06	0,95	2,15
10	T09CuMoMnNiCr185Ti	1,6	1,6	1,13	1,02	1,87
11	20 Cr 130	1,22	1,4	0,86	0,9	2,39
12	CuNiAl III RNR	1,64	1,55	1,18	1,0	2,18
13	CuNiAl I RNR	1,49	1,33	1,06	0,86	1,4
14	Alomã	1,61	1,29	1,15	0,83	2,24

Se constata ca diferentele dintre intensitatile de distrugere ale celor doua aparate sunt mai ridicate la otelurile cu comportari cavitationale excelente si foarte bune (CuNiAl III-RNR, 33MoCr11, 18MoCrNi13, 20Cr130 T07CuMoMnNiCr165-Nb, T09CuMoMnNiCr185-Ti) scazand la cele slabe (OL 370-3k, D 32-1 si alama navala). Acest aspect arata ca nivelul tensiunilor induse in material, in timpul atacului cavitational, prin impactul cu microjeturile si undele de soc, este mai ridicat la aparatul T1. Fenomenul, mult mai evident la materialele cu rezistenta mare, a fost sesizat si de J.K.Steller [106] cand a comparat curbele de pierdere volumica $V(t)$, pentru 5 materiale testate in conditii apropiate si in sase aparate vibratorii din diferite laboratoare. Concluzia sa este aceeaasi; la aparatele cu amplitudini ale vibratiilor si puteri electrice de alimentare a generatoarelor electronice de ultrasunete ridicate aproape toate varfurile presiunilor, create pe suprafetele de atac ale probelor prin impactul cu undele de soc si microjeturile, depasesc nivelul rezistentelor de rupere a legaturilor cristaline si intercristaline.

Domeniu larg de variatie al raportului acestor parametri, chiar si in cadrul aceleiasi grupe, evidentiaza dependenta intensitatii distructive de natura materialului si parametrii functionali ai aparatului.

Faptul ca rapoartele $(R_{nmax})_{T1}/(R_{nmax})_{T2}$ si $(R_{ns})_{T1}/(R_{ns})_{T2}$ oscileaza in jurul valorii 1 cu $\pm 25\%$ (mai mult pentru materialele cu slaba comportare cavitationala), arata ca exista si alti factori, necunoscuti inca, care influenteaza rezistenta cavitationala a materialelor.

In concluzie se poate afirma ca aparatul T1 are o putere de distrugere mai ridicata decat aparatul vibrator T2, indiferent de materialul testat, datorita nivelului mai mare al parametrilor tehnico-functionali, Tab.1.3.





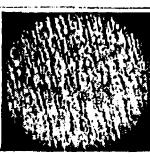

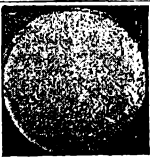
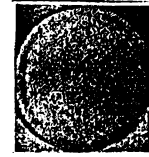
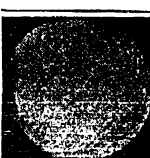
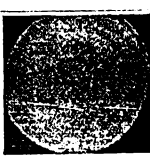


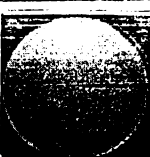
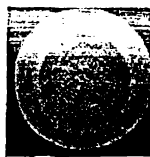









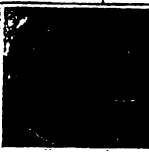
5.3 ASPECTE ALE SUPRAFETELOR ERODATE CAVITATIONAL

Aspectul suprafetelor probelor dupa 165 minute de atac cavitational, Tab.5.2, sunt o certitudine a intensitatii distructive mai ridicate la aparatul T1 si dependentei sale de material. Puterea mai mare de distrugere este mai evidenta la materialele cu rezistenta cavitationala scazuta (OL 370-3k, D-32-1 si alama navala) unde cavernele, produse prin eroziune, sunt exemplificative. La materialele cu rezistenta cavitationala buna, foarte buna, si excelenta, functie de: gradul de aliere, tipul structurii, finetea structurii si nivelul proprietatilor mecanice, diferentele nu sunt chiar asa de expresive.




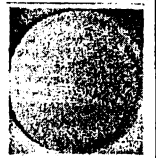

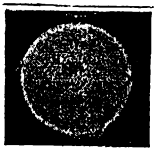


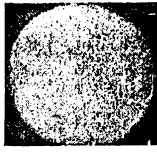
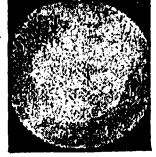


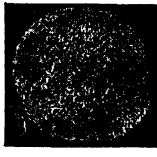



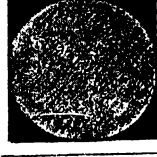
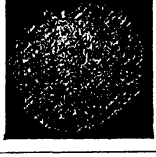
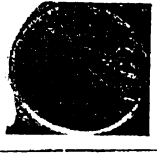


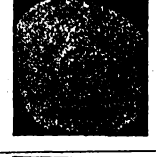
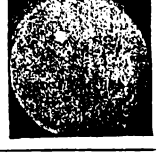
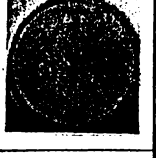




La probele testate in aparatul T2 diferentele, dintre suprafetele erodate, ale diferitelor probe, nu sunt chiar asa de mari, datorita capacitatii distructive mai reduse.

La toate probele, indiferent de aparatul folosit, se observa ciupiturile din suprafetele erodate, ceea ce demonstreaza caracterul de sollicitare dinamica, cu viteze foarte mari si de oboseala locala. Ciupiturile produse la probele testate in aparatul T2 par de dimensiuni mai mici si mai dese, dovedind ca in timpul atacului sunt expulzati parti din graunți. Conform ipotezei emise de J.K.Steller [106], privind nivelul

Tab. 5.2 Aspecte ale suprafețelor probelor erodate cavitațional

MATERIAL	Aparatul vibrator			
	magnetostrictiv (T_1)		piezoceramic (T_2)	
	Țiimpul de atac cavitațional			
	0 minute	165 minute	0 minute	165 minute
1	2	3	4	5
DLC 15				
DLC 370-3K				
33 MoCr 11				
40 Cr 10				
18 MoCrNi 13				
Carbon I RNR				

Tab. 5.2 Aspecte ale suprafețelor probelor erodate cavitațional (continuare)

1	2	3	4	5
D32-1				
Inox III RNR				
T07 CuMoMn Ni Cr 165-Nb				
T09 CuMoMn Ni Cr 185-Ti				
Cu Ni Al III RNR				
Cu Ni Al I RNR				
Alamã				

varfurilor de presiune exercitate pe suprafata de atac a probelor, este firesc sa se intample asa datorita frecventei de vibratie mai mare si amplitudinii mai reduse, decat la aparatul vibrator T1, ruperea legaturilor intercrystaline datorandu-se exclusiv oboselii.

5.4 CONCLUZII

Din cele prezentate in acest capitol rezulta dependenta distrugerilor cavitationale de parametrii tehnico-funcionali ai aparatului vibrator si calitatea materialului.

Toate rezultatele arata ca aparatul vibrator T1 are o putere de distrugere mai mare decat aparatul T2.

Fiecare aparat vibrator este caracterizat prin:

- a) - puterea acustica (dependenta de puterea electrica de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete [1]),
- b) - frecventa si amplitudinea vibratiilor,
- c) - diametrul probei,
- d) - natura si temperatura lichidului de lucru,
- e) - continutul de gaze din lichid.

Cum parametri c), d) si e) sunt identici (vezi Cap.3) rezulta ca diferenta dintre capacitatile de distrugere ale celor doua aparate este determinata de primii doi, a) si b).

De frecventa de oscilatie depinde numarul de bule ce se surpa in unitatea de timp. Experientele lui Okada-Hammitt [3,40] arata ca intensitatea distrugerilor devine maxima in jurul valorii $f = 15$ kHz. Pentru frecvente mai mari sau mai mici nivelul acestei intensitati scade.

Din experientele lui Thiruvengadam [3,111] rezulta ca volumul distrugerilor creste cu cresterea amplitudinii vibratiilor.

Din analiza rezultatelor obtinute pe mai multe aparate vibratorii, IMP Gdansk, VSB Ostrava, Wuxi China [106], Michigan [32, 33], rezulta ca puterea acustica este factorul cu ponderea cea mai mare in eroziunea cavitationala.

Prin urmare, puterea de distrugere, mai mare, a aparatului T1, se datoreaza nivelului mai ridicat al amplitudinii ($A = 47$ m) si puterii acustice (respectiv puterii electrice de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete, $P_e = 500$ W), Tab 1.3.

Cert este ca rezultatele obtinute pe ambele aparate sunt acoperitoare pentru situatiile reale din masinile industriale.

CAP.6 CERCETARI DE EROZIUNE CAVITATIONALA ASUPRA UNOR MATERIALE SUPUSE TRATAMENTELOR DE DURIFICARE

Functionarea sistemelor hidraulice in absenta completa a cavitatiei implica adesea cheltuieli de investitii mari. In consecinta, se considera economica eliminarea influentei cavitatiei asupra performantelor hidraulice ale sistemului prin mentinerea unei anumite extensiuni a acestui fenomen [8,72, 128,130]. Se obtine, astfel, o functionare in conditii de "cavitatie industriala acceptabila" care, cel mai adesea, inseamna uzuri cavitationale de mica extensiune, rezultate dupa etape lungi de exploatare. Pentru o anumita intensitate a cavitatiei uzurile pot fi diminuate prin alegerea unor materiale speciale. In aceasta categorie intra:

- oțelul inoxidabil inalt aliat cu crom (12 ÷ 25) % avand in compozitie cantitati variabile de nichel (1- 5) %, molibden, vanadium, mangan si cupru [72, 77];
- aliaj de cupru (bronzuri denumite CuNiAl) cu bune proprietati mecanice si rezistenta cavitationala [11, 15, 128].

Cum elementele de aliere au costuri ridicate se cauta atat tehnologii de fabricatie cat si de reparatie, care sa diminueze cantitatea elementelor de innobilare [71, 72, 73].

Deoarece eroziunea cavitationala se manifesta intotdeauna pe suprafata frontierelor solide, ce ghideaza curgerea si apare pe arii limitate [90], pe plan international se incearca protejarea superficiala a acestor arii [72, 116, 117]. Aceasta protejare se realizeaza, cel mai des, prin diferite acoperiri, tratamente termice, chimice si mecanice.

6.1 EROZIUNEA CAVITATIONALA A OTELULUI 40Cr10 IMBUNATATIT

a) Materialul supus testarii

Aplicarea tratamentului termic de imbunatatire, celor trei probe testate la eroziune cavitationala in aparatul vibrator T1 [52], a dus la urmatoarele proprietati mecanice [81]:

$$R_m = 1090 \text{ N/mm}^2, \quad HB = 317 \text{ daN/mm}^2, \quad R_{p0.2} = 1025 \text{ N/mm}^2$$

Sporul realizat fata de proprietatile mecanice ale oțelului de baza Tab.3.2, in stare netratata, este:

$$\Delta(R_m) = 25.8 \%, \quad \Delta(HB) = 24.9 \%, \quad \Delta(R_{p0.2}) = 22.9 \%$$

Atacul cavitional s-a realizat in apa distilata, la $20 \pm 1^\circ\text{C}$, in conformitate cu prevederile normelor ASTM [120].

Inaintea inceperii testarii, suprafetele de atac ale celor trei probe au fost lustruite ($R_a = 0,4 \mu\text{m}$) si examinate la microscopul optic de marire 6,3x. Nu s-au observat fisuri sau alte defecte care sa ajute procesul de distrugere.

b) Rezultate experimentale si analiza lor

Curba vitezei de eroziune cavitionala, $v(t)$, medie a celor trei probe, poate fi urmarita in fig. 6.1. In aceeasi figura este construita, spre comparatie si curba otelului de baza 40Cr10 (otelul etalon pentru LMHT).

Curba este definita prin doua polinoame cu coeficienti diferiti si o dreapta, conform metodei prezentate la Cap. 3, §3.2.2, utilizand calculatorul.

Dispersia punctelor experimentale fata de curba de aproximatie fiind mai mica $\sqrt{n-1} = \pm 0,0021 \text{ mm/min}$, decat in cazul materialului de baza, $\sqrt{n-1} = \pm 0,0023 \text{ mm/min}$ [81], dovedeste imbunatatirea rezistentei la cavitate, prin cresterea valorii proprietatilor mecanice si distributiei lor in mod uniform pe toata suprafata, de atac, a probei si realizarea unei structuri total diferita (sorbita de revenire [35a, 65, 114, 115]) de a metalului de baza (bainita + martensita, Tab. 3.2), compozitia chimica pastrandu-se.

Sorbita de revenire, obtinuta in urma tratamentului aplicat, este formata din ferita aliata cu globule de cementita, respectiv carburi [65,115]. In timpul eroziunii cava-

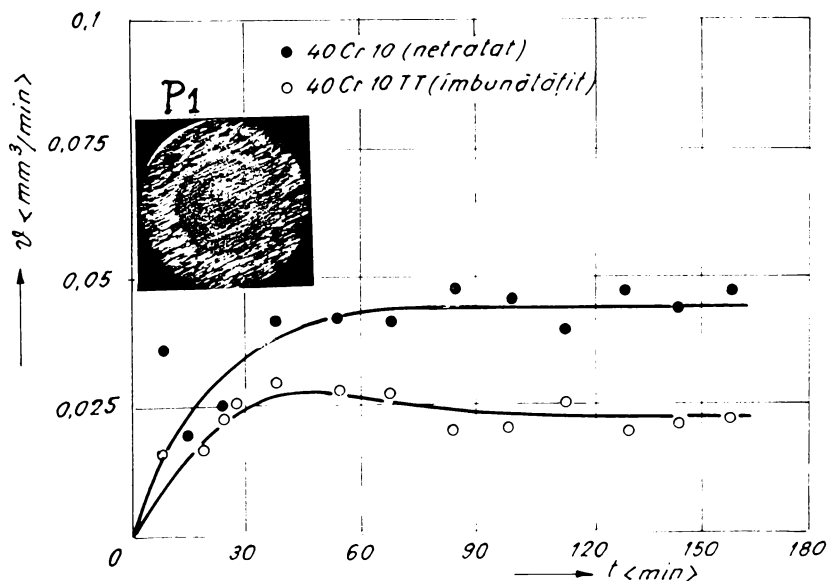


Fig. 6.1 Comparatie intre vitezele de eroziune cavitionala ale otelurilor 40Cr10 netratat si 40Cr10 imbunatatit.

tionale carburile sunt expulzate in intregime, ducand la viteze, in zona de stabilizare, $\sqrt{s} = 0,022 \text{ mm}^3/\text{min}$, de ordinul celor specifice otelurilor 41MoCr11 ($\sqrt{s} = 0,02 \text{ mm}^3/\text{min}$) si 18MoCrNi13 ($\sqrt{s} = 0,025 \text{ mm}^3/\text{min}$). Astfel, prin acest tratament se realizeaza o reducere a vitezei de eroziune cavitationala, fata de a otelului de baza ($\sqrt{s} = 0,045 \text{ mm}^3/\text{min}$ [81]), cu 51 %.

Se constata ca timpul la care viteza incepe sa se stabilizeze are aceeasi valoare, $t_2 = 82,5 \text{ min}$. Deci acest timp depinde de material.

Prin urmare, aplicarea tratamentului termic de imbunatatire, pieselor solicitate cavitationally, este benefica, contribuind la cresterea rezistentei la distrugere cavitationala.

6.2 EROZIUNEA CAVITATIONALA A OTELULUI NAVAL D 32-1 NITRURAT IONIC

a) Materialul supus testarii

Otelul D 32-1 nitrurat ionic a facut obiectul unor contracte de cercetare stiintifica avind drept scop cunoasterea performantelor cavitationale in vederea utilizarii sale in constructia elicelor navale [128].

Nitrurarea ionică s-a aplicat pe toate suprafetele probelor.

Analiza chimica a materialului, prelevat din mai multe probe pe adancimi de maxim 0,5 mm, la suprafetele ce urmau a fi atacate, a evidentiat urmatoarea compozitie chimica:

C = 0,18 %, Cu = 0,35 %, Al = 0,04 %, Mn = 12,3 %, Si = 2,5 %, Cr = 0,2 %, Mo = 0,08 %, P = 0,04 %, Ni = 0,4 %, N = 9,5 %, Fe = rest.

Analiza chimica s-a efectuat la laboratorul de analize chimice din cadrul intreprinderii "S.C. Electrotimis S.A."

Duritatea masurata, la trei probe, pe suprafata de atac este $HB = 224 \text{ daN/mm}^2$. Nu s-au putut determina rezistenta mecanica la rupere, R_m , si limita de curgere, $R_{p0.2}$.

S-au testat 3 probe in apa marina standard [85], la $20 \pm 1^\circ \text{C}$, in aparatul vibrator T1 [52].

Suprafetele de atac au fost lustruite si analizate la microscopul optic, marire 6,3x. Nu s-au constatat defecte care sa conduca la scaderea rezistentei cavitationale.

b) Rezultate experimentale si analiza lor

Pe baza pierderilor masice, utilizand metoda descrisa in Cap.3, s-a construit curba vitezei de eroziune cavitacionala, $v(t)$, medie a celor trei probe, fig.6.2. Aceasta este comparata cu a materialului de baza D 32-1 si otelului etalon 40Cr10, afisate in aceeaasi figura.

Cu exceptia punctelor experimentale din primele minute ale atacului cavitacional (ce nu caracterizeaza procesul in sine) restul au o dispersie, fata de curba, $\bar{v}_{n-1} = \pm 0,0046 \text{ mm}^3/\text{min}$, specifica materialelor cu buna comportare cavitacionala (CuNiAl I-RNR, Carbon I-RNR, Inox austenito-feritic), inferioara otelului D 32-1 ($\bar{v}_{n-1} = \pm 0,0056 \text{ mm}^3/\text{min}$).

Cresterea rezistentei la cavitate, prin nitrurare ionica este enorma. Viteza de eroziune cavitacionala v_3 scade de la $0,095 \text{ mm}^3/\text{min}$ (pentru D 32-1) la $0,038 \text{ mm}^3/\text{min}$ (realizand o reducere de 60 %), depasind si rezistenta cavitacionala a otelului 40Cr10, fig.6.2. Aceasta performanta este efectul nitrurii (solutie solida a compusului $\text{Fe}_2\text{-3N}$) in jur de $8,2 \div 11 \%$ [35a] care ofera stratului tratat duritatea $\text{HB} = 224 \text{ daN/mm}^2$.

