

# **CERCETĂRI ASUPRA EROZIUNII PRODUSE PRIN CAVITAȚIE VIBRATORIE LA OȚELURILE INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT ÎN CROM ȘI VARIABIL ÎN NICHEL**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea "Politehnica" din Timișoara  
în domeniul INGINERIE MECANICĂ  
de către

**JURCHELA ALIN DAN**

Conducători științifici: prof.univ.dr.ing. ILARE BORDEAȘU  
prof.univ.dr.ing. ION MITELEA  
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Anton HADĂR  
prof.univ.dr.ing. Viorel C. CÂMPEAN  
conf.univ.dr.ing. Mircea BĂRGLĂZAN

Ziua susținerii tezei: 02.11.2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |                        |   |
|------------------------|---|
| 1. Automatică          | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie              | 8. Inginerie Industrială                    |
| 3. Energetică          | 9. Inginerie Mecanică                       |
| 4. Ingineria Chimică   | 10. Știința Calculatoarelor                 |
| 5. Inginerie Civilă    | 11. Știința și Ingineria Materialelor       |
| 6. Inginerie Electrică |   |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Distrugerea materialelor prin eroziune cavitațională continuă să rămână o permanentă preocupare a oamenilor de știință și mai ales a producătorilor de echipamente hidromecanice, nave maritime și fluviale, datorită modificărilor aduse geometriei organelor aflate în contact cu fluidul cavitant, cu implicație asupra performanțelor și duratei de exploatare a echipamentului. Găsirea unor soluții tehnologice, de creștere a duratei de viață a componentelor acestor mașini, în special ale turbinelor hidraulice, ce funcționează în regim de cavitație, a obligat cercetătorii să-și orienteze studiile spre analiza materialelor din punct de vedere al rezistenței la distrugere prin eroziunea cavitației și al fenomenelor ce se produc în structura materialului.

Acest fenomen este adânc studiat în Universitatea Politehnică din Timisoara, de peste 60 de ani, a făcut obiectul multor contracte de cercetare și teze de doctorat. Prezenta lucrare, prin obiectivele sale, este o continuare a cercetărilor din cadrul Colectivului de Cavitație al Universității Politehnică din Timișoara și duce mai departe, munca tuturor celor care s-au dăruit cercetării acestui fenomen și au constatat că domeniul eroziunii cavitaționale este unul enigmatic, greu de stăpânit și cunoscut.

Lucrarea de doctorat, prin obiectivele sale, este o continuare a cercetărilor din cadrul Colectivului de Cavitație al Universității Politehnică din Timișoara. Prin rezultatele conținute este de actualitate și în pas cu noile orientări ale specialiștilor din domeniu mașinilor hidraulice și anume: realizarea de noi oțeluri inoxidabile cu rezistențe sporite la cavitație; studierea morfologiei deteriorărilor produse prin eroziunea cavitației și stabilirea unor metode de ierarhizare după rezistența opusă atacului eroziv al cavitației.

Pentru realizarea obiectivelor propuse, cercetările au fost efectuate în conformitate cu normele ASTM G32-2010, iar ca materiale de comparație s-a utilizat 41Cr4 (oțelul etalon pentru aparatele vibratorii din Laboratorul de cavitație al U.P. Timișoara) și OH12NDL (oțelul de referință pentru turbinele hidraulice din centralele hidroelectrice din România).

În analiza morfologiei degradărilor produse de eroziunea cavitației și a modului de răspuns dat de constituenții structurali ai oțelurilor cercetate, indicații prețioase am primit de la dl. prof. dr. ing. Ion MITELEA de la Colectivul de Știința Materialelor și a Sudării.

Sfaturile și sprijinul neconținut oferit pe întreaga perioadă de elaborare a tezei de dl. prof. dr. ing. Mircea Octavian POPOVICIU de la Colectivul de Mașini Hidraulice m-au făcut să înțeleg complexitatea fenomenului de eroziune prin cavitație și să am încredere în ceea ce fac.

De asemenea, un ajutor prețios în finalizarea acestei lucrări, prin sfaturi pertinente și profesionale, am primit de la dl. prof. dr. ing. Mircea Bărglăzan.

Însă, cel mai mare merit în formarea mea ca cercetător, în gândirea întregii teze și finalizarea ei îl are conducătorul dl. prof. dr. ing. ILARE BORDEAȘU.

Tuturor le mulțumesc și le rămân profund recunoscător.

Mulțumesc colegilor din Colectivul de Cavitație și tuturor celor care au fost alături de mine în aceasta perioadă.

Sper ca această lucrare sa fie de un real folos cercetărilor din domeniul mașinilor hidraulice și industriei producătoare și exploatare de echipamente hidromecanice.

Timișoara, noiembrie 2012

Ing. Alin Dan Jurchela

JURCHELA ALIN DAN

**Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil în nichel**

Teze de doctorat ale UPT, **Seria X, Nr. YY**, Editura Politehnica, 2012, 164 pagini, 203 figuri, 17 tabele.

Cuvinte cheie: oțel inoxidabil, eroziune cavitațională, adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, rezistența la cavitație, rezistența normalizată la cavitație

**Rezumat:**

Lucrarea de doctorat, prin obiectivele sale, este o continuare a cercetărilor din cadrul Colectivului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara. Prin rezultatele conținute este de actualitate și în pas cu noile orientări ale specialiștilor din domeniu mașinilor hidraulice și anume: realizarea de noi oțeluri inoxidabile cu rezistențe sporite la cavitație; studierea morfologiei deteriorărilor produse prin eroziunea cavitației și stabilirea unor metode de ierarhizare după rezistența opusă atacului eroziv al cavitației