Modul in care evolueaza curba $v(t)$ in zona de stabilizare si se distribuie punctele fata de ea, arata ca in cele 165 min. de atac stratul nitrurat nu a fost depasit.

Timpul la care viteza se stabilizeaza creste de la 82,5 min. la 97,5 min [85]. Asta dovedeste ca orice adaos cantitativ important, de elemente chimice poate modifica comportamentul cavitacional al materialului.

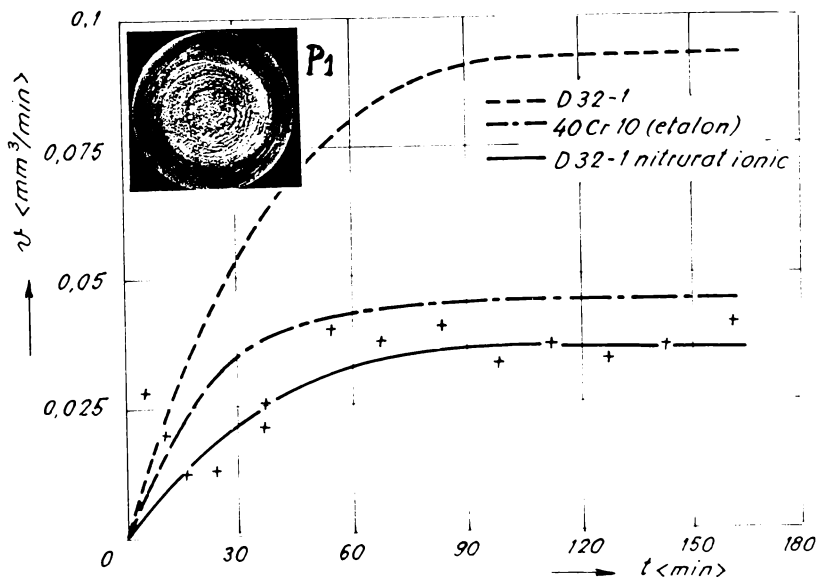


Fig. 6.2 Comparatie intre vitezele de eroziune cavitacionala ale otelului D 32-1 (netratat si nitrurat ionic) si otelului etalon 40Cr10.

Asadar, nitrurarea ionica, prin performantele cavitationale conferite pieselor, este indicata in aplicatiile practice pentru piesele ale caror dimensiuni permit aplicarea tratamentului.

6.3 EROZIUNEA CAVITATIONALA A OTELULUI D 32-1 DURIFICAT PRIN METALIZARE SI ECRUISARE

6.3.1 Eroziunea cavitionala a otelului D 32-1 durificat prin metalizare

Printre preocuparile cercetatorilor, de majorare a rezistentei la uzura si coroziune cavitionala se inscriu si metodele propuse de un grup de cercetatori moldoveni condus de A.J. Mihailiuk [61a]. In acest scop au fost confectionate la Institutul de Fizica al Acad. de Stiinte al R. Moldova un numar de probe din otel naval D 32-1 durificate superficial, prin metoda prelucrarii cu scantei electrice (P.S.E.), folosind un aliaj pe baza de cupru si aluminiu. Prin acest tratament s-a realizat o crestere a duritatii de $HB = 250 \div 600 \text{ daN/mm}^2$ [61a], fata de a materialului de baza $HB = 159 \text{ daN/mm}^2$ (Tab. 3. 2)

a) Materialul supus testarii

Au fost testate 7 probe durificate in mod diferit. In urma tratamentului aplicat suprafata supusa eroziunii cavitationale, examinata la microscopul optic, marire 6,3x, prezenta un aspect poros/fisurat si cu denivelari, fig. 6.3.

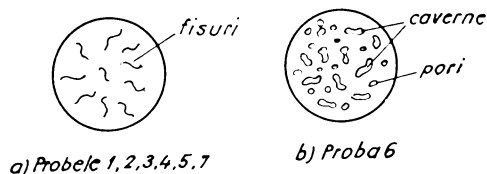


Fig. 6.3 Aspectul suprafetelor probelor.
inainte de atacul cavitional

Concluziile rezultate in urma examinarii probelor sunt sintetizate in Tab. 6.1.

Tab.6.1

Nr. probă	Aspectul suprafeței de lucru înainte de atacul cavitațional	
	culoare	aspect
P1	alb semilucios	fisuri și denivelări
P2	alb mat	fisuri și denivelări
P3	alb mat	fisuri și denivelări
P4	alb mat	fisuri și ușoare denivelări
P5	alb lucios	fisuri și ușoare denivelări
P6	galben	poros și denivelări
P7	alb lucios	fisuri și ușoare denivelări

b) Rezultate experimentale si analiza lor

Studiul rezistenței la cavitație s-a făcut pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 [52], la temperatura de -20°C și presiunea atmosferică, având ca mediu de lucru apă marină standard realizată în mod artificial [19, 128].

Denivelările și porii/fisurile suprafeței de atac au determinat pierderi masice mari încă din primele 5 minute ale eroziunii cavitaționale, fig.6.4, iar la proba 6 s-a observat, cu ochiul liber, metalul de bază pe o suprafață relativ întinsă.

Testarea s-a efectuat până la minutul 135, fig.6.4, datorită constantei pierderilor, în baza metodologiei acceptate și descrise în Cap.3

După fiecare perioadă de încercare, probele au fost examinate la microscop și s-a constatat:

1. - După 5 minute de atac se observă pata de atac cavitațional în care o mare parte din varfurile neregularităților erau erodate

2. - După 45 minute, la toate probele, în pata erodată, nu mai există metal deșus prin tratament.

3. - Prin metoda alierii cu scantei electrice, între zona de metal deșus la suprafața probei și metalul de bază se formează o zonă de amestec. Diferențele ce apar, după minutul 45, între curbele $V(t)$, specifice oțelului tratat și cea a metalului de bază (D 32-1), fig.6.4, arată că atacul erozional nu a depășit stratul de amestec

4. - Suprafața erodată are un aspect mai-fibros, în unele locuri observându-se eroziuni de tip pitting cu adâncimea de $1 \pm 1,5$ mm, fig.6.5.

Din fig.6.4 rezultă o creștere a rezistenței la eroziune cavitațională, a suprafeței atacate, față de cea a metalului de bază.

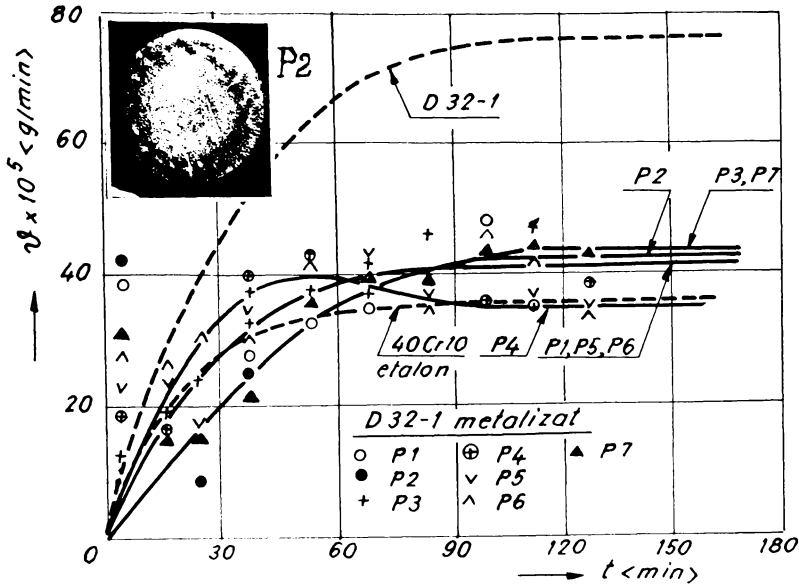


Fig.6.4 Comparatie intre vitezele de eroziune cavitacionala ale otelurilor D 32-1, D 32-1 metalizat si a otelului etalon 40Cr10.



Fig.6.5 Aspectul suprafetei probei erodata cavitacional

Imbunatatirea comportamentului cavitacional se datoreaza sporului de duritate realizat prin metalizare

Comparativ cu materialul etalon 40Cr10 acest tratament nu este satisfacator, din cauza suprafetei rezultate.

Durificarea superficiala prin metoda alierii prin scantei electrice asigura un spor al rezistentei materialului la eroziune cavitacionala, insa, pentru aplicabilitate practica, tehnologia de tratament trebuie perfectionata astfel incat sa se elimine caracterul fisurant, care conduce la distrugerea rapida a metalului astfel depus.

6.3.2 Eroziunea cavitională a oțelului D 32-1 ecruisat

Investigarea comportării cavitationale a oțelului D 32-1 ecruisat a fost determinată de rezultatele obținute în cadrul contractului de cercetare științifică [128], asupra unor probe, din acest oțel, protejate prin vopsire și cu rasini epoxidice [78].

Cercetările au evidențiat un comportament cavitional total nesatisfăcător al straturilor de vopsea și rasini epoxidice și unul complet diferit al materialului protejat [78], față de al oțelului naval D 32 -1 [16]. Examinând, la microscopul optic, suprafețele metalice, după îndepărtarea straturilor de vopsea și rasini, s-a observat aspectul tipic al suprafețelor ecruisate prin sablare. În consecință s-a pus problema investigării, mai atente, a efectului sablării asupra rezistenței cavitationale a oțelului D 32-1 [83].

a) Materialul supus testării

Cercetările sunt efectuate în aparatul vibrator T1 [52], după metoda standard [120], în apa marină, realizată artificial, la $20 \pm 1^\circ \text{C}$. S-au testat 4 probe, sablate diferit, Tab.6.2.

Tab.6.2 Date privind probele sablate [78]

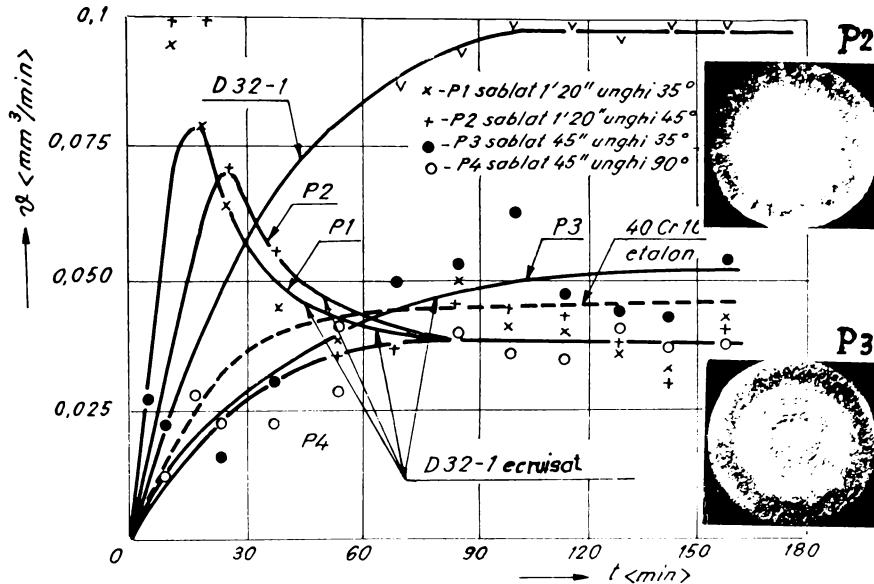
<i>Nr. Probă</i>	<i>Durata sablării</i>	<i>Unghi de bombardament</i>	<i>Aspectul probei pe suprafața de lucru</i>
1	1'20"	35°	rugos
2	1'20"	45°	rugos
3	45°	35°	lucios
4	45°	90°	lucios

Probele cu aspect rugos (1 și 2) prezentau pe suprafața de atac numeroase adâncituri și ridicături. Ridicăturile aveau creste ascuțite și contorsionate, care au fost ușor rupte ca urmare a imploziilor bulelor cavitationale. Deși, între fabricație și încercări probele au fost păstrate în exicator (atmosfera relativ uscată) pe suprafața probelor au apărut numeroase pete de rugină.

Probele cu aspect lucios (3 și 4) prezentau pe suprafața de atac doar adâncituri. Și la aceste probe s-au observat pete de rugină, însă, cu mult mai reduse decât la lotul "rugos". În ambele cazuri oxidarea era mai mare decât la probele necruisate păstrate în aceleași condiții.

b) Rezultate experimentale si analiza lor

Curbele $v(t)$, pentru toate probele incercate, se pot urmari in fig.6.6. Constructia grafica s-a realizat cu calculatorul utilizand metoda descrisa la Cap. 3. In aceeași figura s-au prezentat spre comparatie și curbele otelului D 32-1 și etalon 40Cr10.



În cazul probelor sablate, la durate mai lungi de un minut, au apărut ridicături ușor de îndepărtat prin acțiunea imploziilor cavitationale. Acest fenomen, în condițiile aparatului utilizat, a fost extrem de violent în primele 5 minute, când viteza de eroziune a depășit $0,07 \text{ mm}^3/\text{min}$. În continuare viteza de eroziune scade rapid, iar după 75 minute de atac cavitional se atinge palierul.

În cazul probelor sablate pe durate de 45 secunde maniera generală de desfășurare a fenomenului se modifică viteza de eroziune cavitională tinzând spre stabilizare, ajungând după 70 minute la un palier având același ordin de mărime cu cel obținut la probele sablate la 1 minut și 20 secunde.

Unghiul de bombardament nu prezintă influențe semnificative asupra rezistenței la cavitație.

Compararea celor două metode de ecrusare este relativ dificilă din cauza pierderilor masice din primele 60 minute. Aparent ecrusarea pe durată de 1 minut și 20 secunde da rezultate mult mai slabe decât cea efectuată pe durată de 45 secunde. Diferențele apar din cauza îndepărtării creștelor ascuțite care, în condiții de laborator, duc la o dramaturgie artificială a situației. În cazul unor instalații industriale diferențele vor fi mai puțin perceptibile.

Recomandarea tratamentului pentru instalatii industriale necesita insa cercetari pentru o gama mai mare de materiale. Este posibil ca materiale cu rezistenta cavitationala foarte buna sa prezinte, prin ecrusare, imbunatatiri mai putin spectaculoase.

In raport cu otelul etalon 40Cr10 comportarea cavitationala este asemanatoare, distributia curbilor in zona de stabilizare a eroziunii fiind in domeniul dispersiei.

Din cele prezentate se desprind urmatoarele:

- Ecrusarea prin otelul D 32 -1, prin sablare, determina o crestere semnificativa a rezistentei la cavitate.

- Pentru durate lungi de sablare rezistenta la cavitate este foarte redusa in primele faze de atac cavitational. Dupa indepartarea asperitatilor, generate prin sablare, viteza de eroziune se reduce si ramane mai buna decat la probele netratate.

- Unghiul de bombardament nu influenteaza semnificativ rezistenta la cavitate.

- Se impune continuarea cercetarilor privind efectul ecrusarii pentru o gama mai larga de materiale si procedee.

6.4 CONCLUZII

Utilizarea tratamentelor de durificare a suprafetelor supuse atacurilor cavitationale este recomandata numai daca tehnologia este bine pusa la punct, astfel incat sa asigure suprafete netede si proprietati fizico-mecanice uniform distribuite.

Este necesara analiza mai multor metode de durificare superficiala, utilizate in aplicatiile practice, cum sunt: cementarea, sulfimizarea, calirea superficiala, metalizare cu inox, etc. Aceste metode trebuie comparate intre ele si recomandata aceea care ofera cele mai bune rezultate cavitationale, la un pret de cost accesibil.

De asemenea, o analiza metalografica a suprafetelor tratate, poate aduce elemente noi cu privire la desfasurarea procesului de distrugere si factorii ce contribuie la acest proces (tipuri de retele cristaline, raport constituinti structurali, etc.)

CAP. 7 STABILIREA EFECTULUI DE SCARA IN EROZIUNEA CAVITATIONALA

7.1 INTRODUCERE

Distrugerea materialelor prin eroziune cavitionala este foarte complexa si implica doua fenomene, fundamental distincte, care se interconditioneaza reciproc. Unul este de natura hidrodinamica, specific fenomenului cavitional si include actiunea hidraulica, chimica, electrochimica si termica a lichidului. Al doilea este de natura fizico-mecanica, caracterizeaza distrugerea materialului si depinde de parametrii sai caracteristici (proprietati fizico-mecanice, constitutie si omogenitate structurala, tehnologie de elaborare si prelucrare, compozitie chimica, etc.).

Parametrii hidrodinamici, caracteristici fenomenului cavitional, depind de tipul masinii industriale si instalatiei de laborator. Astfel:

- la pompe si turbine hidraulice sunt: viteza, presiunea si temperatura lichidului [2, 4, 71, 72, 96],

- la elici navale sunt: viteza de inaintare, presiunea pe paleta, continutul de gaz, temperatura si natura apei [7, 26, 29, 45],

- la aparatele cu curent si camera de lucru strangulata sunt: viteza lichidului, presiunea, continutul de gaz, temperatura si natura lichidului [3, 33, 39, 40a, 41, 113],

- la aparatele cu disc rotitor imersat in lichid sunt: viteza curentului, presiunea din camera de lucru, continutul de aer, temperatura si si natura lichidului, dimensiunile orificiilor si probelor [3, 39, 53, 106],

- la aparatele vibratorii sunt: amplitudinea si frecventa vibratiilor, temperatura si natura lichidului, diametrul probei, puterea acustica [3, 40, 52, 106].

Parametrii caracteristici materialului, cu influenta puternica asupra caracterului fizico-mecanic al eroziunii cavitationale, sunt [30a, 33, 40, 40a]:

YS - limita de curgere,

TS - rezistenta mecanica la rupere,

E - modulul de elasticitate longitudinal,

EL - alungirea,

BHN - duritatea Brinell,

UR - rezilienta finala ($UR = (TS) / (2E)$),

SE - energia de rupere.

Notatiile prezentate corespund normelor engleze si au urmatoarele corespondente din STAS-ul romanesc:

YS = Rp_{0.2} E = E BHN = HB

TS = Rm EL = A₅ SE = KCU

UR este o marime nestandardizata, determinata analitic pe baza masuratorilor experimentale [3, 40a].

Corelarea parametrilor hidrodinamici cu cei mecanici poate conduce la o ecuație generală care să modeleze distrugerea cavitațională a materialelor. Acest obiectiv, până azi, nu a putut fi realizat datorită complexității fenomenului și diversității factorilor ce intervin. Din aceste motive, efectul de scară constituie o problemă în a cărei rezolvare s-a pornit din aproape în aproape.

7.2 PRIMA ETAPA A REZOLVĂRII PROBLEMEI EFECTULUI DE SCARĂ ÎN EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ

Primii pași în stabilirea unor legături între parametrii hidrodinamici ai instalațiilor industriale, respectiv instalațiilor de laborator și ai materialului sunt curbele caracteristice experimentale de tipul:

- variația volumului cumulat de material erodat funcție de timp $V(t)$ [3, 9-18, 21, 72, 53, 54, 67, 70, 106, 113],

- variația masei cumulate de material erodat funcție de timp $m(t)$ sau $\Delta G(t)$ [3, 133, 71, 73],

- variația vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp $v(t)$, unde $v = \Delta V / \Delta t$ [3, 68, 80, 81], sau $v = \Delta m / \Delta t$ [9-18, 53, 54, 69], sau $v = \Delta G / \Delta t$ [3, 30, 33, 128].

Aceste curbe permit compararea materialelor după rezistența la cavitație și alegerea celui mai bun (vezi Cap. 3 și 6). Compararea materialelor testate în stațiuni cu parametrii hidrodinamici diferiți, privind rezistența cavitațională a celui mai bun, nu sunt elocvente din cauza necunoașterii ponderii acestor parametri și a factorilor caracteristici materialului asupra distrugerii. Exemplificative în acest sens sunt rezultatele experimentale realizate în diferite aparate vibratorii, Tab. 1.3, pe 5 materiale diferite, centralizate de J.K. Steller [106], care arată că unul și același material are comportări cavitaționale diferite, fig. 7.1 și 7.2, precum și cele prezentate de autor în cadrul acestei lucrări.

Alți pași sunt reprezentați de modelarea teoretică a curbelor experimentale. Contribuții importante, în această direcție, oferite de literatura de specialitate le are Noskievici [67, 68, 69]. Dezavantajul modelelor propuse îl constituie lipsa parametrilor hidrodinamici ai stațiunii și fizico-mecanici ai materialului, astfel încât nu se pot constitui în relații de efect de scară.

Plecând de la ideea că în orice proces din natură un rol important în evoluția sa îl prezintă modul de repartizare a energiilor dezvoltate. Thiruvengadam [3, 111, 113] definește intensitatea distrugerii cavitaționale pe baza energiei absorbite de material în timpul eroziunii:

$$I = \frac{E_o}{t \cdot A_e} = \frac{\Delta V \cdot S_e}{t \cdot A_e} = i \cdot \frac{S_e}{t} \quad (7.1)$$

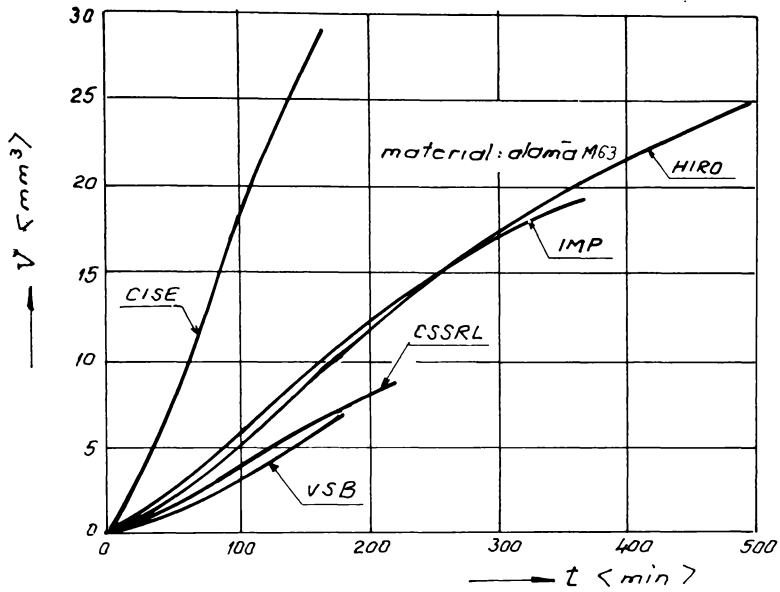


Fig. 7.1 Variatia volumului erodat cu timpul de atac cavitional [106]

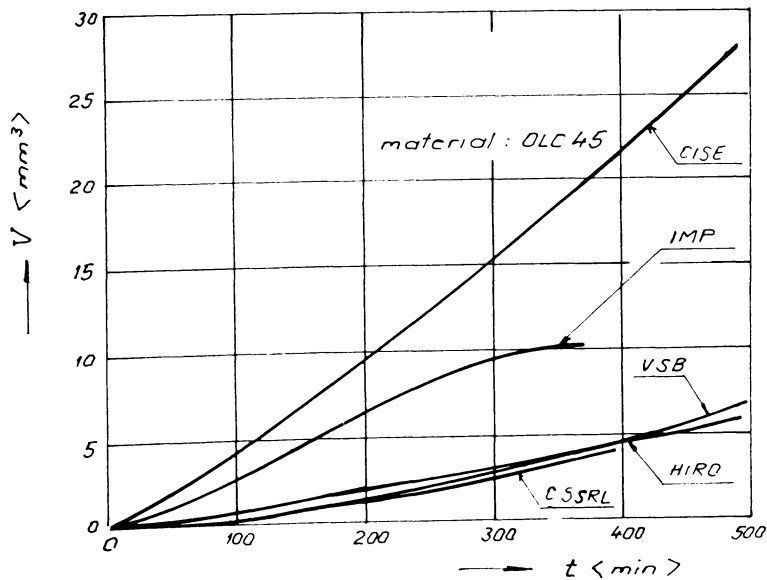


Fig. 7.2 Variatia volumului erodat cu timpul de atac cavitional [106]

unde:

- E_a - energia absorbita de materialul erodat,
- ΔV - volumul erodat in timpul t ,
- S_e - rezistenta la eroziune cavitationala,
- t - durata atacului cavitional,
- A_e - suprafata erodata cavitional,
- i - adancimea medie a eroziunii cavitationale.

Cu relatia (7.1) se poate determina energia absorbita de material necesara indepartarii volumului ΔV dar nu si a intregii energii consumate in timpul eroziunii cavitationale (energia necesara deformatiilor elasto-plactice, etc.). Datorita imposibilitatii masurarii tuturor energiilor ce intervin in procesul distrugerii cavitationale, metoda lui Thiruvengadam [3, 111, 113] este pre putin utilizata.

Un salt in rezolvarea problemei efectului de scara il constituie stabilirea unor parametrii care sa exprime rezistenta cavitationala a materialului. Hammitt [39, 40, 40a], Garcia [32, 33] si Hobbs [41, 42] introduc viteza adancimii medii si maxime de patrundere, MDPR respectiv MDPRmax, iar Steller [3, 101, 102, 103] propune exprimarea efectului de scara prin durabilitatea cavitationala medie \bar{J}_{cav} . Ambii parametrii (MDPR si \bar{J}_{cav}) sunt dependenti de tipul aparatului si se folosesc doar in ordonarea materialelor dupa rezistenta cavitationala [3, 12, 33, 82].

7.3 A DOUA ETAPA A REZOLVARII PROBLEMEI EFFECTULUI DE SCARA IN EROZIUNEA CAVITATIONALA

A doua etapa in rezolvarea efectului de scara in eroziunea cavitationala o constituie corelarea parametrului MDPR, sau inversului sau $1/\text{MDPR}$, cu diferite marimi ce intervin in procesul distrugerii cavitationale.

1. Hoff s.a [40a] coreleaza parametrul MDPR cu proprietatile mecanice ale materialului, marimile specifice probelor de eroziune si fluidului printr-o relatie de forma:

$$\text{MDPR} = \frac{\eta}{\varepsilon} \frac{A_p}{A_e} \frac{\rho_{eff}}{2} v^3 \quad (7.2)$$

unde:

- ρ_{eff} - densitatea lichidului,
- v - viteza de impact,
- η - coeficientul de transfer al energiei de la lichid la solid (dependent de caracteristicile materialului si parametrii fluidului),

\mathcal{E} - parametrul caracteristic materialului,

A_p - aria erodata,

A_e - aria expusa.

Pentru parametrul literatura [30a, 33, 40, 40a] ofera o serie de relatii liniare si neliniare intre proprietatile specifice materialului, ca:

$$\mathcal{E} = C_0 + C_1UR + C_2SE \quad (7.3)$$

$$\mathcal{E} = C_0 + C_1UR \quad (7.4)$$

$$\mathcal{E} = C_0 + C_1SE \quad (7.5)$$

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + C_1TSE \quad (7.6)$$

$$\mathcal{E} = C_1UR \quad (7.7)$$

$$\mathcal{E} = C_0 + C_1UR + C_2(UR) + C_3(UR) \quad (7.8)$$

Coefficientii C_0 , C_1 , C_2 si C_3 sunt determinati din aproximarea rezultatelor experimentale prin metoda celor mai mici patrate. Valorile sunt dependente de material si aparatul de incercare utilizat.

2. Hammitt s.a [40, 40a] incearca sa coreleaze parametrul eroziunii cavitationale, $1/MDPR$, cu fiecare proprietate individuala a materialului sau cu combinatii ale diferitelor proprietati. Pentru aplicatii practice recomanda relatiile:

$$1/MDPR \propto \mathcal{E} = C_1UR \quad (7.9)$$

$$1/MDPR \propto \mathcal{E} = C(BHN)^{0,8} \quad (7.10)$$

Aici $C_1 = 0,811$ si $C = 0,734$ [40a]. Relatia (7.10) este cea mai utilizata datorita usurintei determinarii duritatii Brinell.

3. Rao [95a] propune corelarea vitezei volumului erodat VLR cu caracteristicile mecanice UR si BHN sub forma:

$$1/MDPR = C_1(UR)(BHN) \quad (7.11)$$

4. Sakai-Shima [95a] amplifica studiile lui Rao si Byrnside si considera ca distrugerea cavitationala a materialelor poate fi descrisa de marimea $UR \times BHN \times E/Y$. Folosind un numar mare de materiale, testate cavitational de Garcia [33] si Rao [95a] in medii si conditii diferite, propun corelarea parametrului eroziunii cavitationale $1/MDPR$ cu parametrul adimensional ψ_n printr-o relatie de forma:

$$1/MDPR = A[1 - e^{-B\psi_n}] \quad (7.12)$$

Constantele A si B depind de temperatura si natura mediului de incercare (apa la diferite temperaturi, bismut, mercur), grupa de materiale (oteluri, aliaje de cupru si aluminiu) si tipul aparatului.

Parametrul ψ_n coreleaza principalele proprietati mecanice ale materialului intr-o relatie de tipul [95a]:

$$\psi_n = UnHn(En/Yn) = Tn^2Hn/Yn \quad (7.13)$$

unde:

$$Un = UR/URst, \quad Hn = BHN/BHNst, \quad En = E/Est \quad (7.14)$$

$$Yn = Y/Yst, \quad Tn = T/Tst, \quad UR = T^2/2E$$

Marimile notate cu "st" se refera la otelul 304 SS, etalon pentru aparatul vibrator din Michigan.

Sakai si Shima propun relatia (7.12) ca efect de scara in eroziunea cavitationala.

Verificarile efectuate de autorul acestei lucrari au demonstrat ca relatia propusa de Sakai-Shima nu permite transpunerea rezultatelor experimentale de la un aparat la altul.

Discutiile din Cap.1, paragraful 1.4.4, legate de aceasta relatie, arata necesitatea completarii cu influenta parametrilor tehnico-functionali ai aparatului si corectarii coeficientilor din relatia (7.12) si exponentilor din relatia (7.13) pentru cresterea preciziei si nivelului de generalitate.

7.4 A TREIA ETAPA A REZOLVARII PROBLEMEI EFECTULUI DE SCARA IN EROZIUNEA CAVITATIONALA

O alta directie urmata in rezolvarea efectului de scara o constituie corelarea parametrului eroziunii cavitationale $1/MDPR$ cu parametrii functionali ai statiunii.

Steller J.K. [106, 107], analizand rezultatele cavitationale obtinute pe aceleasi materiale, in diferite laboratoare, stabileste urmatoarea relatie:

$$\text{MDPR} \cong A f^\alpha d^{\beta} \quad \text{cu } \alpha \cong 1,2 \text{ si } \beta = 0,8 \quad (7.15)$$

Steller K. [103] arata ca intre rezistentele cavitationale ale aceluasi material testat in doua aparate vibratorii diferite, in conditii identice, exprimate prin $1/\text{MDPR}$ si parametrii functionali ai aparatelor exista legatura:

$$\frac{\text{MDPR}_1}{\text{MDPR}_2} = \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^\alpha \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^\beta \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^\gamma \quad (7.16)$$

Valorile exponentilor α , β si γ depind de tipul materialului sau grupa de materiale. Astfel [50a]:

- pentru otel inox 316 SS: $\alpha = 1,2$; $\beta = 0,58$; $\gamma = -0,17$
- pentru 270 Ni: $\alpha = 1,55$; $\beta = 0,83$; $\gamma = -0,53$
- pentru 6061-T651 Al: $\alpha = 1,72$; $\beta = 1,06$; $\gamma = -0,14$

Valorile exponentilor sunt o expresie a capacitatii materialului de a absorbi, in timpul eroziunii cavitationale, energia dezvoltata si caracterizata numai de parametrii A, f si d.

7.5 A PATRA ETAPA A REZOLVARII PROBLEMEI EFECTULUI DE SCARA IN EROZIUNEA CAVITATIONALA

Deoarece, relatia lui Sakai-Shima (7.12) coreleaza rezistenta cavitationala cu proprietatile mecanice ale materialului si conditiile de incercare (natura si temperatura mediului cavitant), iar a lui Steller, (7.15), cu parametrii tehnico-functionali ai aparatului vibrator, autorul lucrarii incearca imbinarea celor doua relatii in una singura. Atingerea acestui obiectiv si cresterea nivelului de generalitate al noii relatii impun cateva analize preliminare privind valorile:

- a. - exponentilor α , β si γ ,
- b. - exponentilor r, s si p din relatia parametrului relativ, cu forma de mai jos:

$$\psi^*_{n} = \text{UnIn}^s(\text{En}/Y_n)^p \quad (7.17)$$

- c. - coeficientilor A* si B* din relatia generala:

$$(1/\text{MDPR})_{M-1} = A^* [1 - e^{\beta \psi^*_{r^*}}] \quad (7.18)$$

a.- Stabilirea exponentilor α , β , γ .

Uzand de rezultatele obtinute de :

- autor pentru 5 oteluri, 2 bronzuri si o alama navala testate in aparatul vibrator T1, Tab.3.2 si 3.9, 11 oteluri, 2 bronzuri si o alama navala testate in aparatul vibrator T2, Tab.3.2 si 3.12,

- Sisak s.a.[127, 133] si Kuzman, Potencz s.a. [52, 53] pentru 7 oteluri testate in aparatul vibrator T1, Tab.3.2 si 3.9.,

dupa mai multe incercari de corelare a rapoartelor $(MDPR)_{T2}/(MDPR)_{T1}$ si $(A^\alpha f^\beta d^\gamma)_{T1}/(A^\alpha f^\beta d^\gamma)_{T2}$, prin metoda celor mai mici patrate, conform relatiei:

$$\frac{(MDPR)_{T2}}{(MDPR)_{T1}} = \frac{(A^\alpha f^\beta d^\gamma)_{T2}}{(A^\alpha f^\beta d^\gamma)_{T1}} \quad (7.19)$$

s-au obtinut urmatoarele valori:

$$\alpha = 4,32; \beta = 0,96; \gamma = -1,25 - \text{dupa modelul Steller} \quad (7.19a)$$

cu coeficientul negativ

$$\alpha = 4,45; \beta = 1,01; \gamma = 0,15 - \text{propunere Bordeasu} \quad (7.19b)$$

Valorile exponentilor sunt o expresie a modului de participare a parametrilor A, f si d la transferul energiei catre material in timpul atacului cavitional. Valorile pozitive arata ca acesti parametri asigura cresterea energiei transferate catre material, iar valorile negative arata disiparea acestei energii. Acesta este si motivul pentru care s-a cautat varianta cu toti exponentii pozitivi.

Transpunand rezultatele de la aparatul vibrator T2 la aparatul vibrator T1, Tab.7.1, prin relatiile:

$$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T1,T2} = \frac{(A^{4,32} f^{0,96} d^{-1,25})_{T2}}{(A^{4,32} f^{0,96} d^{-1,25})_{T1}} \cdot \left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T2} \quad (7.20a)$$

si

$$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T1,T2} = \frac{(A^{4,45} f^{1,01} d^{0,15})_{T2}}{(A^{4,45} f^{1,01} d^{0,15})_{T1}} \cdot \left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T2} \quad (7.20b)$$

se constata ca diferentele sunt nesemnificative, iar erorile se incadreaza in banda de precizie definita la Cap.3. In plus trebuie avut in vedere ca pentru aparatul T1, valorile parametrului 1/MDPR reprezinta media a cel putin trei valori (probe), iar in cazul aparatului vibrator T2 sunt date de o singura proba, ceea ce face sa creasca nivelul erorii.