# CUPRINS

<b>1. STADIUL ACTUAL AL INVESTIGAȚIILOR EROZIUNII CAVITAȚIONALE A OȚELURILOR DESTINATE MAȘINILOR HIDRAULICE .....</b>	<b>10</b>
1.1.    INVESTIGAȚII ALE EROZIUNII OȚELURILOR LA TURBINELE HIDRAULICE .....	10
1.2.    INVESTIGAȚII ALE EROZIUNII OȚELURILOR FOLOSITE LA POMPE.....	11
1.3.    INVESTIGAȚII ALE EROZIUNII OȚELURILOR FOLOSITE LA ELICELE NAVALE.....	12
1.4.    INVESTIGAȚII ALE EROZIUNII CAVITAȚIONALE ÎN LABORATOR.....	13
1.4.1. <i>Obiective urmărite prin investigarea eroziunii cavitaționale în laborator.....</i>	<i>14</i>
1.4.2. <i>Standuri și aparate utilizate.....</i>	<i>16</i>
1.4.3. <i>Metode de evaluarea a comportării materialelor la eroziunea cavitațională.....</i>	<i>20</i>
1.5.    EVALUAREA CERCETĂRILOR DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ A OȚELURILOR INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT DE CROM .....	22
1.5.1. <i>Rezultate experimentale obținute în laboratoare de cercetare.....</i>	<i>23</i>
1.6.    CONCLUZII .....	29
1.7.    OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT .....	30
<b>2. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A UNEI GAME DE OȚELURI INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT DE CROM ȘI VARIABIL DE NICHEL .....</b>	<b>31</b>
2.1.    CONSIDERAȚII PRIVIND OȚELURILE CERCETATE.....	31
2.1.1. <i>Procedura de elaborare.....</i>	<i>32</i>
2.1.2. <i>Caracteristicile tehnice ale cuptorului EMO 1200 R .....</i>	<i>33</i>
2.1.3. <i>Descrierea procesului tehnologic.....</i>	<i>34</i>
2.2.    METODICA ȘI APARATURA UTILIZATĂ .....	43
2.2.1. <i>Aparatura și metoda de testare la cavitație .....</i>	<i>43</i>
2.2.2. <i>Aparate și metode de investigare a structurii erodate prin cavitație.....</i>	<i>49</i>
2.3.    REZULTATE EXPERIMENTALE .....	52
2.3.1. <i>Curbe caracteristice. Model analitic .....</i>	<i>52</i>
2.3.2. <i>Oțelurile testate pe aparatul vibrator magnetostrictiv T1.....</i>	<i>56</i>
2.3.3. <i>Oțelurile testate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2:.....</i>	<i>66</i>
2.3.4. <i>Prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale .....</i>	<i>69</i>
2.3.5. <i>Parametrii caracteristici evaluării rezistenței oțelurilor la eroziunea cavitației.....</i>	<i>76</i>
2.3.6. <i>Compararea rezultatelor experimentale .....</i>	<i>83</i>
2.4.    INVESTIGAȚII METALOGRAFICE .....	90
2.5.    ASPECTE ALE MICROSTRUCTURII ERODATE. FENOMENOLOGIA DEGRADĂRILOR PRIN CAVITAȚIE.....	91
2.6.    ANALIZA REZULTATELOR EXPERIMENTALE PE BAZA CONSTITUȚIEI CHIMICE, STRUCTURALE ȘI A PROPRIETĂȚILOR MECANICE .....	116
2.6.1. <i>Influența compoziției chimice asupra rezistenței la cavitație .....</i>	<i>116</i>
2.6.2. <i>Influența constituenților microstructurali asupra rezistenței la cavitație a oțelurilor cercetate .....</i>	<i>120</i>
2.6.3. <i>Influența proprietăților mecanice asupra comportării la cavitație.....</i>	<i>123</i>
2.7.    CONCLUZII .....	129

<b>3. PROPUNERE DE MODEL DE IERARHIZARE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPĂ REZISTENȚA NORMALIZATĂ LA CAVITAȚIE .....</b>	<b>131</b>
3.1. INTRODUCERE.....	131
3.2. MODELE ȘI METODE SEMNIFICATIVE DE EVALUARE ȘI IERARHIZARE DUPĂ REZISTENȚA LA EROZIUNEA CAVITAȚIEI .....	131
3.2.1. Modelul Heymann .....	132
3.2.2. Modelul Berchiche .....	134
3.2.3. Modelul Rao .....	136
3.2.4. Modelul Thiruvengadam .....	137
3.2.5. Modelul Knapp.....	138
3.2.6. Modelul Frank.....	138
3.3. METODA PROPUȘĂ .....	139
3.3.1. Prezentarea metodei .....	139
3.3.2. Definirea domeniilor de rezistență la cavitație.....	143
3.3.3. Ierarhizarea oțelurilor inoxidabile cercetate în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara .....	144
3.3.4. Corelarea parametrilor specifici eroziunii cavitaționale cu compoziția chimică și structura microscopică.....	145
3.3.5. Corelarea parametrului $R_{ns}$ cu proprietățile mecanice.....	146
3.4. CONCLUZII .....	147
<b>4. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE.....</b>	<b>149</b>
<b>5. PERSPECTIVE .....</b>	<b>152</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>157</b>

## INTRODUCERE

Eroziunea cavitațională este prezentă aproape în toate domeniile unde fluidele sunt în mișcare. Acest fenomen ia naștere prin transmiterea unor forțe generate de implozia repetată a unor bule de vapori, formate în zonele în care presiunea fluidului scade sub o anumită valoare critică.

Din rapoartele de cercetare și studiile efectuate pe această temă se poate constata că cele mai afectate sunt: turbinele hidraulice, pompele și elicele navale.

Condițiile hidrodinamice de exploatare a mașinilor hidraulice, în speță a turbinelor și pompelor, tot mai intense din punct de vedere cavitațional, au impus crearea de noi oțeluri inoxidabile, care să confere paletelor și rotoarelor o durată de viață cât mai mare posibil.

Oțelurile inoxidabile cu conținuturi bine corelate de Cr și Ni, cunoscute ca având o rezistență crescută la eroziunea cavitațională, au dus la utilizarea acestora pe o scară largă în fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice.

Acest fenomen este studiat în toate țările care posedă centrale hidroelectrice și/sau sunt exploatoarele de nave maritime și fluviale. Din țările cu tradiție în cercetarea și elaborarea unor materiale cu rezistență la eroziunea cavitațională, amintim: S.U.A, Japonia, Rusia, Suedia, Germania, Cehia, China, Franța, Polonia și India.

În laboratoare, cercetarea distrugerii prin eroziune cavitațională se face cu aparate vibratorii ultrasonice, tunele hidrodinamice sau aparate cu disc rotitor. Deși tunelele hidrodinamice redau cel mai bine curgerea cavitațională, datorită costurilor ridicate și timpului îndelungat de studiu, pentru cercetarea rezistenței și comportării materialului la degradarea prin cavitație se folosesc aparatele vibratorii, datorită, în primul rând, a duratei foarte scurte de producere a eroziunii, chiar dacă fenomenul generat este complet diferit de cel din mașina hidraulică.

Laboratoarele de astăzi utilizează aparatură modernă, cum este microscopul electronic cu baleiaj, care permite studierea materialului până la nivelul de rețea și plan metalografic. Cu ajutorul mijloacelor de analiză microstructurală, se pot oferi noi date despre eroziunea cavitațională, dar și despre transformările microstructurale pe care le suportă materialul în timpul atacului cavitațional.

Ca urmare a potențialului hidroenergetic și tradiției în construcția de echipamente hidromecanice și de nave maritime și fluviale, în România, în ultimii 60 de ani s-au dezvoltat ample studii de cercetare a eroziunii cavitaționale. Cele mai însemnate contribuții au fost aduse de către: Centrele de Cercetare-Proiectare al U.C.M. Reșița, ICEPRONAV Galați, U.P. Timișoara, U.P. București, Universitatea Dunărea de Jos din Galați, U.T Gh. Asachi din Iași și Universitatea Eftimie Murgu din Reșița.

Majoritatea eforturilor sunt concentrate spre găsirea de noi materiale, în special de oțeluri inoxidabile destinate mașinilor hidraulice, care să conducă la creșterea duratei de exploatare în regim de cavitație. În acest scop se generează tot mai multe materiale cu diverse structuri, obținute printr-un control adecvat al principalelor elemente chimice definitorii și se fac investigații de stabilire a influenței factorilor ce caracterizează materialul (proprietăți fizico-mecanice, structură, tehnologie de elaborare și prelucrare, etc) asupra rezistenței/comportării la cavitație. Însă, din studiile bibliografice, realizate în cadrul programului de doctorat, am constatat că majoritatea studiilor sunt raportate la comparații între materiale, după rezistența la eroziune cavitațională [5], [6], [7], [8], [78], [79],



[112], fără a urmării influența, modificarea acesteia la schimbarea raportului dintre constituenții microstructurali, prin variația, controlată, a principalelor elemente chimice constitutive .

În cadrul lucrării sunt cercetate la cavitație opt tipuri de oțel inoxidabil cu conținuturi constante de crom și variabile de nichel și conținuturi de carbon de  $\cong 0,1$  %, respectiv 0,036 %. Cercetările realizate au drept scop punerea în evidență a efectului produs de variația conținutului de nichel asupra rezistenței la cavitație și a comportamentului oțelului în timpul atacului distructiv ca urmare a modificărilor microstructurale constitutive, conform diagramei Schäßler, și al valorilor caracteristicilor mecanice. Totodată s-a construit un model de ierarhizare, după rezistența la cavitație, a oțelurilor inoxidabile, folosite în fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice și cercetate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara.

# 1. Stadiul actual al investigațiilor eroziunii cavitaționale a oțelurilor destinate mașinilor hidraulice

Cercetările efectuate pe mașinile hidraulice și echipamentele hidromecanice au ca scop diminuarea distrugerilor prin eroziune cavitațională a organelor aflate în contact cu fluidul cavitant [1].

Cele mai multe studii de eroziune cavitațională se fac pe turbinele hidraulice, pompele și elicele navale, deoarece acestea sunt cele mai afectate de acest fenomen și implică costuri ridicate de fabricare și reabilitare [9].

## 1.1. Investigații ale eroziunii oțelurilor la turbinele hidraulice

Cercetările efectuate pe mai multe tipuri de turbine hidraulice, arată că orice material utilizat în confecționarea pieselor ce intră în componența traseului de curgere sunt supuse eroziunii cavitaționale.

Piesa care prezintă cea mai mare distrugere prin eroziune cavitațională după o funcționare de 20-30 mii ore la turbina hidraulică este rotorul. Distrugerea acestuia se realizează indiferent de materialul sau profilul paletelor folosite. În fig. 1.1 și 1.2 se dă pentru exemplificare câte un rotor de Francis și Kaplan distruse de eroziunea cavitațională [9], [2], [10], [30], [88], [31].



Fig. 1.1 Rotorul Francis distrus prin eroziune cavitațională, [55].



Fig. 1.2 Rotorul Kaplan distrus prin eroziune cavitațională, [56].

Cele mai însemnate distrugeri prin eroziune cavitațională sunt semnalate la rotoarele confecționate din oțeluri carbon și slab aliate. Pentru aceleași condiții de funcționare, oțelurile inoxidabile prezintă o rezistență superioară la eroziunea cavitațională.

Larga utilizare a oțelurilor inoxidabile cu conținuturi ridicate de crom și nichel se datorează rezistenței la coroziune și a proprietăților mecanice superioare care oferă o bună rezistență la eroziunea cavitațională.

În Tabelul 1.1 și 1.2 sunt prezentate materialele utilizate la fabricarea rotoarelor Francis și Kaplan și parametrii fundamentali ai turbinelor.

**Tabel 1.1.** Parametrii fundamentali ai turbinelor Francis [10].

CHE	Diametrul rotorului [m]	Puterea [MW]	Materialul
Dneprovsk	5,45	75	OL 25
Kneajegubsk	4,10	33	30L
Komsomolsk	3,0	21	30L
Niva II	2,5	15,3	25L
Ust-Kamenogorsk	5,45	85	25L
Mingeceaursk	4,1	61,5	30L
Buhtarminsk	4,1	77	1Cr18N9T
Niva III	2,95	38,5	25L
Baksansk	1,2	8,8	30L
Bratsk	5,5	230	OCr12NDL

**Tabel 1.2** Parametrii fundamentali ai turbinelor Kaplan [57].

CHE	Diametrul rotorului [m]	Puterea [MW]	Materialul
Porțile de Fier I	9,5	194	G-X5CrNi13.4
Zhiguli	9,3	115	18DGSL
Rîbinsk	9,0	65	1Cr13
Verhne-Svirsk	8,0	46	20Cr13NL
Nijne-Svirsk	7,42	27,5	20HNL
Timleausk	6,6	41,5	30L
Narva	6,6	48	1Cr18N9T
Borisoglebsk	5,0	29	20Cr13NL
Verhne-Tulomsk	4,2	58,7	20Cr13NL

Evaluarea volumului de material erodat, de pe o paletă de turbină, se realizează prin determinarea ariei distruse și adâncimii medii de pătrundere MDE [10]. Aria erodată cavitațional se împarte în arii elementare, se trasează profilogramele eroziunilor, se determină adâncimea medie pentru fiecare arie elementară și apoi se determină adâncimea medie de pătrundere pentru întreaga suprafață erodată.

Cunoașterea variației MDE(t) și a suprafețelor erodate servește la construirea curbelor de pierdere volumică V(t), care ajută la aproximarea termenelor de reparații capitale [2], [10].

## 1.2. Investigații ale eroziunii oțelurilor folosite la pompe

În funcție de domeniul de funcționare al pompelor în acestea pot apare regimuri de supercavitație, cavitație avansată, cavitație industrială și fără cavitație. Aproape toate pompele utilizate în industrie funcționează în regim de cavitație. Pompele care sunt folosite în industria alimentară trebuie să funcționeze complet în

afara cavitației, deoarece aici se interzice depunerea particulelor solide ce apar ca efect al eroziunii cavitaționale [2], [10].

În pompe, fenomenul de eroziune cavitațională apare, accentuat, la intrarea în rotor deoarece în secțiunea de aspirație curentul atinge presiuni minime egale cu presiunea de vaporizare. În unele situații condițiile de aspirație în pompă favorizează dezvoltarea cavitației ajungându-se chiar la supercavitație. Cele mai intense distrugerii cavitaționale au loc în rotoarele pompelor ce funcționează la turații ridicate ( $n > 5000 \text{ rot/min}$ ) [2], [57] fig. 1.3.



Fig. 1.3 Rotorul de pompă distrus prin eroziune cavitațională, [57].

Materialele din care sunt confecționate rotoarele pompelor sunt impuse de domeniul de funcționare și cerințe. Acestea pot fi: materiale ceramice, aluminiu, oțel inoxidabil, fontă, etc. Cele mai uzuale rotoare sunt confecționate din fontă cenușie cu grafit lamelar și foarte rar din fontă cu grafit nodular sau oțel inoxidabil [10].