Tab.7.1 Transpunerea rezultatelor experimentale de la aparatul vibrator T2 la aparatul vibrator T1

Nr. crt.	Material	$\frac{1}{MDPR}$ [hr/mm]		$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T_1-T_2}$ rel(21.a) [hr/mm]	σ_{T_1} %	$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T_1-T_2}$ rel(21.b) [hr/mm]	σ_{T_2} %	Bibliografie
		T ₁	T ₂					
1	01C 15	48	93,3	48,6	-1,3	48,7	-1,4	[133]
2	01 370 - 3K	16,2	22,97	12	25,9	19	25,9	[53]
3	33 Mo Cr 11	58,8	118,52	61,7	-4,9	61,8	-5,1	[133]
4	40 Cr 10	31	61,96	32,3	-4,2	32,3	-4,2	[81]
5	18 MoCr Ni 13	66,1	111,14	57,9	12,4	58,1	12,1	[80]
6	Carbon I RNR	28,03	52,89	27,5	1,9	27,6	1,5	[9]
7	D32-1	14,22	24,81	12,9	9,3	12,9	9,3	[15]
8	Inox III RNR	76	149,55	77,9	-2,5	78	-2,6	[16]
9	T07CuMoMnNiCr 165-Nb	83	178,52	92,9	-11,9	93,2	-12,3	[127]
10	T09CuMoMnNiCr 185-Ti	79,5	148,77	77,4	2,6	77,6	2,3	[127]
11	20 Cr 130	39,7	94,89	49,4	-24,4	49,5	-24,6	[133]
12	CuNiAl III RNR	76,3	166,07	86,5	-13,3	86,7	-13,6	[18]
13	CuNiAl I RNR	38,2	53,5	27,9	26,9	26,9	26,9	[18]
14	Alamă	16,4	36,66	19,1	-16,5	19,1	-16,5	[128]

hr - ore

Erorile prezentate in Tab.7.1 sunt determinate cu relatia:

$$\alpha_{ij} = \frac{\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T_1} - \left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T_2}}{\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{T_1}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (7.21)$$

Admitand ca aparat vibrator standard pe cel de la Michigan si utilizand rezultatele lui Garcia [33] pentru sase oteluri, Tab.7.2, obtinute pe acest aparat (la $f = 20$ kHz, $A = 25,4\mu\text{m}$, $d = 14,3$ mm), transpunerea rezultatelor obtinute in aparatele T1 si T2 pentru 6 oteluri si a celor obtinute de Steller [106] pentru doua oteluri (la $f = 8,1$ kHz, $A = 50\mu\text{m}$, $d = 12,5$ mm), Tab.7.3, la aparatul standard, cu relatiile (7.22a) si (7.22b), arata ca rezultatele transpuse sunt in domeniul de variatie, Tab.7.4. Se constata, de asemenea, diferentele nesemnificative dintre valorile transpuse cu cele doua relatii.

$$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{M-i} = \frac{(A^{4,32} f^{0,96} d^{-1,25})_i}{(A^{4,32} f^{0,96} d^{-1,25})_M} \left(\frac{1}{MDPR}\right)_i \quad (7.22a)$$

si

$$\left(\frac{1}{MDPR}\right)_{M-i} = \frac{(A^{4,45} f^{1,01} d^{0,15})_i}{(A^{4,45} f^{1,01} d^{0,15})_M} \left(\frac{1}{MDPR}\right)_i \quad (7.22b)$$

Aici M - semnifica aparatul vibrator standard din Michigan,
i = T1, T2, G - semnifica aparatele vibratoare din LMHT si Gdansk (folosit de Steller [106]).

Relatiile (7.22a) si (7.22b) pot servi, in aceasta forma, la compararea otelurilor testate in conditii identice, in diferite aparate vibratoare, dupa rezistenta cavitationala.

b.- Stabilirea exponentilor r,s,p

In Cap.1, paragraful 1.4.4.2, s-a aratat ca valorile exponentilor din relatia parametrului relativ Ψ_n , (7.13), stabilita de Sakai-Shima, nu sunt pe deplin justificate, deoarece nu tin cont de aspectul local si dinamic (cu mare viteza) al solicitarii cavitationale de pe suprafata probei, expusa atacului, in conditiile unor variatii mari de temperatura (mii de grade celsius [2, 3]). Ele sunt stabilite mai mult din dorinta

Tab.7.2 Caracteristicile mecanice si cavitationale ale otelurilor testate de Garcia in aparatul vibrator de la Michigan [33]

Material	R_m N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	HB daN/mm ²	$\frac{1}{MDPR}$ hr/mm
Otel carbon	312,11	286,6	172	171,17
304 SS (etalon)	651,1	445,8	211,3	393,7
316 SS	600,8	438,2	202,4	437,44
Mo - $\frac{1}{2}$ Ti	1142,4	1036,3	263	237,44
Cb - IZr	408	406,5	134,6	269,54
Cb - IZr (A)	250,1	132,3	88,3	218,72

Tab.7.3 Caracteristicile mecanice si cavitationale ale otelurilor testate de Steller in aparatul vibrator de la Gdansk [106]

Material	R_m (N/mm ²)	$R_{p0,2}$ (N/mm ²)	HB (N/mm ²)	$\frac{1}{MDPR}$ (hr/mm)
DLC 45	729	419	184	41,66
Otel moale	328	263	103	26,3

Tab.7.4 Comparatie între valorile parametrului $(1/MDPR)_{M-i}$

Nr crt.	Material	Rel. (722. a)	Rel. (722. b)	Bibliografie
		$(\frac{1}{MDPR})_{M-i}$	$(\frac{1}{MDPR})_{M-i}$	
1	DLC 15 (T_1)	256,8	256,3	[133]
2	33 MoCr 11 (T_1)	314,6	313,9	[133]
3	18 MoCr Ni 13 (T_1)	353,7	352,9	[8a]
4	Inox III RNR (T_1)	406,6	405,8	[16]
5	T07CuMoMnNiCr165Nb (T_1)	444,1	443,1	[127]
6	T09CuMoMnNiCr185-Ti (T_1)	425,4	424,4	[127]
7	DLC 15 (T_2)	259,9	260	-
8	33 MoCr 11 (T_2)	330,1	330,2	-
9	18 MoCr Ni 13 (T_2)	309,6	309,7	-
10	Inox III RNR (T_2)	416,5	416,7	-
11	T07CuMoMnNiCr165-Nb (T_2)	497,2	497,4	-
12	T09CuMoMnNiCr185-Ti (T_2)	414,4	414,5	-
13	304 SS (M)	393,7	393,7	95a
14	316 SS (M)	437,44	437,44	95a
15	Mo - $\frac{1}{2}$ Ti (M)	437,44	437,44	95a
16	Cb - iZr (M)	269,54	269,54	95a
17	Cb - iZr (A) (M)	218,72	218,72	95a
18	Otel carbon (M)	171,17	171,17	95a
19	Otel moale (G)	243,8	210,7	106
20	DLC 45 (G)	386	333,7	106

T_1 - aparat vibrator magnetostrictiv - LMHT

T_2 - aparat vibrator piezomramice - LMHT

M - aparat vibrator Michigan (teste Garcia [33])

G - aparat vibrator Gdansk (teste Steller [106])

obtinerii unei precizii de aproximare si distributii a punctelor experimentale acceptabile.

Admitand ca forma generala a parametrului relativ este de tipul:

$$n = UnHn^s(En/Yn)^p \quad (7.23a)$$

sau

$$\psi^* n = TnHn^sYn^p \quad (7.23b)$$

sau

$$\psi n = \left(\frac{Rm}{Rme}\right)^{2r} \left(\frac{HB}{HBe}\right)^s \left(\frac{Rp_{0,2}}{Rp_{0,2e}}\right)^p - \text{cu notiile STAS} \quad (7.23c)$$

se pot stabili noi valori pentru exponentii r,s,p, care sa asigure un grad de generalitate ridicat. Aici "e" semnifica otelul etalon.

Pentru r = s = p = 1 se obtine relatia lui SaKai-Shima (7.13).

Necesitatea stabilirii altor valori pentru exponentii rezistentei mecanice la rupere Rm = TS, duritatii HB = BHN si limitei de curgere Rp0,2 = YS, este determinata de factori caracteristici procesului hidodinamic.

Franc [30a] arata ca eroziunea cavitationala este un proces dinamic ce se desfasoara cu o viteza de deformatie $\bar{\epsilon} = (10^2 - 10^5) s^{-1}$, situandu-se intre explozie si ruptura dinamica, fig.7.3.

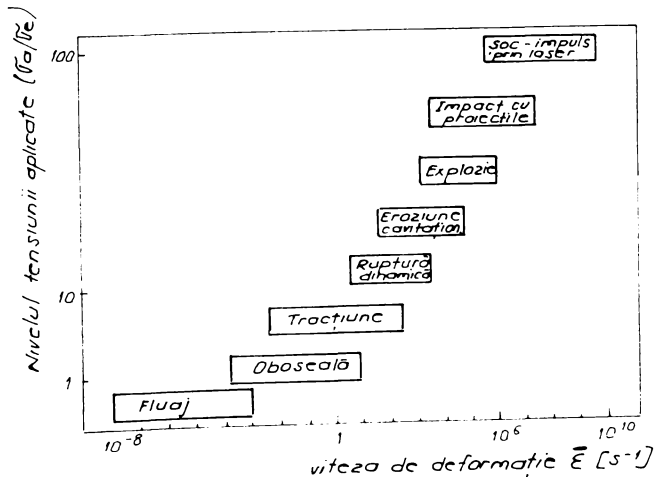


Fig.7.3 Ordonarea solicitarilor dupa viteza de deformatie [30a] (σ_e - limita de elasticitate; σ_a -rezistenta admisibila la intindere)

Safta [95b], Abbott [1a], George E. Dieter [34a] arata ca cu cresterea temperaturii, pentru aceeasi viteza de sollicitare, rezistenta mecanica la rupere si limita de curgere scade.

Experientele lui Maekawa [58a], prin impactul suprafetelor solide cu proiectile de mare viteza, evidentiaza, de asemenea, scaderea rezistentei mecanice la rupere fata de valoarea determinata static.

De asemenea, sollicitarea cavitationala, asa cum am mai precizat si in Cap.1, paragraful 1.4.4, are un caracter de oboseala locala, asemanatoare sollicitarii angrenajelor cu roti dintate si rulmentilor cu bile.

Din cele prezentate mai sus rezulta ca exponentii r,p,s pot dobandi noi valori, mai mari pentru rezistenta mecanica la rupere si limita de curgere si mai mici pentru duritate, care sa asigure parametrului relativ ψ^*n un grad mai mare de generalitate, respectiv extinderea la un numar mai mare de materiale din aceeasi categorie.

Considerand ca material etalon inoxul 304 SS si raportand la el otelurile testate in aparatele vibratoare T1 si T2, Tab.3.2, si in aparatul vibrator din Gdansk, Tab.7.3, cu conditiile obtinerii unei corelari cat mai bune a parametrului $(1/MDPR)_{M-1}$ cu ψ^*n , dupa multiple tatonari s-au stabilit urmatoorii exponenti:

$$r=1,1; s=0,55; p=1,1 \quad (7.24)$$

Forma parametrului relativ pentru oteluri este:

$$\psi^*n = U_n^{1,1} H_n^{0,55} \left(\frac{E\sigma}{Y_n} \right)^{1,1} \quad (7.25a)$$

sau

$$\psi^*n = \frac{T_n^{2,2} H_n^{0,55}}{Y_n^{1,1}} \quad (7.25b)$$

sau

$$\psi^*n = \left(\frac{R_m}{K_{mc}} \right)^{2,2} \left(\frac{K_{p0,2}}{R_{p0,2}} \right)^{1,1} \left(\frac{HB}{HB_c} \right)^{0,55} \quad \text{- cu notatiile STAS} \quad (7.25c)$$

In Tab.7.5 sunt afisate valorile parametrilor ψn si ψ^*n , calculate cu relatile (7.13) stabilita de Sakai-Shima si (7.25a, b, c) stabilita de autor. Se observa ca noua relatie conduce la valori apropiate de ale parametrului ψ^*n , pentru materiale cu comportari cavitationale slabe ca: Cb - IZr(M), Cd - IZr(A)(M), otel carbon (M) si otel moale (G), si valori departate pentru materiale cu comportari cavitationale foarte bine si excelente ca: T07CuMoMnNiCr165-Nb, T09CuMoMnNiCr185-Ti, 304SS.

Tab.7.5 Comparatie intre efectele de scara Sakai-Shima si cel propus de Bordeaux

Nr crt.	Material	RELATIA				Bibliografie
		(7.13)		(7.25c)		
		Ψ_n	$\sigma_{2j}\%$	Ψ_n^*	$\sigma_{2j}\%$	
1	OLC 15 (T_1)	0,557	19,9	0,644	23,4	[133]
2	33MoCr11 (T_1)	0,886	21,4	0,863	16,6	[133]
3	18MoCrNi13 (T_1)	1,12	18,4	1,074	12,1	[80]
4	Inox III RNR (T_1)	0,63	-18,6	0,703	-16,7	[16]
5	T07CuMoMnNiCr165-Nb(T_1)	1,166	-1,3	1,207	-7,5	[127]
6	T09CuMoMnNiCr185-Ti(T_1)	0,902	-5,5	0,946	-9,5	[127]
7	OLC 15 (T_2)	0,478	11,0	0,548	15,6	-
8	33MoCr11 (T_2)	0,886	17,4	0,863	12,2	-
9	18MoCrNi13 (T_2)	1,12	28,4	1,074	22,8	-
10	Inox III RNR (T_2)	0,63	-21,8	0,703	-19,8	-
11	T07CuMoMnNiCr165-Nb(T_2)	1,166	-13,7	1,207	-20,6	-
12	T09CuMoMnNiCr185-Ti(T_2)	0,902	-3,1	0,946	-7,0	-
13	304 SS (M)	1	5,7	1	0,03	[95.d]
14	316 SS (M)	0,83	-12,4	0,834	-17,7	[95.d]
15	Mo - $\frac{1}{2}$ Ti (M)	1,648	6,9	1,536	-1,9	[95.d]
16	Cb - 1Zr (M)	0,274	-35,6	0,309	-24,3	[95.d]
17	Cb - 1Zr (A) (M)	0,208	-37,1	0,287	-6,3	[95.d]
18	Otel carbon (M)	0,291	17,7	0,288	17,0	[95.d]
19	Otel malle (G)	0,21	-31,1	0,266	-8,1	[106]
20	OLC 45 (G)	1,136	23,1	1,242	19,5	[106]

T_1 - aparat vibrator magnetostrictiv - LMHT

T_2 - aparat vibrator cu cristale piezoceramice LMHT

M - aparat vibrator Michigan

G - aparat vibrator Gdansk

316SS, Inox III-RNR. Aceasta variatie poate conduce la obtinerea unei curbe in conditiile unei precizii mai ridicate si dispersii reduse.

Nivelul scazut al preciziei de aproximare ($\sigma_{\max} = 37,1\%$ -Tab.7.5), dat de curba (7.12) a lui Sakai-Shima se datoreaza tocmai diferentelor prea mari intre valorile parametrului φn , corespunzatoare materialelor cu slaba rezistenta cavitationala (Cb - I Zr (M); Otel carbon (M) si Cb - I Zr(A)(M))

3.- Stabilirea coeficientilor A* si B*

Admitem ca relatia finala propusa de Sakai-Shima ca efect de scara are forma generala de tipul:

$$(1/\text{MDPR})_{M-i} = A^*(1 - e^{-B^*\varphi_n^*}) \quad (7.26)$$

Punand conditia obtinerii unei dispersii uniforme a punctelor $[(1/\text{MDPR})_{M-i}, n]$ respectiv $[(1/\text{MDPR})_{M-i}, \varphi_n^*]$, $i = T1, T2, G$, fata de curba definita de relatia (7.25) ($\bar{\alpha}_1 = \min, \bar{\alpha}_2 = \min$), folosind metoda celor mai mici patrate, s-au obtinut, pentru oteluri, urmatoorii coeficientii:

$$A^* = 445 \text{ si } B^* = 2,163 \quad (7.27)$$

In fig.7.4 se prezinta corelarea parametrului eroziunii cavitationale $(1/\text{MDPR})_{M-i}$ cu parametrii relativi φn si φ_n^* .

Erorile date de curbele de aproximatie, de ecuatii (7.12) si (7.26), determinate cu relatiile (7.28), sunt afisate in Tab. 7.5.

$$\sigma_{2j} = \frac{\left[\left(\frac{1}{\text{MDPR}} \right)_{M-i} \right]_{rel(7.26)} - \left[\left(\frac{1}{\text{MDPR}} \right)_{M-i} \right]_{rel(7.12)}}{\left[\left(\frac{1}{\text{MDPR}} \right)_{M-i} \right]_{rel(7.26)}} \cdot 100 \quad \%, \quad (7.28)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \frac{\sum_{j=1}^n \sigma_{2j}}{n}$$

Se constata ca relatia stabilita de autor duce la o crestere a preciziei de masurare cu $\approx 13\%$, iar nivelul dispersiei se reduce de aproximativ de 60 ori (cu relatia (7.12) se obtine $\sum \bar{\alpha}_1 = -0,103 \text{ hr/mm}$, $\bar{\alpha}_2 = -0,00515 \text{ hr/mm}$ fata de $\sum \bar{\alpha}_1 = -1,7 \cdot 10^0 \text{ hr/mm}$, $\bar{\alpha}_2 = -8,5 \cdot 10^0 \text{ hr/mm}$ obtinute cu relatia (7.26)). Aceste diferente reflecta fidelitatea sporita a aproximarii punctelor experimentale de curba descrisa de ecuatia (7.26), stabilita de autor. In concluzie relatia (7.26), poate servi ca efect de scara si are un nivel de aplicabilitate mai mare decat cea propusa de Sakai-Shima, (7.12).