În urma unor analize tehnico-economice efectuate de CEGB (Central Electricity Generating Board) asupra a numeroase stații de pompare și pompe au dus la definirea unor cerințe minime ce trebuie impuse unei pompe industriale și anume: viața rotorului trebuie să fie de cel puțin 45000 ore atunci când funcționează la debit optim, circa 80% din timpul de exploatare [2]. Ruperea paletelor se admite doar atunci când din paletă s-a dislocat material de pe o suprafață mai mare de  $1 \text{ cm}^2$  sau când înălțimea de pompare a scăzut față de cea normală cu 5% [2].

Deși oamenii de știință au fost preocupați în permanență de domeniul eroziunii cavitaționale în pompe, problemele legate de cantitatea de material erodat când funcționarea pompei se face în regim de cavitație nu au fost complet elucidate. Aceste dificultăți sunt legate de diversitatea lichidelor vehiculate prin pompe, a condițiilor de exploatare cât și a materialelor din care sunt confecționate rotoarele [10].

### **1.3. Investigații ale eroziunii oțelurilor folosite la elicele navale**

Primele observații de eroziune cavitațională s-au făcut asupra elicilor navale maritime de către italianul Bartello în anul 1875 [56].

Estimarea nivelului de distrugere cavitațională este foarte dificilă, deoarece elicele funcționează în curent neuniform și nestaționat [118].

Distrugerea prin eroziune cavitațională a elicelor navale depinde de mai mulți factori ce intervin în exploatare, ca: profilul paletei, forma geometrică a paletei, dimensiunea elicei, tonajul navei, tipul regimului de cavitație, etc. Datorită imposibilității evitării acestui fenomen, oamenii de știință caută crearea unor noi materiale sau tratamente care să le mărească durata de viață [10], [104].

În laboratoare studiile se fac prin măsurători și observații vizuale, utilizând elice confecționate din materiale ușor distructibile, cum a procedat și Van der Meulen [122], testând o elice de aluminiu supusă eroziunii timp de 40 de ore sau mai nou prin programe de simulare, acestea fiind și varianta mai economică. Cu toate că tehnologia a avansat mult, transpunerea rezultatelor din laborator pe elicea industrială este dificilă datorită efectului de scară nefinalizat [10].

Distrugerile elicelor navale provocate de cavitație pot fi însemnate sau mai puțin însemnate în funcție de modul de exploatare al navelor. Boje semnalează că distrugerile cele mai însemnate apar la elicele cargourilor și tancurilor petoliere de mare tonaj [9]. În Fig. 1.4 se prezintă o elice utilizată la propulsarea unui nave maritime și prezintă distrugereri prin eroziune cavitațională.



Fig. 1.4 Elice navală distrusă prin eroziune cavitațională, [58].

Materialele cu cele mai bune rezultate privind rezistența la eroziunea cavitațională sunt bronzurile navale, care au ca elemente de aliere Ni, Al

și Mn. Datorită prețului ridicat al acestor materiale, oamenii din industrie cer materiale cu un preț mai scăzut care să prezinte o rezistență bună la eroziune [10], inclusiv fabricarea din oțeluri inoxidabile. Ample cercetări în aceste direcții au fost realizate, până în anul 1995, la ICEPRONAV Galați și U.P. Timișoara [9], [10].

## 1.4. Investigații ale eroziunii cavitaționale în laborator

Datorită solicitărilor venite din partea producătorilor de echipamente hidromecanice cu privire la generarea de materiale care să aibă un preț de cost mai scăzut și o rezistență bună la eroziunea cavitațională, a condus la realizarea instalațiilor de laborator.

Utilizarea instalațiilor de laborator prezintă o serie de avantaje [1],[10],[113],[123]:

- permit crearea unor fenomene cavitaționale de intensități diferite care pot fi controlate și menținute un timp îndelungat;
- permit folosirea diferitelor lichide de lucru, la temperaturi și presiuni variabile;
- probele pot fi montate și demontate cu ușurință, în vederea determinării cantității de material erodat și studierii suprafeței distruse;
- durata de producere a eroziunii este cu mult mai mică decât cea întâlnită în situațiile reale la mașinile hidraulice, elicele navale și aparatele hidraulice de comandă și reglare;
- dispun de camere de lucru care permit vizualizarea, filmarea și fotografierea atacului cavitațional.

#### **1.4.1. Obiective urmărite prin investigarea eroziunii cavitaționale în laborator**

Studierea fenomenului de eroziune cavitațională de către oamenii de știință în laborator, are ca scop:

- găsirea unor materiale sau tratamente, care să ofere o bună rezistență la eroziunea cavitațională, astfel încât durata de viață a pieselor exploatare să fie suficient de mare;
- fiecare laborator trebuie să stabilească un criteriu de ierarhizare a materialelor după rezistența la eroziunea cavitațională;
- fiecare stațiune/laborator trebuie să aibă un material etalon cu o bună rezistență la eroziune cavitațională, utilizat și în industrie.

Stabilirea tendințelor de influență a comportării cavitaționale a materialelor de către:

- tipul structurii și natura constituenților structurali,
- elementele chimice componente,
- proprietățile fizico-mecanice,
- tehnologia de elaborare (turnare, laminare, forjare, matrițare, sudare), a materialului,
- forma geometrică a semifabricatului,
- natura și temperatura lichidului de încercare,
- parametri tehnico-funcționali ai aparatului/stațiunii de încercare,
- tratamentul aplicat, etc.
- stabilirea unor relații de legătură între rezultatele experimentale, obținute în stațiuni de laborator de același tip, respectiv între cele obținute în laborator și cele obținute pe instalațiile industriale;
- stabilirea unor criterii de similitudine în eroziunea cavitațională;
- stabilirea parametrului ce reflectă cel mai bine rezistența materialului la eroziunea cavitațională;
- găsirea unor corelații între parametri eroziunii cavitaționale și microstructurali ai materialului distrus prin cavitație.

Deși cercetătorii utilizează aparate de testare și medii de lucru diferite, tendința centrelor de cercetare este de a implementa norma ASTM G 32 pentru a forma o bază de date internațională și pentru a facilita compararea rezultatelor obținute în diferite laboratoare [123].

La realizarea acestor obiective și-au adus contribuții mai mulți oameni de știință sub diferite forme. Astfel Garcia a studiat în teza sa de doctorat [36], influența timpului, temperatura și felul lichidului de lucru (apă distilată, bismut și mercur), precum a proprietăților fizico-mecanice pentru diverse materiale (oțeluri carbon, oțel inoxidabil și aliaje neferoase), asupra vitezei de eroziune cavitațională,  $MDER_{max}$  și adâncimii medii MDE și maxime de pătrundere [36]. Studiul este realizat global, în tunel cavitant și aparat vibrator, și se încheie cu relații empirice de legătură între mărimile analizate și parametrii de referință, caracteristici eroziunii cavitaționale. Gradul de aplicabilitate al relațiilor, astfel stabilite, este limitat. El poate crește dacă analiza se realizează separat, pe grupe de materiale: oțeluri carbon, oțeluri aliate pentru construcții, oțeluri inoxidabile, aliaje ale cuprului și aluminiului, etc.

Cercetări asemănătoare au fost făcute și de către alți oameni de știință ca: Hobbs [54], Thiruvengadam [119], Steller [114], Hammitt ș.a. [46], Bordeasșu ș.a. [11].

Important în evaluarea rezultatelor cercetărilor, este curba tipică a vitezei de eroziune, Fig. 1.5, stabilită de către Thiruvengadam [120], recomandată pentru compararea și ierarhizarea materialelor după valoarea vitezei zonei de stabilizare  $v_s$  (zona 4).

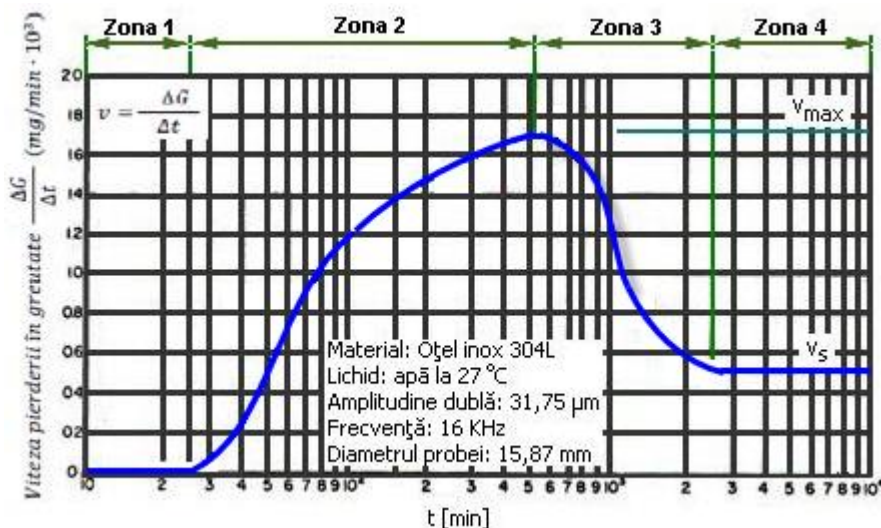


Fig. 1.5 Curba tip a vitezei de eroziune cavitațională stabilită de Thiruvengadam [120]

Recente studii bibliografice [108], [96], [97], [60] arată că majoritatea cercetărilor urmăresc îmbunătățirea rezistenței și comportamentului la atacul cavitației prin modificările constituției microstructurale, a procentului elementelor de aliere, precum și corelarea proprietăților mecanice cu parametrii rezistenței la eroziunea cavitațională.



### 1.4.2. Standuri și aparate utilizate

Eroziunea cavitațională poate fi cercetată în laborator pe trei tipuri de instalații:

1. Tunele hidrodinamice
2. Aparare cu disc rotitor imersat în lichid
3. Aparare vibratorii

#### 1.4.2.1. Tunele hidrodinamice

Tunelele hidrodinamice sunt astfel realizate și concepute încât permit generarea unor fenomene cavitaționale similare celor din mașinile hidraulice [1], [2], [10], [47], [53]. Pereții camerelor de lucru sunt transparente și permit vizualizarea, fotografierea, filmarea și înregistrarea evoluției procesului de distrugere cavitațională. Model pentru această categorie de stațiuni de laborator este tunelul hidrodinamic (fig. 1.6) [99].

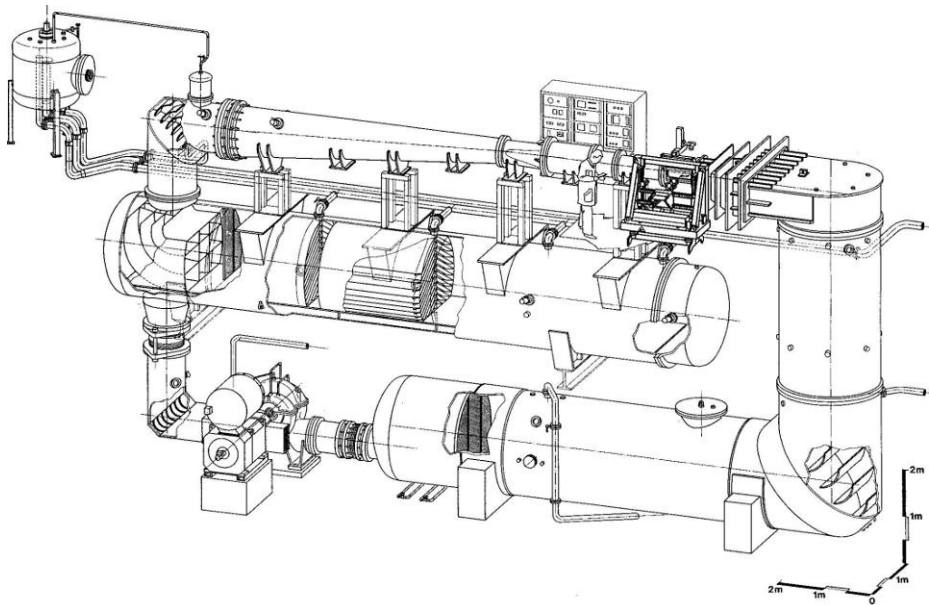


Fig. 1.6 Tunelul hidrodinamic Knapp [99]

Dezavantajul cercetărilor efectuate în tunelul hidrodinamic este durata mare (sute de ore) până la producerea de eroziuni, măsurabile. Din acest motiv tunelul hidrodinamic se folosește, cu precădere, la crearea de diverse stadii cavitaționale (incipientă, cavitație industrială, dezvoltată, etc) în vederea modelării hidrodinamicii curgerii, caracterizată prin coeficientul de cavitație  $\sigma$  [1], [2].



### 1.4.2.2. Aparate cu disc rotitor imersat în lichid

Aparatele cu disc rotitor imersat în lichid simulează cel mai bine procesul cavitațional din mașinile hidraulice și elicele navale [1], [2], [47]. Elementul de bază al acestor aparate îl constituie discul rotitor imersat în lichid, a cărui turație poate fi modificată în funcție de intensitatea fenomenului cavitațional dorit. În acest disc sunt realizate orificii, cu geometrie variabilă, dispuse după spirale logaritmice care servesc la generarea cavitației. În spatele orificiilor sunt montate probele de formă cilindrică a căror suprafață este distrusă prin eroziune cavitațională. În figura 1.7 este prezentată schița aparatului cu disc rotitor, considerat model și folosit de Steller, în laboratorul Universității din Gdansk [1], [114].

Deși și acest aparat modelează cel mai bine curgerea prin rotoarele mașinilor hidraulice, folosirea sa în cercetarea eroziunii prin cavitație este redusă datorită duratelor mari de testare, de zeci de ore.