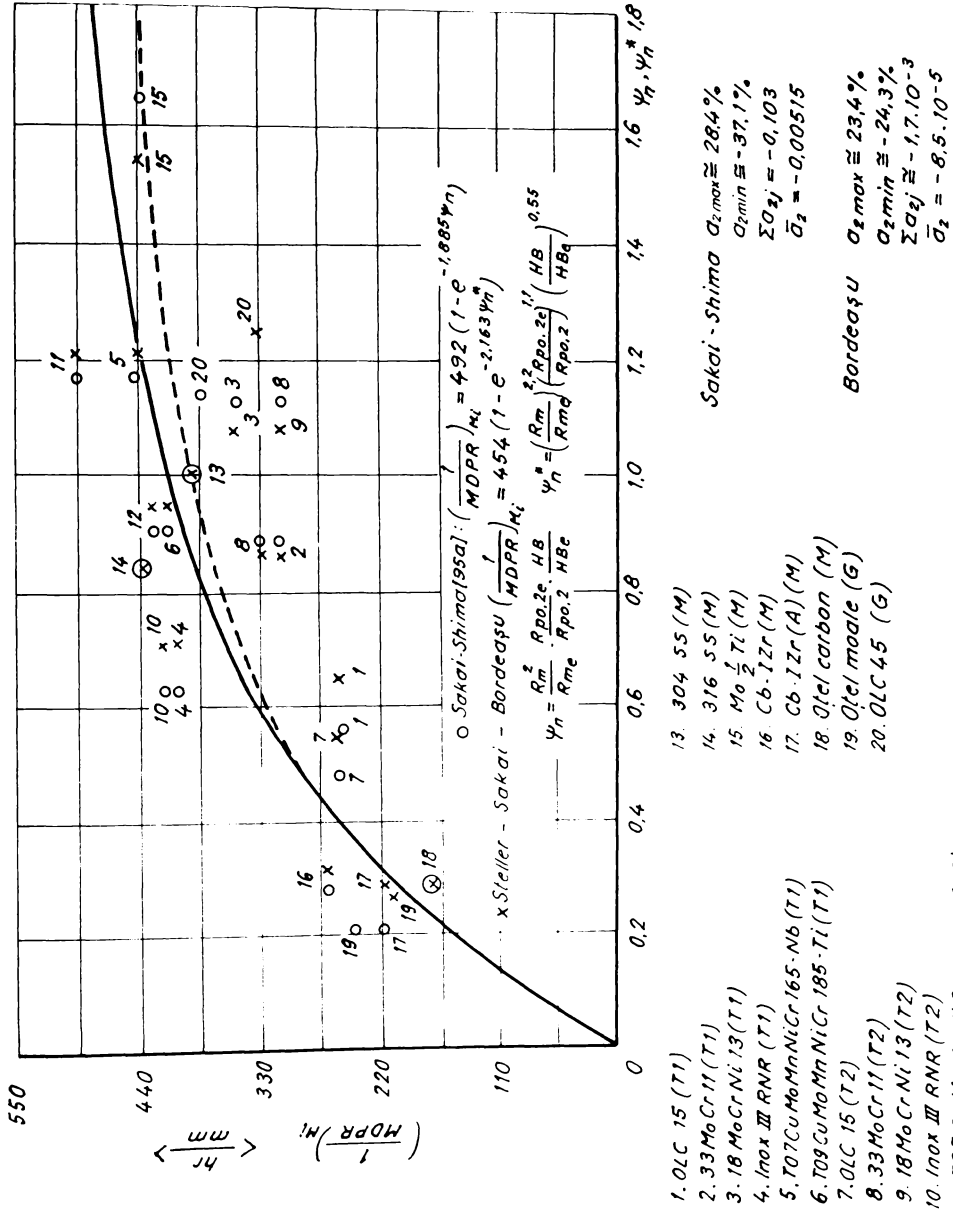


Fig 7.4 Resistenta la eroziune cavitacionala dupa parametri relativi n si *n

7.6 CONCLUZII

1. S-a realizat o analiza mai atenta a parametrilor tehnico-functionali ai aparatului vibrator - caracteristici procesului hidrodinamic din aparat- si principalilor proprietati mecanice - caracteristice procesului mecanic al eroziunii cavitationale a materialului.

2. S-a studiat mai adanc relatia lui Steller $MDPR = A^{\alpha} f^{\beta} d^{\gamma}$ si s-a aplicat la un numar de 20 materiale , dintre care 14 au fost testate in aparatele T1 si T2, din cadrul LMHT, permitand generalizarea valorilor exponentilor α , β si γ .

3. Admitand aparatul vibrator de la Michigan drept aparat standard (etalon) recunoscut de ASTM din SUA, s-a recalculat marimea $1/MDPR$, obtinuta la aparatele din Gdansk si Timisoara, permitand compararea diferitelor materiale dupa rezistenta la cavitatie.

4. Analiza parametrului adimensional $\Psi_n = U_n H_n E_n / Y_n$, a condus la definirea unui alt parametru $\Psi^*_n = U_n^r H_n^s (E_n / Y_n)^p$ care, prin valorile noilor exponenti, are un caracter mai general. Acest parametru caracterizeza un material oarecare, din punct de vedere mecanic, in raport cu materialul standard cavitational (304SS) pentru aparatul vibrator din Michigan.

5. Imbinarea relatiilor stabilite de Steller (7.15) si Sakai-Shima (7.12) sub formele generale, prin noile valori ale exponentilor α , β , γ , r , s si p au condus la o relatie similara cu cea data de Sakai-Shima, dar cu coeficienti noi A^* si B^* , cu valente superioare de generalitate si precizie, pentru grupa otelurilor.

CAP.8 CONCLUZII

8.1 CONCLUZII GENERALE

Studierea eroziunii cavitationale, inceputa de peste 100 ani [3, 4, 30a, 40a, 50a], continua sa fie o problema de mare actualitate si este mult amplificata in ultimii ani [2, 54, 55, 58, 94, 106], ca urmare a ritmului ascendent de dezvoltare a masinilor hidraulice, echipamentelor hidromecanice si constructiilor de nave.

Numeroasele rezultate, obtinute in diverse statii de laborator, au impus necesitatea stabilirii unor relatii care sa le asigure o buna corelare, transpunerea de la o statiune la alta si in aplicatii practice

Prezenta lucrare se incadreaza in eforturile de investigare experimentală a eroziunii cavitationale produse pe aparate vibratorii si de stabilire a unor relatii de efect de scara.

Indeplinirea obiectivelor propuse in tema a impus realizarea cercetarilor in conditii identice (apa distilata si marina standard la $20 \pm 1^{\circ}\text{C}$) pe materiale provenite din aceleasi semifabricate si sarje, in doua instalatii de laborator, de acelasi tip.

Astfel s-a proiectat si realizat un aparat vibrator cu cristale piezoceramice, destinat distrugerii materialelor prin eroziune cavitationala, ai carui parametrii functionali ($A = 32\mu\text{m}$, $f = 20 \pm 0.2 \text{ kHz}$, $d = 14\text{mm}$, $Pe = 274.4 \text{ W}$) respecta normele ASTM [120]. Noul aparat este cele de-al doilea aparat vibrator, aflat in LMHT, alaturi de cel magnetostrictiv proiectat si realizat de C.P.I. ing. Potencz Iosif [52] ($A = 47\mu\text{m}$, $f = 7000 \pm 3\% \text{ Hz}$, $d = 14 \text{ mm}$, $Pe = 500 \text{ W}$).

In acesta actiune am beneficiat de rezultatele obtinute, pe aparatul magnetostrictiv T1 in cei peste 35 de ani de cercetari, de Sisak [133], Kuzman si Potencz [52, 53] si Popoviciu [90, 134] si personal am studiat alte 9 materiale in vechiul aparat si 14 in noul aparat T2. De asemenea, am uzat de unele rezultate obtinute de Garcia [32, 33] si Steller [106, 107].

Materialele analizate sunt destinate constructiei de turbine hidraulice, pompe, evacuatoare de condens termodinamic, aparate hidraulice de comanda si distributie si elici navale.

Pentru obtinerea unor informatii precise, folosind drept criteriu compozitia chimica, materialele s-au grupat pe patru clase (oteluri carbon nealiate, oteluri aliate pentru constructii, inoxuri, bronzuri si alame navale). Aceasta grupare a condus la concluzii noi privind influenta rezistentei la eroziune cavitationala de factorii caracteristici materialului: tehnologie de elaborare, compozitie chimica, structura si constituinti structurali.

Astfel s-a evidentiat ca in cadrul fiecarei grupe exista materiale cu comportari cavitationale diferite si ca ordonarea lor, dupa rezistenta cavitationala, nu concorda cu

criteriile standard de clasificare [65, 115].

Testele au fost realizate dupa metoda clasica, rezultatele obtinute fiind redade sub forma curbelor de viteza de eroziune $v(t)$ ($v = \Delta V / \Delta t = \Delta m / \Delta t$), ca medii a cel puțin 3 probe. Toate sunt descrise prin doua curbe polinomiale (una de gradul II si una de gradul IV), in zona de acumulare si atenuare si o dreapta in zona de stationare a eroziunii cavitationale.

Forma curbelor obtinute in cele doua aparate a evidentiat dependenta de tipul materialului si parametri tehnico-functionali ai aparatului.

Pe baza acestor curbe s-au determinat valorile parametrilor caracteristici eroziunii cavitationale (in special v_s , v_{max} , MDP, $1/MDP$, R_{1s} si R_{1max}), ce au stat la baza discutiilor.

Modul de descriere a curbelor a condus la stabilirea timpilor caracteristici t_1 , pentru maximul vitezei de eroziune cavitationala, v_{max} si t_2 , pentru inceputul stabilizarii vitezei de eroziune la valoarea v_s . Histogramele de frecventa ale acestor timpi, permit determinarea timpilor t_1 si t_2 pentru fiecare statiune. Acestia pot fi utilizati in modelele de descriere a vitezei de eroziune cavitationala, de forma celor stabilite de Noskievic [67, 68, 69].

Pentru stabilirea duratei totale a atacului cavitional , din aparatele T1 si T2, s-au studiat curbele $v(t)$ ale mai multor materiale, prezentate in literatura [91, 106, 107, 133] si s-a stabilit ca functie de durata la care incepe stabilizarea vitezei t_2 , aceasta poate fi $Z = (0,3 \div 3) t_2$. Astfel, a rezultat ca durata $Z = 165$ minute este necesara si suficienta pentru testele de eroziune cavitationala din aparatele T1 si T2.

Intrucat, in aplicatiile practice majoritatea pieselor sunt supuse diferitelor acoperiri si tratamente de durificare superficiala s-a studiat comportarea cavitationala a otelului D32-1 durificat prin ecruisare, metalizare si niturare ionica, respectiv a otelului 40Cr10 imbunatatit. Studiile au evidentiat sporirea performantelor cavitationale si dependenta lor de calitatea tratamentului aplicat, in special la ecruisare si metalizare.

In cadrul tezei s-a prezentat o metoda noua, originala, de apreciere cantitativa a rezistentei cavitationale a materialelor testate in aparate vibratorii. Verificarea metodei, pe baza rezultatelor experimentale, obtinute de Garcia la distrugerea cavitationala a 6 materiale in aparatul vibrator de la Universitatea din Michigan [32, 33] a aratat ca limitele celor 5 domenii (superrezistenta, excelenta, foarte buna, buna si slaba) au fost bine alese si ca metoda poate fi aplicata si la alte aparate de acest tip.

La stabilirea relatiei de efect de scara s-au analizat toti parametrii coeficientii si exponentii din relatiile lui Sakai-Shima (7.12 si 7.13) [95a] si Steller (7.15) [106].

Folosind rezultatele obtinute de Garcia, pentru 6 oteluri [32, 33], Steller pentru 2 oteluri [106, 107] si in LMIIT, pe cele doua aparate, pentru 12 oteluri s-a reusit obtinerea unor noi valori ale exponentilor α , β , γ , r , s , p si coeficientilor A^* si B^* si imbinarea relatiilor lui Sakai-Shima si Steller in una singura, (7.26) cu forma similara celei stabilite de Sakai-Shima, (7.12).

Prin noua relatie s-a creat posibilitatea transpunerii rezultatelor de la un aparat vibrator la altul, folosind ca etaloane inoxul 304SS si aparatul vibrator de la laboratorul de cavitatie al Universitatii din Michigan.

Rezultatele obtinute in cadrul tezei, si in special relatia de efect de scara, deschid noi drumuri in cercetarea eroziunii cavitationale si de cunoastere a altor factori care sa-i mareasca domeniul de aplicabilitate.

3.2 CONTRIBUTII PERSONALE SI ORIGINALE

1. S-a proiectat si realizat un aparat vibrator cu cristale piezoceramice, destinat distrugerii materialelor prin eroziune cavitationala, care respecta normele americane ASTM [120]. Parametrii optimi de functionare ai noului aparat sunt: $A = 32\mu\text{m}$, $f = 20 \pm 0,2 \text{ kHz}$, $d = 14 \text{ mm}$, $P_{el} = 274,4 \text{ W}$.

Pentru masurarea, verificarea si mentinerea in limitele standard a nivelului acestor parametri, pe durata functionarii aparatului, s-au conceput si realizat dispozitivele si sistemele necesare. Astfel:

a. S-a proiectat si realizat un dispozitiv original, electromecanic, destinat masurarii amplitudinii vibratiilor la suprafata de atac a probei, produse in aparatul vibrator T2, indiferent de natura lichidului de lucru.

Amplitudinea masurata s-a verificat prin compararea rezultatelor experimentale, obtinute pe doua materiale (alama si 33MoCr11), cu cele realizate in aparatele vibratorii din Michigan, VSB Ostrava si Wuxi din China, pe materiale cu caracteristici fizico-mecanice apropiate.

b. S-a realizat un generator electronic de ultrasunete, cu un sistem original de protectie la variatii de sarcini, pe baza unei scheme electronice originale, folosind componente din import, care asigura stabilitatea frecventei de $20 \pm 0,2 \text{ kHz}$, timp de 17 minute.

c. S-a conceput si realizat un sistem electric de masurare a puterii electrice de alimentare a etajului final al generatorului electronic de ultrasunete si blocului ultrasonic.

2. S-a perfectionat si dezvoltat aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, proiectat si realizat de C.P.I. ing. Potencz Iosif [52].

3. S-a elaborat un program original, in limbajul "TURBO-PASCAL", de calcul a transformatorilor acustici (concentratori si amplificatori de energie acustica), pentru patru tipuri de profile (cilindric, conic, exponential, cu raza de racordare) cu posibilitatea combinarii. Programul permite determinarea lungimii transformatorului acustic necesara obtinerii amplitudinii maxime de vibratie si a dimensiunilor transversale necesare protejarii transformatorului la solicitarile mecanice.

4. S-a studiat comportarea cavitationala a 20 materiale in stare normalizata, impartite in patru grupe de calitate, un otel imbunatatit (40Cr10), un otel ecruisat, prin acelasi procedeu, in patru variante diferite (D 32-1), un otel nitrurat ionic (D 32-1) si un otel durificat superficial prin metalizare (D 32-1). Cele patru materiale tratate

si 9 din cele 20, fara prescriptii de tratament, au fost testate de autor in aparatul vibrator magnetostrictiv T1 (Fgn 450-5, Carbon I-RNR, D 32-1, 18MoCrNi13, 40Cr10, Inox III-RNR, CuNiAl I-RNR, CuNiAl III-RNR si alama navala) si 14 in aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (in plus fata de cele amintite s-au testat OL 370-3k, 20Cr130, T09CuMoMnNiCr185-Ti, T07CuMoMnNiCr165-Nb si 33MoCr11).

5. S-au determinat proprietatile mecanice R_m , $R_{p0.2}$ si HB prin masurare, din STAS si literatura, pentru toate materialele analizate in lucrare, iar pe baza corelatiilor $R_m(\mathbf{v}_s)$, $R_{p0.2}(\mathbf{v}_s)$ si $HB(\mathbf{v}_s)$ s-au discutat tendintele influentei lor asupra rezistentei cavitationale.

6. S-a analizat influenta principalelor elemente chimice componente si de aliere (C, Cr, Ni, Mo, Mn, Si, S) asupra structurii materialului si comportarii sale cavitationale, exprimata prin viteza de stabilizare a eroziunii.

7. S-a investigat modul in care constituintii structurali (F, P, B, S, A, M), functie de gradul de finete, omogenitate si cota procentuala de participare (determinata, acolo unde a fost posibil, pe baza diagramelor de faze si tipurilor de structuri metalografice prezentate in literatura [35a, 64, 65, 114, 115]), tind sa influenteze rezistenta materialului la eroziune cavitationala.

8. S-a folosit o metoda originala de descriere a curbelor experimentale $v(t)$, folosind doua polinoame cu grad si coeficienti diferiti (unul de gradul II si unul de gradul IV) si o dreapta, discutandu-se nivelul preciziei si dispersiei inregistrate la fiecare grupa de materiale.

9. S-au determinat frecventele timpilor t_1 si t_2 de aparitie a valorilor maxime si de inceput a stabilizarii vitezelor de eroziune cavitationala (\mathbf{v}_{max} si \mathbf{v}_s), pentru fiecare aparat vibrator din LMIIT.

10. S-a conceput o metoda originala de apreciere cantitativa a comportarii cavitationale a materialelor testate in aparatele vibratorii din cadrul LMIIT, folosind ca parametru de referinta rezistenta normalizata la cavitatie.

11. Plecand de la relatiile stabilite de Sakai-Shima [95a] si Steller [103, 106] s-a stabilit o noua relatie de efect de scara, cu valente superioare de generalitate si precizie, care permite transpunerea rezultatelor de la un aparat vibrator la altul.

Similara ca forma, celei propuse de Sakai-Shima [95a] si Steller [103, 106] s-a stabilit o noua relatie de efect de scara, cu valente superioare de generalitate si precizie, care permite transpunerea rezultatelor de la un aparat vibrator la altul.

Similara ca forma celei propuse de Sakai-Shima, dar cu coeficienti diferiti, relatia stabilita reprezinta o legatura armonioasa intre parametrul caracteristic eroziunii cavitationale $1/MDPR$, parametrii functionali ai aparatului vibrator (A , f , d) si caracteristicile mecanice ale materialului exprimate prin parametrul adimensional

ψ^*n .

Sub forma finala asigura corelarea a 20 oteluri testate in patru aparate (T1 si T2 din LMHT, aparatul din Gdansk [106] si aparatul din Michigan [33]), fata de 6, corelate de relatia lui Sakai-Shima si testate in acelasi aparat. De asemenea, se asigura reducerea erorii de aproximare cu 13% si nivelului de dispersie de 60 ori.

8.3 PROPUNERI

1. Se impune continuarea cercetarilor, in conditii identice, pe aliaje neferoase, provenite din aceleasi sarje si semifabricate, in vederea extinderii relatiilor de efect de scara.

2. Solicitarea cavitationala fiind un proces dinamic realizat cu viteza de deformatie foarte ridicata ($10^2 - 10^3$ s) [30a] intr-un timp foarte scurt, determinarea proprietatilor mecanice R_m , $R_{p0,2}$, si HB, in aceste conditii, poate conduce la noi valori ale exponentilor r , s si p din relatia parametrului relativ ψ^* , apropiind-ul mai mult de realitate.

De asemenea, utilizarea unei noi proceduri in determinare parametrilor MDP_{rmax} si MDP_r, indiferent daca MDP(t) este sau nu o depedenta liniara, conduce la noi valori ale exponentilor α , β , γ si coeficientilor A^* si B^* . In acest mod se poate o noua relatie de efect de scara cu un grad mai mare de generalitate.