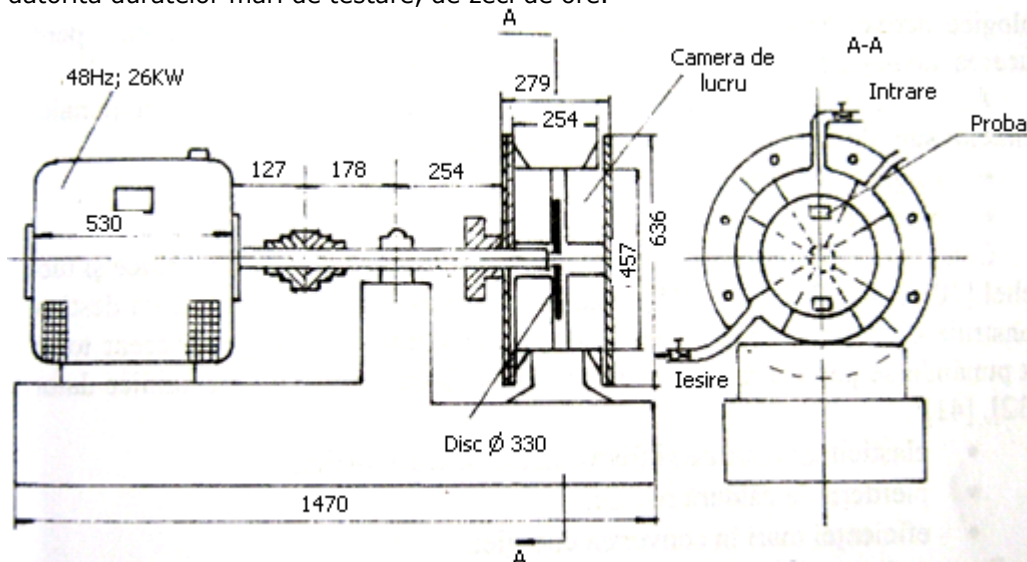


Fig. 1.7 Aparatul cu disc rotitor imersat în lichid [1], [114]

### 1.4.2.3. Aparate vibratorii

Aparatele vibratorii, utilizate în distrugerea materialelor prin eroziune cavitațională, sunt sisteme acustice, respectiv ultraacustice, deschise, cu aplicații tehnologice active, care folosesc energia sonoră, respectiv ultrasonoră, pentru producerea de modificări în structura mediului prin care se propagă [1], [2], [10].

Aparatele vibratorii folosite în cercetarea eroziunii cavitaționale a materialelor sunt de două tipuri [1], [9], [2], [10]:

- Magnetostrictive și
- piezoelectrice.

Cele mai uzuale aparate magnetostrictive folosesc traductoare feritice și tuburi de nichel. Azi, majoritatea aparatelor cu această destinație se construiesc pentru funcționarea în domeniul ultrasonic, un accent tot mai ridicat punându-se pe utilizarea aparatelor vibratorii cu cristale piezoceramice, datorită [1], [9], [10]:

- elasticității ridicate și frecvențelor de lucru înalte,
- pierderii de căldură reduse,
- eficienței mari în conversia energiei.

Pentru distrugerea materialului, prin cavitație, este necesar să se funcționeze în regim de rezonanță, cu unde longitudinale plane, la amplitudini de vibrație mai mari de 8  $\mu\text{m}$  [1], [48], [13], [41], [80]. La aceste amplitudini cea mai mare parte din energia acustică este absorbită de material, restul disipându-se sub formă de căldură în mediul înconjurător [1]. Distrugerea materialului depinde de nivelul parametrilor tehnico-funcționali: puterea electrică de alimentare a generatorului electronic de ultrasunete, diametrul probei, frecvența și amplitudinea oscilațiilor, temperatura și natura lichidului de lucru. Eroziunea cavitațională are loc ca urmare a mișcării vibratorii pe verticală ce generează, periodic, un nor de bule cavitaționale prin a cărui surpare se nasc presiuni ridicate pe suprafața probei, producând rupeți de material. Condiția esențială, ca eroziunea să aibă loc, este ca proba supusă atacului cavitațional să fie plasată în maximum amplitudinii de vibrație [1], [12], [80], [109] și norul de bule cavitaționale să adere pe suprafața probei. Această ultimă condiție este determinată de tensiunea superficială la interfețele lichid-solid-vapori și interacțiunea mecanică dintre bule și asperitățile suprafeței probei.

Probele supuse atacului cavitațional pot fi staționare sau vibratorii (fixate de subansamblu rezonator) [35].

La aparatele vibratorii cu tub de nichel nivelul amplitudinilor depinde de lungimea tubului, iar la cele cu transductor piezoceramic și feritic de forma concentratorului-amplificator (conic, exponențial, cilindric în trepte, catenoidal, etc) și raportul secțiunilor intrare-ieșire [9], [2], [10].

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

În Tabelul 1 se prezintă mărimile caracteristice ale celor mai semnificative, aparate vibratorii folosite în eroziunea cavitațională [1], [9], [2], [10], [80], [35].

Deși procesul cavitațional este diferit de cel din echipamentele industriale aparatele vibratorii sunt tot mai des folosite datorită următoarelor avantaje [2], [10]:

- durata de încercare foarte mică, maxim 2 ÷ 4 ore,
- spațiul ocupat foarte redus,
- permit utilizarea oricărui tip de lichid,
- au cea mai mare intensitate de distrugere [2], [10],
- rezultatele obținute sunt acoperitoare pentru situațiile reale.

În tabelul de mai jos sunt afișate valorile parametrilor caracteristici ale celor mai cunoscute aparate vibratorii, din lume.

Dezavantajele acestor aparate sunt necesitatea unei bune izolării fonice și dificultatea stabilirii unor relații care să permită transpunerea rezultatelor la mașina industrială, datorită modului diferit de realizare a fenomenului cavitațional [9].

În figura de mai jos este prezentat aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație, din cadrul U.P. Timișoara, construit în colaborare cu ISIM Timișoara, conform cerințelor ASTM G32-2010.

Tabel 1.3 Parametrii tehnico-funcționali ai unor aparate vibratorii [10].

## 1.4. Investigații ale eroziunii cavitaționale în laborator – 19

<b>Laboratorul (țara)</b>	<b>Tipul Stațiuni</b>	<b>Frecvența f kHz</b>	<b>Amplitudinea A μm</b>	<b>Diam. probei d mm</b>	<b>Puterea electr. P<sub>el</sub> W</b>	<b>Bibl.</b>
Timișoara - T1 (Romania)	magneto - strictivă	7	94	14	500	[9]
Timișoara - T2 (Romania)	piezoelec - trică	20	50	15,8	500	[14]
Michigan (USA)	piezoelec - trică	6,4÷22,5	12,5 ÷ ÷ 100	14,3 ÷ ÷ 22	200	[35]
Gdansk (Polonia)	magneto - strictivă	8,1	50	12,5	500	[113]
Ostrava (Cehia)	piezoelec - trică	20	20	40	16	[113]
Beograd (Croatia)	piezoelec - trică	20	50	-	-	[100]
Town University (Africa de Sud)	piezoelec - trică	20	60	10	500	[113]
Wuxi (China)	piezoelec - trică	20	32	16	250	[113]
Hiroshima (Japonia)	piezoelec - trică	19,9	24	16	100	[113]
Milan (Italia)	piezoelec - trică	20	50,8	15,8	1000	[113]