Bibliografie

- [1]. Amza. Gh., si altii - Sisteme ultraacustice, Editura Tehnica, Bucuresti 1988.
- [1a]. Abbott B.W., Cornish R.H., Weil N.A., - Techniques for Studying Strain Rate Effects in Brittle Materials, Journal of Applied Polymer Science, Vol.8, p. 151- 167, 1964. Chicago Illinois.
- [2]. Anton I., - Turbine hidraulice., Editura Facla, Timisoara, 1979.
- [3]. Anton I., - Cavitatia, Vol I, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1984.
- [4]. Anton I., - Cavitatia, Vol II, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1985.
- [5]. Badarau E., Grumazescu M si altii- Ultraacustica, Fizica si Tehnica, Editura Tehnica, Bucuresti, 1967.
- [5a]. Balasoiu V., Bordeasu I., Balasoiu B., - Etapes de projets du systemes d'asservisement hydraulique, Buletinul stiintific si Tehnic, Universitatea Tehnica, Timisoara, 1994
- [6]. Benanti A., Pighini U., - Cavitation,erosion dimensional analysis.,
- [7]. Byarne E., - Propeller induced hull pressure pulses and vibration due to cavitation, International Conference, Cambridge, 1992.
- [8]. Bogaciov I. N., Miut R I., Vekslev I. G., - Rezistenta cavitacionala a otelurilor austenito - feritice (in limba rusa), Energomasinostroenie, Nr. 9, Leningrad, 1963.
- [9]. Bordeasu Il., - Le comportement a la cavitation de l'acier carbon categorie I - RNR, Buletinul Stiintific si Tehnic al Universitatii Tehnice , Timisoara, Vol 37 (51), 1992.
- [10]. Bordeasu Il., The cavitation resistance of High - Strength full structural steel D 32, with the method of electric sparks, Buletin Stiintific si Tehnic, Universitatea Tehnica, Timisoara, Vol 38 (52), 1993.
- [11]. Bordeasu Il., - Eroziunea cavitacionala a materialelor folosite in realizarea elicelor navale, Analele Universitatii din Oradea , fascicola Mecanica, Oradea, 1992.
- [12]. Bordeasu Il., Popoviciu M., - Durabilitatea cavitacionala a otelurilor folosite in fabricarea pieselor solicate cavitacional, Analele Universitatii din Oradea , fascicola Mecanica, Oradea, 1993.

- [13]. Bordeasu I., Baya Al., Popoviciu M., Anton L., - Contributions Concerning Determination Periods of Cavitation Erosion, Bul. St. al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Vol 41(55), fascicola 2, 1996.
- [13a]. Bordeasu Il., - Acoustic power influence to the erosional cavitation speed, Buletinul stiintific si tehnic al Universitatii "Politehnica" Timisoara, Vol 42 (56), 1997.
- [14]. Bordeasu Il. si altii., - Contributions concernant las destruction de l'acier inoxydables par erosion cavitationnelle, Buletin Stiintific, Universitatea "Politehnica" Timisoara, vol 41 (55), 1996.
- [15]. Bordeasu Il., Miu V., Popoviciu M., - Comparatie intre comportarea cavitationala a otelului D - 32 si aliajului de cupru utilizat pentru realizarea elicelor navale, Sesiunea de comunicari stiintifice a tinerilor absolventi, Timisoara, 1989.
- [16]. Bordeasu Il., Popoviciu M., - Comportarea cavitationala a otelului inoxidabil utilizat la elicele navale, Conferinta de Masini hidraulice, Vol III, Timisoara, 1990.
- [17]. Bordeasu Il, Popoviciu M., - Comportarea cavitatiopnala a fontei cu grafit nodular, Conferinta de Masini hidraulice, Vol III, Timisoara, 1990.
- [18]. Bordeasu Il., Popoviciu M., Miu V., - Rezistenta la cavitatie a bronzurilor utilizate pentru elicele navale, Conferinta de Masini Hidraulice si Hidrodinamica, Vol III, Timisoara, 1990.
- [19]. Bordeasu Il., Popoviciu M., - Rezistenta la cavitatie a otelului naval D - 32 tratat prin metoda alierii cu scintei electrice, Sesiunea de comunicari stiintifice "Nouati in domeniul tehnologiilor si utilajelor pentru prelucrari la cald, Universitatea "Transilvania" Brasov, 1993.
- [20]. Bordeasu Il., Popoviciu M., - Comportarea la cavitatie a unor materiale utilizate in constructia aparatelor hidraulice de comanda si reglare, Conferinta Internationala de Sisteme Hidropneumatice de Actionare, Vol III, Timisoara, 1995.
- [21]. Brehme H., - Kavitationsschaden an Schiffspropellern, Sonderdruck aus der Werkzeugzeitung "Deutsche Werft", Hamburg, 1966.
- [22]. Buzdugan Gh., - Rezistenta materialelor, Editura Tehnica, Bucuresti, 1974.
- [23]. Chirita S., - Probleme de matematici superioare, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1989.
- [23a]. Crudu I., s.a.,- Atlas reductoare cu roti dintate, E.D.P., Bucuresti, 1982.
- [24]. Crawford A E., - Tehnique de ultrasons, Dunod, Paris, 1959.
- [25]. Deutsch I., - Rezistenta materialelor, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti , 1979.

- [26]. Dumitrescu S si altii, - Calculul elicei, Editura Academiei Romane, Bucuresti, 1990.
- [27]. Dorey J. M., Rarcalou T., - Similitude en erosion de cavitation: Essais sur un roue de pompe en eau et en sodium, Rapport EDF/DER Departament Machines Catou, 1993.
- [28]. Esminger D., - Ultrasonics the low and high intensity applications, New York, 1975.
- [29]. Emerson A, Patience G., - The prediction and prevention of cavitation erosion of marine propellers, Cavitation, Edinburg, 1974.
- [30]. Frank J. P., Michel J. M., Nguyen Trong H., - An experimental investigation of scale effects in cavitation erosion, International Conference, Cambridge, 1992.
- [30a]. Franc J.P., e.a. - La Cavitation, Mecanismes physiques et aspects industriels, Press Universitaires de Grenoble, 1995.
- [31]. Gal C., si altii- Proiectarea asistata de calculator a ghidurilor de unda pentru ultrasunete, Sesiunea de comunicari stiintifice a tinerilor absolventi, Timisoara, 1988.
- [32]. 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.
- [33]. 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.
- [34]. Gatperin M.I., Kirillova M. P., Sriro I. I., Pilaev N. I. I., Pavisenie nadijnosti ghidroturbin, Energomasinostroenie, G, 1979.
- [34a]. George E, Dieter, Jr. - Mechanical Metallurgi, McGraw-hill Book Company, Inc, New York, 1961.
- [35]. Geru N., si altii., - Analiza structurii materialelor metalice, Editura Tehnica, Bucuresti, 1991.
- [35a]. Geru N.- Metalurgie fizica, E.D.P., Bucuresti, 1981.
- [36]. Ghersghel D. A. si altii - Aparate cu ultrasunete, Editura Tehnica, Bucuresti, 1984.
- [37]. Grist E., - Net Positive Suction Head Requirements for Avoidance of unacceptable Cavitation Erosion in Centrifugal Pumps, Cavitation, Conference, mechanical Engineering, Edinburgh, 1974.
- [38]. Hamazaki U., - Cavitation erosion on the back of Pelton turbine bucket, Symposium Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [39]. Hammitt F. G., Nath A., De. M. K. - Erosion of ferrous and aluminum alloys in cavitating venturi, Report No. UMICH 014456-53 - I, University, Michigan, 1980.

- [40]. 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.
- [40a]. Hammitt F.G., - Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw Hill International Book Company, 1980.
- [40b]. Hammitt F.G., Bhatt N.R., - Cavitation Damage resistance of Hardened Steels, Univ. Michigan, 1970, p.1-36.
- [41]. Hobbs J. M., - Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
- [42]. Hobbs J. M. , - Vibratory cavitation erosion testing at nel, Confernce Machinery Groop, Edinburgh, 1974.
- [43]. Hooper L. J., - Experimental Investigation of Initiation of Cavitation Behind an Accelerated Circular Disc, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery Sendai, 1962.
- [44]. Hrelescu M., - Cercetari asupra alierii otelului moale in arcu cu elemente care sa confere metalului depus rezistenta la cavitatie, Teza de doctorat, Timisoara, 1967.
- [45]. Ito T., - An Experimental Investigation into the Unsteady Cavitation of Marine Propellers, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [46]. Jiu - gen Ite., Hammitt F. G., - Comparison of cavitation erosion test results from venturi and vibratory facilities, Report No. UMICH 014456 - 73- I, University of Michigan, 1981.
- [47]. Karimi A., Leo W.R. - Phenomenological model for cavitation erosion rate Computation Material Science and Engineering, 95 (1987), 1 ; 14.
- [48]. Karimi A., Heuze J. L., - Erosion de cavitation d' alliages amortissants a base de magnese et de cuivre, La Houille Blanche, Nr. 7/8 - 1992.
- [49]. Kasai T., Takamatu Y., - Cavitation Aspects and Suction Performances of Centrifugal Pumps, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [50]. Kerry P. R., James R. D., - International Cavitation Erosion Test, Result sumary, University of Hull, 1991.
- [50a]. Knapp R., a. o., - Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, 1970, p.405 - 407.
- [51]. Krianii P. I., - Lopasti ghidroturbin, Masghiz, Moskva, 1958.
- [51a]. Crudu I. s.a., - Atlas reductoare cu roti dintate, E.D.P., Bucuresti, 1982.

- [52]. Kuzman A. F., Potentz I., - Rezistenta la eroziune cavitacionala a unor oteluri indigene, Buletinul Stiintific si Tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, Tom 23(37), Fascicula 1 - 1978.
- [53]. Kuzman A.F., Potentz I., Trusculescu M., Mitelea I., - Rezistenta la eroziune cavitacionala a unor oteluri indigene, Influenta tratamentului termic, Buletinul Stiintific si Tehnic a Institutului Politehnic, " Traian Vuia" Timisoara, Tom 22 (36), Fascicula 1 - 1977.
- [54]. Kuzman - Anton A.F., - Influenta unor proprietati fizice ale lichidului asupra incipientei si eroziunii cavitationale, Teza de doctorat, Timisoara, 1992.
- [55]. Lecoffre Yves., - Erosion and cavitation types, La Houille Blanche Nr. 7/8 - 1992.
- [56]. Leith W. C., Mc Ilquahm W. S., - Accelerated cavitation erosion and sand erosion, American Society for Testing and Materials, 1961.
- [57]. Louis H., Tai P. T., Wehlage T., Yabuki A., - Cavitation erosion prediction by quantification of surface integrity, International Conference, Cambridge, 1992.
- [58]. Lusch P. A., Ewunkem A. E., - Cavitation erosion of engineering materials, International Conference, Cambridge, 1992.
- [58a]. Maekawa I., - Characteristic Properties of Impact Strength of Materials and The New Evaluating Method, Proc. ISIE, Sendai, 1992, II,587-594
- [59]. Manen Van J. D., - Bent Trailing Edges of Propeller Blades of High Powered Single Screw Ships, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [60]. Mansell C. J., - Impeller cavitation damage on a pump operating below its rated discharge, Cavitation Conference, Edinburg, 1974.
- [61]. Matsumura M., Oka Y. I., Sakamoto A., - Quantitative prediction of erosion damage to metallic materials exposed to cavitation attack., International Conference, Cambridge, 1992.
- [61a]. Mihailiuk A.J., Revenco V.G., Natarov N.N. - Majorarea rezistentei la uzura si coroziune a cuprului prin metoda alierii prin scantei electrice, Institutul de Fizica al A.S. a R. Moldova, Chisinau, 1992.
- [62]. Mitelea I., Popoviciu M., Bordeasu Il., - La resistance a l'erosion cavitationelle des joints soudes en aciers inoxydables martensitiques, Buletin stiintific si Tehnic, Universitatea Tehnica Timisoara, Vol 37 (51), 1992.
- [63]. Mitelea I si altii., - Materiale si tratamente ternice pentru structuri sudate, Editura de Vest, Timisoara, 1992.
- [64]. Mitelea I., Budau V., - Studiul metalelor, Indreptar tehnic, Editura Facla, Timisoara, 1987.

- [65]. Mitelea I., - Studiul metalelor, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, 1983.
- [66]. Morton C. J. si altii ., - The condating of cavitation erosion by the use of cold applied tough coating, Simposyum, Belgrad, 1990.
- [67]. Noskievic J., - The extend mathematical model of cavitation and erosion wear, Proc 6 th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1983.
- [68]. Noskievic J., - Mathematical Model for Cavitation damage dynamics of matherial (in german) Zeszyty naukowe Politechniki Slaskiej, Gliwice, Poland, Energetyka. 2.66, 1978.
- [69]. Noskievic., - Vyhodnoceni Kavitacniho opotrebeni materialu C7, Hydro - Turbo, 1976.
- [70]. Kado T. si altii - Cavitation erosion in vibratory and venturi facilities, University of Michigan, Departament of Mechanical Engineering, Report. No UMICH 014456 - 56 - J, 1980.
- [71]. Orakelasvili M. M.,- Iznosostoikost reaktivnih ghidroturbin, Gosenergoizdat, 1960.
- [72]. Palaev N. I., Edel Iu. U., - Kavitatia v ghidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad, 1974.
- [73]. Perenik A.D., - Problema kavitatii, Sudpromghiz, 1963.
- [74]. Perara Fr., Avellan Fr., - Cavitation erosion :statistical analsis of transient cavities, International Symposium Cavitation, CAV' 95, Deauville, France, 1995.
- [75]. Pilic - Rabadan L- Investigation of materials of Yugoslav production in designing hydraulic turbo - machines affected by cavitation, Turboinstitut, Ljubliana, 1984.
- [76]. Pilic - Rabadam L., Djordjevic V., - Utjecaj slanosti na brzinu erozije kavitacijom domacih materijala za gradnju brodskih vijaka , VI Simpozijum Teorija i Praksa Brodogradnje, Sveska 2, Beograd, 1984.
- [77]. Popovicu M., - Tehnologia fabricatiei si montajului masinilor hidraulice, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, 1981.
- [78]. Popovicu M., Bordeasu Il., - Consideratii privind unele metode de protejare a suprafetelor metalice supuse la eroziune cavitationala, Sesiunea de comunicari stiintifice , Conceptie. Tehnologie si Management in Constructia de Masini, Vol VIII, Iasi, 1992.
- [79]. Popovicu M., Bordeasu Il., Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Stiintific si Tehnic al Universitatii Tehnice, Timisoara, Vol 39 (53), Fascicula 1-2, 1994.
- [80]. Popovicu M., Bordeasu Il., - Cavitation erosion of 18MoCrNi13 Steel used for manufacturing the distributor valve, Conferinta

Internationala de Sisteme Hidropneumatice de Actionare, Vol I, Timisoara, 1995.

[81]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Vol II, Timisoara, 1994.

[82]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Durabilitatea cavitationala a otelurilor folosite pentru fabricarea elicelor navale, Sesiunea de Comunicari Stiintifice "Noutati in domeniul tehnologiei si utilajelor pentru prelucrari la cald" Brasov, 1993.

[83]. Popoviciu M., Bordeasu Il., Miu V., - Cercetari cavitationale asupra otelului D - 32 ecruisat, Conferinta de Masini Hidraulice si Hidrodinamica, Vol III, Timisoara, 1990.

[84]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Comparatie intre rezistenta cavitationala in apa distilata si apa potabila a unui otel obisnuit, Conferinta de Masini Hidraulice si Hidrodinamica, Vol III, Timisoara, 1990.

[85]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Comportarea cavitationala a otelului naval de inalta rezistenta supus la diferite tratamente superficiale, Conferinta de Masini Hidraulice, Vol III, Timisoara, 1990.

[86]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - A quantitative method of estimating the cavitation behaviour of materials tested in a magnetostrictive facility, Buletin Stiintific , Universitatea Politehnica "Timisoara", Vol 41 (55), 1996.

[87]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationelle, Buletin Stiintific si Tehnic, Universitatea Tehnica, Timisoara, Vol 40(51), 1993.

[88]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Considerations upon the stating of cavitation Average service life of Nodular Cast Irons and the copper Alloys utilized for naval propellers, Buletinul Stiintific si Tehnic al Universitatii Tehnice, Timisoara, Vol 40(51), 1993.

[89]. Popoviciu M., Bordeasu Il., - Le comportement a la cavitation des materiaux couramment utilises pour la fabrication des helices navales, Buletinul Stiintific si Tehnic, universitatea Tehnica Timisoara, Vol 37 (51), 1992.

[90]. Popoviciu M., Kuzman A. F., -Contributions to the study of cavitation erosion on Kaplan turbine runners, Conference "Hydroforum ", Gdansk, 1985.

[91]. Preiser H. S. si altii. , - Cavitation Damage Research Facilities for High Temperature Liquid Alkali Metal Studies, ASM, Atlantic City, 1964.

- [92]. Rabotnov B. A., - Voprosi Kavitationnoi stoikosti povorolnogo gaslnih ghidroturbini, Gosenergoizdat, 1961.
- [93]. Radoi M, Deciu E., - Mecanica, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1981.
- [94]. Richman R.H., Mc. Naughton W.P., Rao A. S., - Cyclic deformation and phase transformation in cavitation erosion of alloys, International Conference, Cambridge, 1992.
- [95]. Roman J.M., Finet L., - Etude et tenue de quelques materiaux a la cavitation, La Houille Blanche, Nr. 7/8 - 1992.
- [95a]. Sakai I. Shima A.- On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials, Report No. 385, Tokyo, 1987.
- [95b]. Safta V., - Comportarea otelurilor cu continut scazut de carbon la solicitari triaxiale neomogene de tractiune, Teza de doctorat, Timisoara, 1970.
- [96]. Sebestyen G., Sturteczky F., - Investigation of erosion characteristics of cavitation in pumps, Proceedings of the Fourth Conference on Fluid Machinery, Budapest, 1972.
- [97]. Shalnev K.K., Varga I.I., Sebestyen D., - Investigation of the scale effects of cavitation erosion, Vol 260, Philosophical Transactions of the Royal Society, London, 1966.
- [98]. Scheffel M. si altii - Dispozitive cu ultrasunete, Partea a II a, Editura Tehnica, Bucuresti, 1989.
- [99]. Simoneanu R., - Cavitation pit counting and steady - state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995
- [100]. Staritkii V. G., - Zavisimot Kavitationnoi erozii materialo ot ego napriojennago, sostoianii. Energomasinostroenie, Z, 1969.
- [101]. Steller K., Reymann Z., Krzysztowicz 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.
- [102]. Steller K., - Prediction of cavitation damage in hydraulic turbomachinery, Proc of the seventh Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapest, 1983.
- [103]. Steller K., Steller J., - On prediction of cavitation and its erosive effects in hydraulic turbomachinery, Proceedings Conference, Turboinstitut, Ljubiana, 1984.
- [104]. Steller K., - Change of of the relative material resistance due to the change of cavitation conditions. Proceedings of the sixth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapest, 1979.

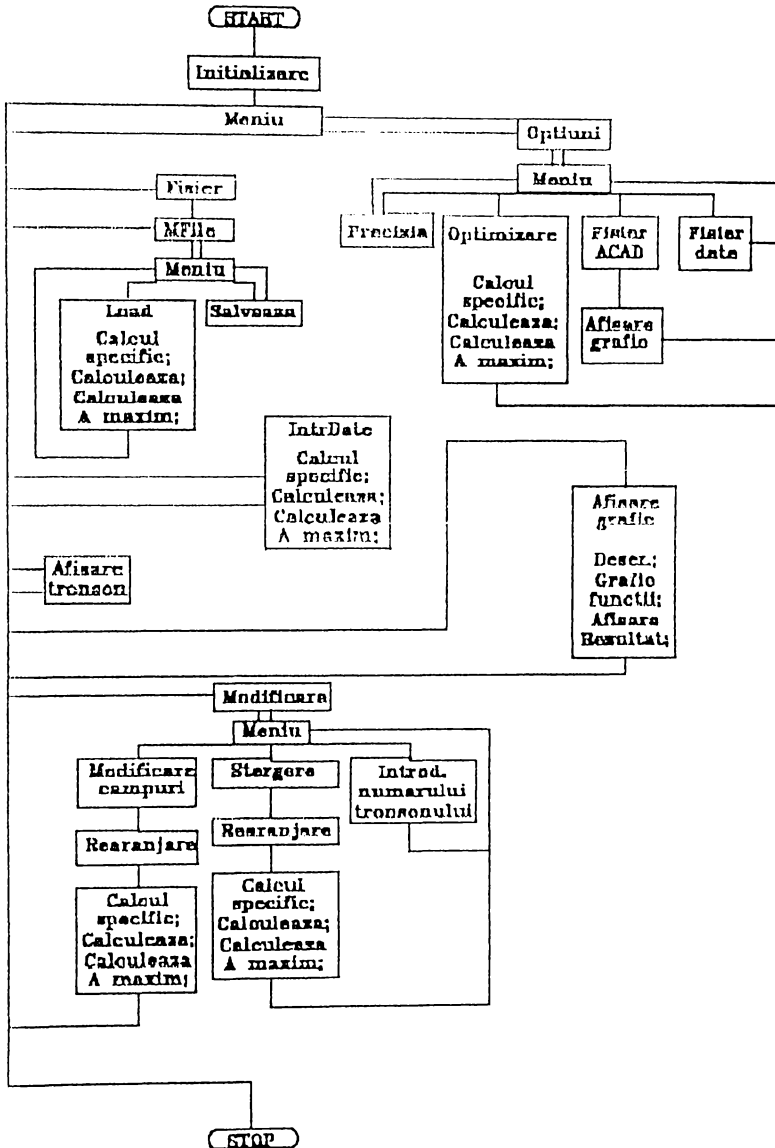
- [105]. Steller K., Bugola R., Steller J., - Cavitation Roads and their erosive effects, 2 - emes, Journees Cavitation, Paris, 1992.
- [106]. Steller J. K. - International cavitation erosion test - test facilities and experimental results, 2 - emes Journees Cavitation, Paris, March, 1992.
- [107]. Steller J. K. - Dzialalnosc naukowa zakladu dynamiki cieczy Institutu Maszyn Przeplywowych Pan W Latach 1970 - 1972, Warszawa - Poznan, 1974.
- [108]. Steller J. K., - International cavitation erosion test - summary of results, International Conference, Cambridge, 1992.
- [109]. Taniguchi K., Tanibayashii H., - Cavitation Tests on a Series of Supercavitating Propellers, IAHR Symposium Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [110]. Tanasescu F.T. si altii., - Agenda Tehnica, Editura Tehnica, Bucuresti, 1990.
- [111]. Thiruvengadam A., Preiser H. S., - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 - 3, 1963.
- [112]. Tudor Gh., Crivat N., - Analiza matematica si matematici speciale, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, 1984.
- [113]. Thiruvengadam A., - Cavitation erosion, Applaid Mechanic, Vol 24, Nr. 3, 1971.
- [114]. Trusculescu M., Cucuruz R.L., Raduta A., - Studiul metalelor, Analize si incercari, Litografia Universitatii Tehnice, Timisoara, 1992.
- [115]. Trusculescu M., - Studiul metalelor, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1977.
- [116]. Veerabhadra Rao P., Syamala Rao B. C., Lakshmana Rao N.s. - Erosion and Cavity Characteristics in Rotating Components, J.T.E.V.A, Vol 8, No. 3. 1980.
- [117]. Van der Meulen ., - Cavitation erosion of a ship model propeller, ASME for Testing Materials, 1970.
- [118]. Walsh W. J., Hammitt F. G. - Cavitation and erosion damage measurements with radioizotopes, International Report, No 8, Proiect. 03424, 1961.
- [119]. Yamazak T.. - Cavitation Erosion on the Back of Pelton Turbine Bucket, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai, 1962.
- [120]. *** Standard method of vibratory cavitation erosion test ASTM , Standard G 32 - 85.
- [121]. *** Registrul naval roman, Reguli pentru clasificarea si constructia navelor maritime, Vol V, Bucuresti, 1986.
- [122]. *** STAS 500/2 - 80.

- [123]. *** STAS 600 - 82.
- [124]. *** STAS 3583 - 80.
- [125]. *** STAS 791 - 86.
- [126]. *** STAS 880 - 86.
- [126a]. *** GOST 4025-68

CONTRACTE

- [127]. Anton I., Kuzman A.F., s.a., - Studii si cercetari pentru determinarea comportarii la cavitate a otelurilor marca T07CuMoMnNiCr165-Nb si T09CuMoMnNiCr185-Ti destinate turnarii rotoarelor monobloc pentru turbinele Francis, Contr. Cercet. St. 96/1985.
- [128]. Popoviciu M., Miu V., **Bordeasu I.**, - Studiul comortarii la eroziune cavitationala a unor materiale utilizate in constructia elicelor navale, Contr. Cercet. St. 165/1989
- [129]. Popoviciu M., **Bordeasu I.**, - Incercarea rezistentei la cavitate a otelului carbon placat cu tabla de alama si otel inoxidabil prin lipire cu adeziv, Contr. Cercet. St. 95/1991.
- [130]. Popoviciu M., **Bordeasu I.**, - Incercarea rezistentei la cavitate a otelului naval D-32 cu tratament de suprafata, Act Aditonal 35/1992 la C.C.S. 95/1991
- [131]. Popoviciu M., Balasoiu V., Raszga C., Baya A., **Bordeasu I.**, Anton L., - Conducerea automatizata si comportarea in exploatare a sistemelor hidtaulica de actionare si de forta, Grant 4004/1995.
- [132]. Popoviciu M., Balasoiu v., Raszga C., Baya a., **Bordeasu I.**, Anton L., Conducerea automatizata si comportarea in exploatare a sistemelor hidraulice de actionare si de forta, Grant 4004/1996.
- [133]. Sisak e., s.a., - studiu de imbunatatire a evacuatoarelor de condens termodinamic, Reconsiderarea critica a materialelor utilizate pentru evacuator, Contr. Cercet. St. 51/1975.
- [134]. Popoviciu M., s.a., - Studiul experimental al rezistentei la eroziune cavitationala a doua materiale utilizate in constructia de turbine hidraulice Contr. Cercet. St. 81/1978

ANEXĂ




```
Program de calcul al concentratorilor_amplificatori_de_unde;
Uses Dos,Crt,Graph,ForUltra;
Const MaxTronsoane=10;
      MaxNrPasi=1000;
```

```
{Meniu principal :
-"Introducere date" = se introduc toate datele referitoare
                    la tronsonul NrElem (pana la 10);
-"Precizia de afisare" = in functie de rezultatele obtinute
                    se pot modifica preciziile de afisare
                    a partii intregi respectiv a celei zeci-
                    male;
ATENȚIE : Daca precizia este prea mica , atunci calculatorul rotun-
          jeste rezultatul si pot aparea erori !
-"Modificare" = modificarea datelor referitoare la un tron-
              son;
"ENTER";
-"Load" = inregistreaza in memoria calculatorului da-
         tele salvate anterior intr-un director fiu
         al directorului curent;
"Save" = salveaza in directorul specificat datele
        introduse in sesiunea curenta;
"Load" = face calculele pentru tronsonul NrElem;
" Afisare grafic" = se afiseaza graficul daca variabila de tip
        <boolean> Se_poate_afisa este <true>;
"Exit" = parasirea programului;
OBSERVAȚII :
```

```
}
MenPrinc:MenType=((Name:'Fisier          ',Active:True),
                 (Name:'Introducere Date ',Active:True),
                 (Name:'Afisare tabel   ',Active:True),
                 (Name:'Modificare     ',Active:True),
                 (Name:'Optiuni        ',Active:True),
                 (Name:'Grafic         ',Active:True),
                 (Name:'eXit           ',Active:True));
```

```
{Selectare tipurilor de tronsoane}
MenSec:MenType=((Name:'Cilindric ',Active:True),
               (Name:'Conic      ',Active:True),
               (Name:'Exponential',Active:True),
               (Name:'Racordare ',Active:True),
               (Name:'',Active:False),
               (Name:'',Active:False),
               (Name:'',Active:False));
```

```
{Tipuri de tronsoane}
tp_cil=1;
tp_con=2;
tp_exp=3;
tp_rac=4;
```

```
{Dimensiuni maxime in milimetri ale segmentului afisat}
Lungime_oriz=500; {mm}
Lungime_vert=70 ; {mm}
```

```
{Precizia de afisare}
Intregi:Byte=5;
Zecimale:Byte=4;
```

```
Type TipulDeBaza=Record
      Diam1,      {Echivalent d0}
      VitSunet,  {Echivalent c}
      Frecventa, {Echivalent f}
```

```
ModElast,      {Echivalent E}
IncCalcul      {Echivalent dx}
:Real;
PasiI, PasiF: Integer;
calculat: Boolean;
Case Tip: Byte of
tp_con: (D2, tgAlfa, Alfa: Real);
tp_exp: (Diam2, Beta: Real);
tp_rac: (RazaProf: Real);
End;

Var {Variabile utile calculului}
NrUnda: Real;          {Echivalent k}
NumarPasi,           {Numarul de pasi pe tronsonul curent}
PasulInitial,       {Pasul de plecare pe tronsonul curent}
NumarPasiRamasi,    {Pasi ramasi pana la MaxNrPasi}
PasulFinal: 0..MaxNrPasi; {Pasul final pe ultimul tronson (echiv.
                        cu pasul final pe intregul segment)}
PasulInitialAnterior: 0..MaxNrPasi;
                        {Pentru facilitarea modificarilor}
NrElem: 0..MaxTronsoane; {Numarul elementului curent}
Lungime: Real;       {In cadrul procedurii Afisare_rezultat
                        contine pe rand lungimile tuturor tron-
                        soanelor; in rest (dupa apelarea acestei
                        proceduri) contine lungimea totala a seg-
                        mentului studiat}
NullRotire: Integer; {Punctul de maxim al amplitudinii}

Var Se_Poate_Afisa, optim: Boolean;
Matrice: Array[1..MaxTronsoane] of TipulDeBaza;
A: Array[1..3, 1..MaxNrPasi+2] of Real;
  {campul 1: -reprezinta A
  {campul 2: -reprezinta A'
  {campul 3: -A[3, i] reprezinta diametrul segmentului la pasul i}
Rotire: Array[1..MaxNrPasi+2] of Real;
G: Array[1..10, 1..2] of Real;
  {campul 1: -G[i, 1] reprezinta numarul de pasi pe tronsonul i
  {campul 2: -G[i, 2] reprezinta incrementul de calcul pe tronsonul i}

F: Array[1..MaxNrPasi+2] of Real;
InfoA: Record
  Amax: Real;
  pas: Integer;
  Lungime: Real;
End;
InfoB: Boolean;
DrawFile: Record
  Name: String[8+4];
  Fis: Text;
  Done: Boolean;
  End;
WorkFile: String;

Procedure Afiseaza(i: Byte; show: Boolean; Var f: Text); Forward;
Procedure IntrDate(Nr: Byte); Forward;
Procedure Calculeaza(Nr: Byte; yn: Boolean); Forward;
Procedure Calculeaza_A_Max(Nr: Byte; yn: Boolean); Forward;
Procedure Calcul_Specific(Cod: Integer; Nr: Byte); Forward;
Procedure Modificare; Forward;
Procedure Calc(i: Byte; yn: Boolean); Forward;
Procedure EnoarePisier(cod: Byte); Forward;
Procedure StocareElement(Nr: Byte); Forward;
Procedure Afisare_Grafic(yn: Boolean); Forward;
Procedure Initializare; Forward;
```

```
Function Se poate_desena:Boolean;Forward;
Function GetPasi:Integer;Forward;
```

```
{Partea de program propriu-zisa }
```

```
Function GetPasi;
Var pasi,i:Integer;
Begin
pasi:=0;
For i:=1 To NrElem Do
  Inc(pasi,Matrice[i].PasF-Matrice[i].PasI);
GetPasi:=pasi;
End;
```

```
Procedure Tabel(i:Byte);
Begin
End;
```

```
Procedure Calculeaza;
Label Corespunde_504;
Var i,OZN_11,Dela:Integer;
    dx,Foia:Real;
Begin
OZN_11:=1;
Dx:=Matrice[Nr].IncCalcul;
G[Nr,1]:=Matrice[Nr].PasF-Matrice[Nr].PasI;
G[Nr,2]:=Dx;
ClrScr;
Corespunde_504: {Label}
If yn Then Begin
  GotoXy(35,10);
  Writeln('Calculez ...');
  End;
Park;
Dela:=Matrice[Nr].PasI;
If Nr=1 Then Inc(Dela);
```

```
For i:=Dela To Matrice[Nr].PasF Do
  Begin
```

```
  If OZN_11*i=3 Then Begin
    A[2,1]:=A[2,2];
    i:=0;
    OZN_11:=0;
    Goto Corespunde_504;
  End;
```

```
  If yn Then Begin
    GotoXy(1,1);
    Writeln('==> ',MaxNrPasi-i:6);
  End;
```

```
  a[1, i + 1] := a[1, I] + dx * a[2, I];
  a[1, i + 2] := (2 * dx * f[I]) * a[1, i + 1] - (1 - dx * f[I] + dx * dx * NrUnda * NrUnd
  a[2, i + 1] := (a[1, I + 2] - a[1, i + 1]) / dx;
  {
  foia:= e * pi * a(2, i + 1) * a(2, i + 1) * a(3, i + 1) - 4
  End,
End;
```

```
Procedure IntrDate(Nr:Byte);
```

```
Var NumarPasi:Integer;
```

```
Procedure Cati_Pasi;
```

```

Begin
ClrScr;
Write('Introduceti numarul de pasi pe tronsonul ales (<',1000-GetPasi,') : ');
Readln(NumarPasi);
Matrice[Nr].PasF:=Matrice[Nr].PasI+NumarPasi;
If Matrice[Nr].PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
End;

Var l Real;
Begin
ClrScr;
If Nr >MaxTronsoane Then Begin
ClrScr;
WriteLn('Numarul de tronsoane maxim este ',
MaxTronsoane);
Wait;
Exit;
End;

If Nr>1 Then Matrice[Nr].PasI:=Matrice[Nr-1].PasF
Else Matrice[Nr].PasI:=0;
WriteLn('Introducerea datelor pentru tronsonul nr. ',Nr, ' :');
With Matrice[Nr] do
Begin
{Introducere lui :Frecventa , ModElast , VitSunet}
Input(10,2,'Frecventa de rezonanta (f, [kHz]): ',Frecventa);
Frecventa:=1000*Frecventa;

Input(10,3,'Viteza sunetului in materialul ghidului (c, [m/s]): ',VitSunet);

Input(10,4,'Modulul de elasticitate (E, [N/m2): ',ModElast);

Input(10,5,'Incrementul de calcul (dx, [mm]): ',IncCalcul);
IncCalcul:=IncCalcul/1000;

Input(10,6,'Diametrul inițial (D2, [mm]): ',Diam1);
Diam1:=Diam1/1000;

NrOnda:=2*Pi*Frecventa/VitSunet;
l:=0;
NumarPasiRamasi:=MaxNrPasi-PasI;
WriteLn('Numarul de pasi de calcul : ',NumarPasiRamasi);
Wait;

Case Menu('Selectati forma ghidului',MenSec) of
tp_cil:Begin
Tip:=tp_cil;
Cal_i_Pasi;
End;

tp_con:Begin
ClrScr;
Tip:=tp_con;

Write('Diametrul final/Lungime [mm] = ');
Read(D2);
GotoXY(WhereX+1,WhereY);
Write(' / ');
Read(l);
l:=l/1000;
D2:=D2/1000;
tgAlfa:=(D2-Diam1) / (2*l);
Write('Alfa = ',ArcTan(tgAlfa)*180/Pi,'grd. ');
Alfa:=2*LgAlfa/Diam1;
NumarPasi:=Round(Int(l/(IncCalcul)));