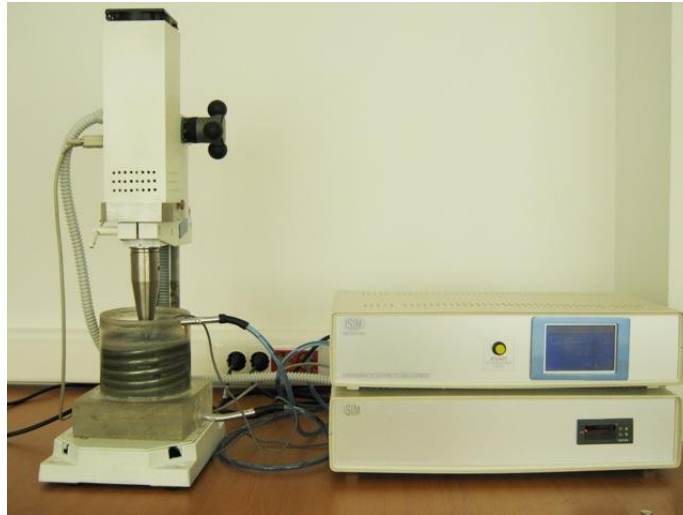


Fig. 1.8 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 [14].

### 1.4.3. Metode de evaluarea a comportării materialelor la eroziunea cavitațională

Ordonarea și evaluarea rezistenței materialelor la eroziune cavitațională se face după unul din criteriile:

1. panta curbelor de pierdere masică  $m(t)$  sau volumică  $V(t)$ , prin  $tg\alpha$ , în zona de stabilizare [2], [10], [101], fig. 1.9;
2. valoarea spre care viteza de eroziune tinde să se stabilizeze (finală de palier)  $v_s$  [9], [10], [123], fig.1.9;
3. viteza maximă a eroziunii  $v_{max}$  [9], [34], [53], [104], fig.1.9;
4. rezistența normalizată la cavitație  $R_n$  [1], [9], [10];
5. viteza adâncimii medii sau maxime de pătrundere a eroziunii,  $MDER$  respectiv  $MDER_{max}$ , sau inversul acestora,  $1/MDER$  respectiv  $1/MDER_{max}$ , [13], [35], [47], [85], [121];
6. timpul de incubație [2], [13], [80];
7. durata necesară obținerii unei pierderi volumice sau masice date [2], [48];
8. durata necesară realizării unei anumite adâncimi de pătrundere [2], [35];
9. metoda de analiză pe baza difracției cu raze X, fig.1.10;
10. microrelieful suprafețelor erodate cavitațional, fig.1.11.

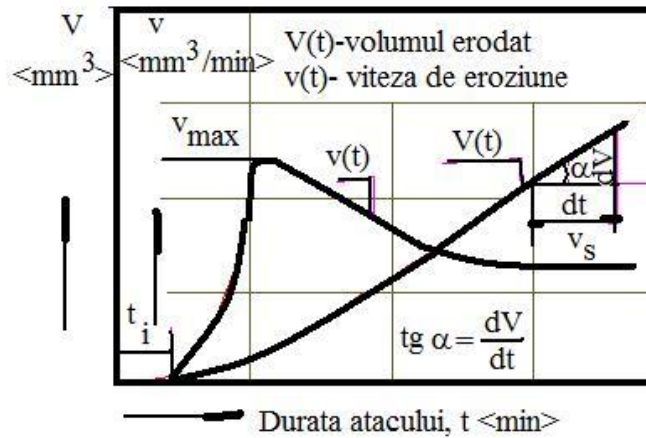


Fig. 1.9 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională.

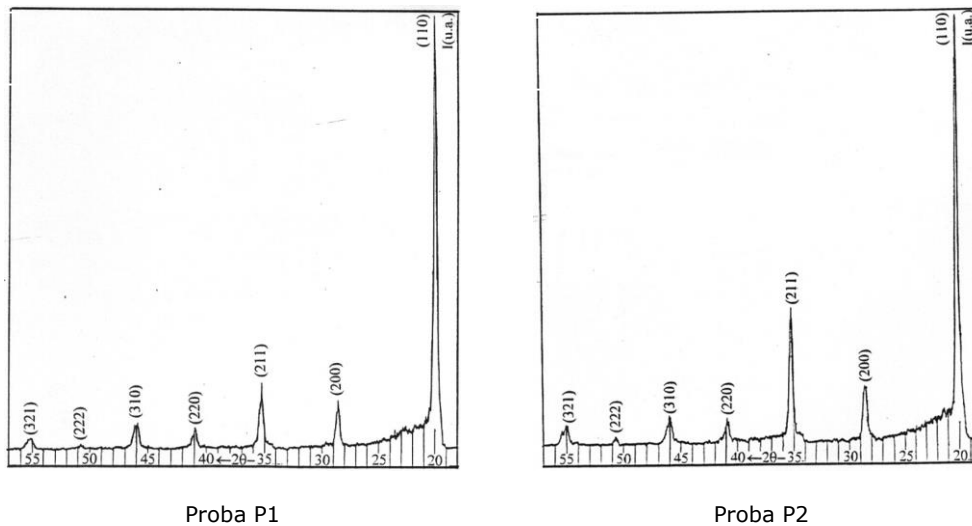


Fig.1.10 Exemple de difracții pe suprafețele neatate cavitațional ale unor probe din oțel cu structură de ferită și martensită [87]

Difracțiile din Fig.1.10 sunt efectuate, pe suprafețele lustruite ale probelor aflate în stările naturale, în domeniul unghiular  $2\theta \in (18^\circ, 60^\circ)$ , cu viteza detectorului de  $2^\circ/\text{min}$  (Fig. 1.10). După indexarea spectrelor de difracție, rezultă spectrele probelor.

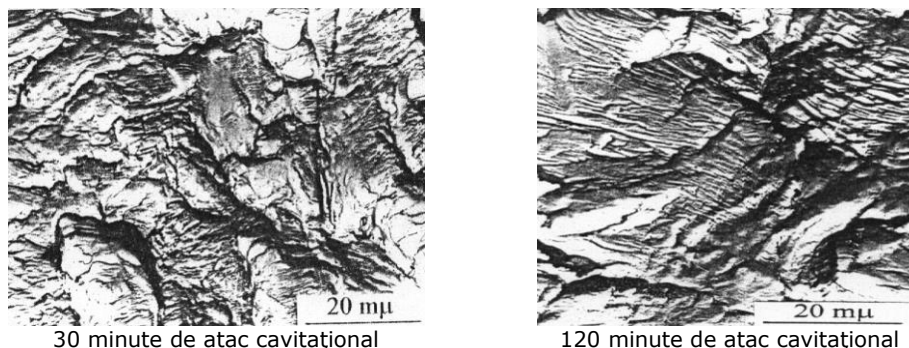


Fig. 1.11 Microrelieful probei de oțel cu structura de ferită și martensită, erodată prin cavitație

Pentru cunoașterea aspectului microreliefului suprafețelor erodate prin cavitație sunt examinate replicile acestora, prin microscopie electronică prin transmisie cu ajutorul microscopului Tesla BS 613, după 30, respectiv 120 minute de atac.