```

```
        PasF:=PasI+NumarPasi;
        If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;

        End;

tp_exp:Begin
    ClrScr;
    Tip:=tp_exp;

    Write('Diametrul final/Lungime [mm] = ');
    Read(Diam2);
    GotoXy(WhereX+1,WhereY);
    Write(' / ');
    Read(l);
    l:=l/ 1000;
    Diam2:=Diam2/1000;
    NumarPasi:=Round(Int(l/IncCalcul));
    Beta:=ln(Diam2/Diam1)/(-1);
    Write('Beta = ',Beta);
    PasF:=PasI+NumarPasi;
    If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
    End;

tp_rac:Begin
    ClrScr;
    Tip:=tp_rac;
    Input(10,10,'Raza profilului [mm] : ',RazaProf);
    RazaProf:=RazaProf/1000;
    NumarPasi:=Abs(Round(RazaProf/(IncCalcul)));
    PasF:=PasI+NumarPasi;
    End;

End;
End;
Calcul Specific(Matrice[Nr].Tip*1000,Nr);
Calcul(1, True);
End;

Procedure Calcul_Specific;
Var i:Integer;
    dg 1:Real;
    R:Real;
Begin
Dg:=Matrice[Nr].Diam1;
With Matrice[Nr] Do
    If PasI=0 Then
        A[2,PasI+1]:=A[2,PasI+1] * A[3,PasI] * A[3,PasI] / Dg / Dg;

With Matrice[Nr] DO
Case cod of

1000:For i:=PasI+1 to PasF+1 do
    Begin
        F[i]:=0;
        A[3,i]:=Dg;
    End;

2000:Begin
    l:=0;
    If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
    For j:=PasI + 1 To PasF +1 Do
        Begin
            l:=l+IncCalcul;
            F[j]:=2*Alfa/(1-Alfa*l);
```

```

    A[3, i] := Diam1 + 2 * l * tgAlfa;
  End;
End;

3000:Begin
  l := 0;
  If PasF > MaxNrPasi Then Eroare;
  For i := PasI + 1 To PasF + 1 Do
    Begin
      F[i] := -2 * Beta;
      l := l + IncCalcul;
      A[3, i] := Dg * Exp(-beta * l);
    End;
  End;

4000:Begin
  l := 0;
  If PasI = 0 Then A[2, PasI + 1] := 0;
  R := Abs(RazaProf);
  i := PasI;
  While (l < Abs(RazaProf)) and (i < MaxNrPasi) Do
    Begin
      l := l + IncCalcul;
      Inc(i);
      If RazaProf < 0 Then
        If Abs(RazaProf) > 1 Then
          Begin
            F[i] := 4 * (1 - R) / (Diam1 - 2 * Sqrt(1 * (2 * R - 1))) / Sqrt(1 * (2 * R - 1));
            A[3, i] := Diam1 - 2 * Sqrt(1 * (2 * R - 1));
          End;
        If RazaProf >= 0 Then
          If Abs(RazaProf) > 1 Then
            Begin
              F[i] := 4 * l / (Diam1 + 2 * R - 2 * Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(1))) / Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(1));
              A[3, i] := Diam1 + 2 * R - 2 * Sqrt(Sqr(Abs(R)) - Sqr(1));
            End;
          End;
      End;
      A[3, i + 1] := A[3, i];
    End;
  End;
End;
End;
End;

Procedure Rearanjare(ElStart:Byte);
Var i:Byte;
    NrPasi:Integer;
Begin
  For i := ElStart To NrElem Do
    Begin
      NrPasi := Matrice[i].PasF - Matrice[i].PasI;
      Matrice[i].PasI := Matrice[i - 1].PasF;
      Matrice[i].PasF := Matrice[i].PasI + NrPasi;
    End;
  End;
End;

Procedure ...
...

Var pi, pf, NumarPasi:Integer;

Procedure Cati_Pasi;
Begin
  ClrScr;
  Write('Introduceti numarul de pasi pe tronsonul ales (<'1000-GetPasi,'): ');
  Readln(NumarPasi);

```

```

PF:=Pi*NumarPasi;
If Pf>MaxNrPasi Then Eroare;
End;

```

Const

```

PrevMenu:MenType=(Name:'Modific tronsonul ';Active:True),
(Name:'Sterg tronsonul ';Active:True),
(Name:'Numarul tronsonului';Active:True),
(Name:'eXit ';Active:True),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False));

Comp:MenType=(Name:'Diametrul intrari ';Active:True),
(Name:'Viteza sunetului ';Active:True),
(Name:'Precventa de rez. ';Active:True),
(Name:'Modulul de elasticitate';Active:True),
(Name:'Incrementul de calcul ';Active:True),
(Name:'Tipul (forma) ghidului ';Active:True),
(Name:'eXit ';Active:True));

Camp Tip:MenType=(Name:'Tipul cilindric ';Active:True),
(Name:'Tipul conic ';Active:True),
(Name:'Tipul exponential';Active:True),
(Name:'Tipul racordare ';Active:True),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False),
(Name:'';Active:False));

```

Var Nr:Integer;

```

Procedure ModifPas(q:Byte);
Begin
NumarPasi:=Matrice[q].PasF-Matrice[q].PasI;
If Nr>1 Then Matrice[q].PasI:=Matrice[q-1].PasF Else
Matrice[q].PasI:=0;
Matrice[q].PasF:=Matrice[q].PasI+NumarPasi;
End;

```

Const Coduri:Array[1..4] OF Word=(1000,2000,3000,4000);

Var s:String;

```

i:Integer;
ok:Boolean;
l:Real;
trans:TipulDeBaza;

```

Begin

Nr:=NrElem;

ok:=False;

Repeat

Str(Nr,s);

Case Menu('Tronsonul '+s,PrevMenu) OF

1:ok:=True;

2:Begin

ClrScr;

WriteLn('Elimin elementul nr ',Nr);

For i:=Nr To NrElem-1 DO

Begin

Matrice[i]:=Matrice[i+1];

{ModifPas(i);}

End;

Rearanjare(1);

Dec(NrElem);

Nr:=NrElem;

```
For i:=1 To NrElem Do
    Begin
        Calcul_Specific(Matrice[i].Tip*1000,i);
        Calc(i,False);
    End;

End;

3:Repeat
    ClrScr;
    Write('Introduceti numarul tronsonului de modificat (<',MaxTronsoane,'): ');
    Readln(Nr);
    If Nr>MaxTronsoane Then Begin
        Writeln('Prea mare');
        Wait;
    End;
    Until Nr<=MaxTronsoane;
4:Exit
End;
Until ok;
Str(Nr,s);
NumarPasi:=Matrice[Nr].PasF-Matrice[Nr].PasI;
If Nr>1 Then pi:=Matrice[Nr-1].PasF Else pi:=0;
Matrice[Nr].PasI:=pi;
Matrice[Nr].PasF:=pi+NumarPasi;
ok:=False;
Repeat
With Matrice[Nr] Do
Case Menu('Selectati campul de modificat pentru tronsonul '+s,Campuri) Of

1:Begin
    Input(5,3,Campuri[1].Name+' :',Diam1);
    Diam1:=Diam1/1000;
    End;
2:Input(5,3,Campuri[2].Name+' :',VitSunet);
3:Begin
    Input(5,3,Campuri[3].Name+' :',Frecventa);
    Frecventa:=1000*Frecventa;
    End;
4:Input(5,3,Campuri[4].Name+' :',ModElast);
5:Begin
    Input(5,3,Campuri[5].Name+' :',IncCalcul);
    IncCalcul:=IncCalcul/1000;
    End;
6:Case Menu('Selectati tipul ghidului',Camp_Tip) Of
    tp_cil:Begin
        Tip:=tp_cil;
        Cati_Pasi;
        PasF:=pf;
        End;

    tp_con:Begin
        ClrScr;
        Tip:=tp_con;

        Write('D2/x [mm] = ');
        Read(D2);
        GotoXy(WhereX+1,WhereY);
        Write(' / ');
        Read(l);
        l:=l/1000;
        D2:=D2/1000;
        tgAlfa:=(D2-Diam1) / 2;
        Write('Alfa = ',ArcTan(tgAlfa)*180/Pi,' grd. ');
        NumarPasi:=Round(Int(l/(IncCalcul)));
```



```

PasF:=PasI+NumarPasi;
If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;

End;

tp_exp:Begin
ClrScr;
Tip:=tp_exp;

Write('D2/x [mm] = ');
Read(Diam2);
GotoXy(WhereX+1,WhereY);
Write(' / ');
Read(l);
l:=l/ 1000;
Diam2:=Diam2/1000;
NumarPasi:=Round(Int(l/IncCalcul));
Beta:=ln(Diam2/Diam1)/(-1);
Write('Beta = ',Beta,' grd. ');
PasF:=PasI+NumarPasi;
If PasF>MaxNrPasi Then Eroare;
End;

tp_rac:Begin
ClrScr;
Tip:=tp_rac;
Input(10,10,'Raza profilului [mm] : ',RazaProf);
RazaProf:=RazaProf/1000;
NumarPasi:=Abs(Round(RazaProf/(IncCalcul)));
PasF:=PasI+NumarPasi;
End;

End;
7:ok:=True;
End;
Until ok:
{
For i:=Matrice[Nr].PasI+1 To Matrice[Nr].PasF Do
Begin
A[1,i]:=0;
A[2,i]:=0;
A[3,i]:=0;
F[i]:=0;
End;
}
G[Nr,1]:=0;
G[Nr,2]:=0;
Rearanjare(Nr);
For i:=Nr To NrElem Do
Begin
Calcul_Specific(Coduri[Matrice[i].Tip],i);
Calc(i,False);
End;
End;
End;

```

```

Procedure Afiseaza(i:Byte;show:Boolean; Var f:Text);

```

```

    Procedure Writeln(S:String;Rez:Real;T:String);
    Begin
    Writeln(f,s,Rez:Intregi:Zecimala,' ',T);
    End;

```

```

Begin
If Not Matrice[i].calculat Then Exit;
ClrScr;

Writeln(f,'DATELE TRONSONULUI NR. ',i);
Writeln(f);
Writeln(f,'TIPUL TRONSONULUI : ',MenSec[Matrice[i].Tip].Name);
Writeln(f);

With Matrice[i] do
Begin
Writeln('Viteza sunetului in materialul ghidului : ',VitSunet,'m/s');

Writeln('Frecventa de rezonanta : ',Frecventa,'Hz');

Writeln('Modulul de elasticitate : ',ModElast,'N/m²');

Writeln('Incrementul de calcul : ',Milim(IncCalcul),'mm');

Writeln('Diametrul initial : ',Milim(Diam1),'mm');

Writeln(f,'Pasul initial : ',PasI,'');

Writeln(f,'Pasul final : ',PasF,'');

Writeln('lungimea tronsonului : ',(PasF-PasI)*Milim(IncCalcul),'mm'

Case Tip of
tp_cil:;
tp_con:Begin
Writeln('Alfa : ',Alfa,'grd. ');
Writeln('Diametrul final : ',Milim(D2),'mm');
End;
tp_exp:Begin
Writeln('Constanta beta : ',Beta,'');
Writeln('Diametrul final : ',Milim(Diam2),'mm');
End;
tp_rac:
Writeln('Raza profilului : ',Milim(RazaProf),'mm');
End;
End;
If show Then
Begin
Park;
Wait;
End
End;

Procedure ChangePrecizia;
Begin
ClrScr;
Writeln('In acest moment ptr.: -partea intreaga :',Intregi);
Writeln(' -partea zecimala :',Zecimala);
Writeln;
Write('Introduceti precizia de afisare a partii intregi :');Readln(Intregi);
Write('Introduceti precizia de afisare a partii zecimale :');Readln(Zecimala);
End;

Procedure Calculeaza_A_Max;
Var {Numai OZN - uri}
dx,x,b,yx,der,nd,dd,y,bb,yy:Real;
j,i:Integer;

```

```
s:=s+'.dat';
{$I+}
Assign(f,s);
Rewrite(f);
If IOResult<>0 Then Begin
    Writeln('Eroare la creerea fisierului');
    Wait;
    {$I+}
    Goto AskMe;
End
Else Begin
    Writeln(f,'DATELE REFERITOARE LA TRONSOANELE FISIERULUI "',WorkF
    For i:=1 To 3 Do
        Writeln(f);
    For i:=1 To NrElem Do
        Begin
            Afiseaza(i,Elem,i);
            Writeln(f);
            Writeln(f);
        end;
        Close(f);
    End;
    {$I+}
End;
5-ok:=True;
End;
Until ok;
End;

Var i:Byte;
    ok:Boolean;

Procedure Initializare;
Var i:Byte;
Begin
    Se Poate_Afisa:=False;
    NrElem:=0;
    PasulInitial:=0;
    PasulFinal:=0;
    ok:=False;
    optim:=False;
    A[1,1]:=1;
    A[2,1]:=0;
    InfoB:=False;
    WorkFile:='';
    DrawFile.Name:='';
    DrawFile.Done:=False;
    For i:=1 To MaxTronsoane Do Matrice[i].PasI:=0;
End;

Procedure Prezentare;
Begin
    ClrScr;
    Gotoxy(2,5);
    Writeln('PROGRAM DE CALCUL AL CONCENTRATORILOR AMPLIFICATORI DE UNDE');
    Gotoxy(50,15);
    Writeln('De Brostean Marian L. ');
    Gotoxy(1,20);
    Writeln('ATENIE ! Pentru a obtine graficul la imprimanta este necesar programul ');
    Writeln('<AUTOCAD>;cu instructiunea "SCRIPT"+Space+Numele_fisierului se va vizua-');
    Writeln('liza graficul facut cu acest program !');
    Wait;
```

End;

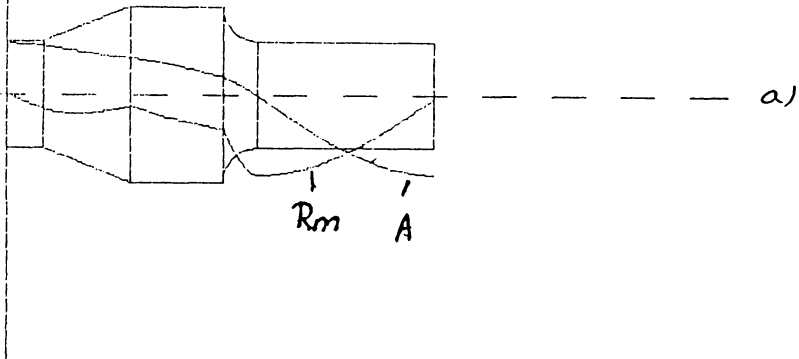
-217-

```
Begin
ClrScr;
Prezentare;
Initializare;
Repeat
MenPrinc[6].Active:=Se_poate_desena;
Case Meniu('Meniul principal',MenPrinc) of
2:Begin
  Inc(NrElem);
  IntrDate(NrElem);
  End;
3:Begin
  ClrScr;
  Write('Introduceti numarul tronsonului ');
  Readln(i);
  Afiseaza(i,True,OutPut);
  End;
4:Modificare;
1:MFile(true);
5:Optiuni;
6:Afisare_Grafic(False);
7:ok:=True;
End;
Until ok;
ClrScr;
MFile(False);
End;
End;
```

```
Begin
ClrScr;
Prezentare;
Initializare;
Repeat
MenPrinc[6].Active:=Se_poate_desena;
Case Meniu('Meniul principal',MenPrinc) of
2:Begin
  Inc(NrElem);
  IntrDate(NrElem);
  End;
3:Begin
  ClrScr;
  Write('Introduceti numarul tronsonului ');
  Readln(i);
  Afiseaza(i,True,OutPut);
  End;
4:Modificare;
1:MFile(true);
5:Optiuni;
6:Afisare_Grafic(False);
7:ok:=True;
End;
Until ok;
ClrScr;
MFile(False);
End;
End;
```

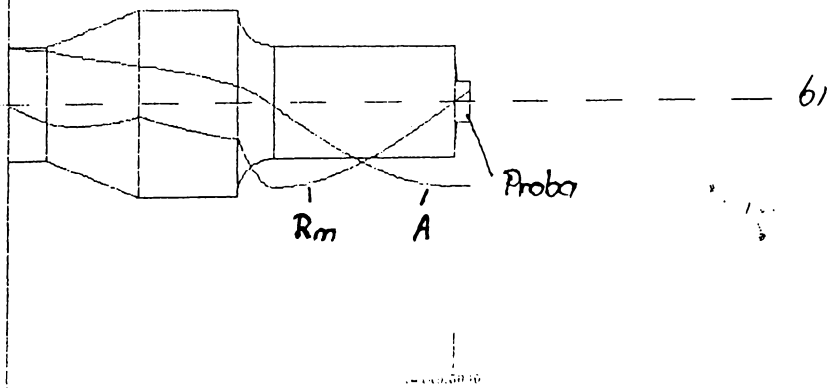
```
Begin
ClrScr;
Prezentare;
Initializare;
```

Tronsonul 1 = 18.5000 mm
Tronsonul 2 = 43.0000 mm
Tronsonul 3 = 78.0000 mm
Tronsonul 4 = 88.5000 mm
Tronsonul 5 = 151.5000 mm



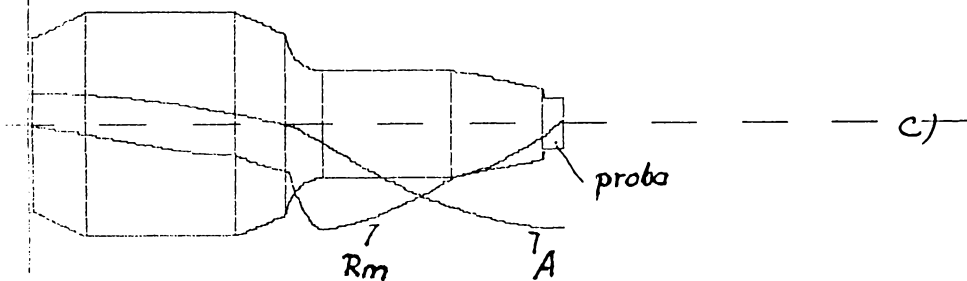
Tronsonul 1 = 18.5000 mm
Tronsonul 2 = 43.0000 mm
Tronsonul 3 = 78.0000 mm
Tronsonul 4 = 88.5000 mm
Tronsonul 5 = 149.5000 mm

Tronsonul 6 = 154.5000 mm



Tronçonul 1 = 1.0000 mm
Tronçonul 2 = 15.0000 mm
Tronçonul 3 = 33.0000 mm
Tronçonul 4 = 69.0000 mm
Tronçonul 5 = 70.0000 mm

Tronçonul 6 = 114.0000 mm
Tronçonul 7 = 130.0000 mm
Tronçonul 8 = 143.0000 mm



1=144.6000