Deoarece rezultatele experimentale sunt influențate de parametrii tehnico-funcționali ai stațiunii, permițând un grad de subiectivitate, niciunul dintre parametrii menționați nu este acceptat, ca unic, de către cercetători.

Azi, majoritatea cercetătorilor utilizează pentru ordonarea materialelor, după rezistența la distrugere cavitațională, parametrii 1 și 2, iar pentru analiza cauzelor distrugerii sub anumite forme se folosesc rezultatele oferite de investigațiile microstructurilor cu ajutorul microscopelor optice și electronice cu baleiaj.

Normele ASTM recomandă parametrii 2, 3, 4, și 5. Pentru maximul vitezei de eroziune cavitațională normele ASTM recomandă acea valoare după care viteza devine descrescătoare. Se face această recomandare, deoarece valorile ridicate din primele minute ale atacului cavitațional (obținute cu precădere în aparatele vibratorii) sunt puternic afectate de praful abraziv și nivelul rugozității din suprafața atacată.

Cercetările din ultimii trei ani [60], [14], [71], [15], [61], realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnice din Timișoara, au dus la concluzia că utilizarea parametrului MDER, respectiv inversul acestuia ( $1/\text{MDER}$ ) sunt mai sugestive în evaluarea rezistenței și descrierea comportării la cavitație.

### **1.5. Evaluarea cercetărilor de eroziune cavitațională a oțelurilor inoxidabile cu conținut constant de crom**

Oamenii de știință sunt permanent preocupați de găsirea unor noi soluții tehnologice de creștere a duratei de viață a organelor de mașini ce funcționează în regim de cavitație, în deosebi turbinele și pompele hidraulice. Ei au fost nevoiți să se axeze pe analiza rezistenței la eroziunea cavitațională a materialelor cât și pe fenomenele apărute în structura materialelor ca urmare a atacului cavitațional. Acest fapt este justificat de multitudinea factorilor care influențează eroziunea cavitațională: constituția structurală, compoziția chimică, tehnologia de elaborare a semifabricatului, tratamentele termice, chimice și mecanice, etc.

### 1.5.1. Rezultate experimentale obținute în laboratoare de cercetare

#### 1.5.1.1. Cercetările efectuate în Laboratorul de Mașini Hidraulice al Universității Politehnica din Timișoara

O serie de cercetări au fost efectuate de Bordeasu și Mitelea [2], în Laboratorul de Mașini Hidraulice al Universității Politehnica din Timișoara, pe oțelurile cu diverse conținuturi de Cr și Ni [91], [92].

În urma testelor s-a putut observa influența conținutului de nichel la oțelurile cu 13% crom, asupra comportării la eroziunea cavitațională, având în vedere schimbările provocate în morfologia structurii microscopice și a stării de tensiuni interne.

Pentru îmbunătățirea comportării metalurgice și tehnologice la sudare, precum și pentru creșterea tenacității secțiunilor mari din piese, s-a trecut la dezvoltarea oțelurilor cu un conținut de până la 6% nichel, cele mai performante sunt oțelurile 13/4 și 13/6, adică cu 13 % crom și 4 ÷ 6% nichel. Aceste oțeluri au fost promovate de S.C. UCM Reșița, pe baza unor cercetări anterioare [89], [90], [91], firma respectivă participând la programul național de retehnologizare a centralelor hidroelectrice românești și la producerea unor rotori și palete de turbine hidraulice pentru alte țări.

În tabelul 1.3 este prezentată compoziția chimică a șarjelor celor 4 mărci de oțeluri utilizate la conducerea programului experimental.

Conținutul în carbon este mai mic de 0,1 % pentru a evita micșorarea rezistenței la coroziune, o scădere a tenacității și o înrăutățire a comportării metalurgice și tehnologice la sudare. O concentrație de crom de peste 12% asigură o creștere considerabilă a rezistenței la coroziune și la temperaturi înalte, în condiții de fluj. Alierea cu nichel îmbunătățește rezistența acestor oțeluri la coroziune în medii neutre sau slab aliate, dar le mărește prețul de cost.

Predicția microstructurii de turnare, neafectată de tratamente termice ulterioare, s-a făcut cu ajutorul diagramei Schöffler.

**Tabel 1.4** Compoziția chimică a șarjelor de oțeluri cercetate [92]

Oțel	Compoziția chimică, %									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
13Cr (13/0)	0,084	0,28	0,65	0,019	0,023	12,95	-	0,12	0,02	0,14
13Cr-1Ni (13/1)	0,081	0,31	0,63	0,019	0,021	12,86	1,12	0,22	0,08	-
13Cr-4Ni (13/4)	0,062	0,36	0,59	0,021	0,024	13,32	4,07	0,14	-	0,15
13Cr-6Ni (13/6)	0,065	0,34	0,60	0,021	0,022	13,09	6,11	0,20	0,06	-

În figura 1.12a sunt reprezentate curbele de variație a pierderilor masice, în funcție de durata atacului cavitațional, pentru cele patru sortimente de oțel, în figura

1.12b este redată variația vitezei de eroziune cu timpul de atac, iar în figura 1.12c se arată tendința de influență a alierii cu Ni a acestui oțel [92].

Din analiza acestora se desprind următoarele concluzii:

- cea mai scăzută rezistență la cavitație o prezintă oțelul inoxidabil aliat cu 13 % crom și fără nichel în compoziția chimică. Fenomenul este justificat de cantitatea ridicată de ferită  $\delta$  în microstructură;
- alierea cu nichel favorizează creșterea rezistenței la cavitație, cel mai bun rezultat obținându-se pentru oțelul 13/4;
- alierea cu 6 % nichel, deși provoacă o puternică reducere a proporției de ferită  $\delta$  și obținerea celor mai ridicate valori pentru caracteristicile de tenacitate, conduce la pierderi masice (figura 1.14a), prin cavitație, ceva mai mari decât cele obținute la testarea oțelului aliat cu 4 % nichel. Explicația este dată de proporția, ceva mai ridicată, de austenită de reversiune prezentă în microstructura oțelului cu 6 % nichel.

Pe baza acestor încercări rezultă că oțelul 13/4 constituie soluția optimă de material, dintre cele studiate, pentru execuția paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice, el prezentând o structură omogenă de martensită revenită cu o cantitate redusă de ferită  $\delta$ . O asemenea microstructură asigură o degradare uniformă a suprafeței materialului, prin formarea unor multitudini de cratere cu diametre de 3-10  $\mu\text{m}$ . Amorsarea smulgerilor de material, prin implozia bulelor cavitaționale, are loc, în principal, pe particulele de faze fragile de carburi de crom și ferită  $\delta$ , existente în matricea de bază de natură feritică.

La concluzii similare se ajunge și din analiza curbelor vitezei de eroziune (figura 1.12b), a valorilor vitezelor caracteristice (viteza de stabilizare  $v_s$  și maximum vitezei de eroziune  $v_{max}$ ), definite de aceste curbe și prezentate în tabelul 1.4, precum și a variației vitezei de stabilizare cu conținutul de nichel (figura 1.12c).

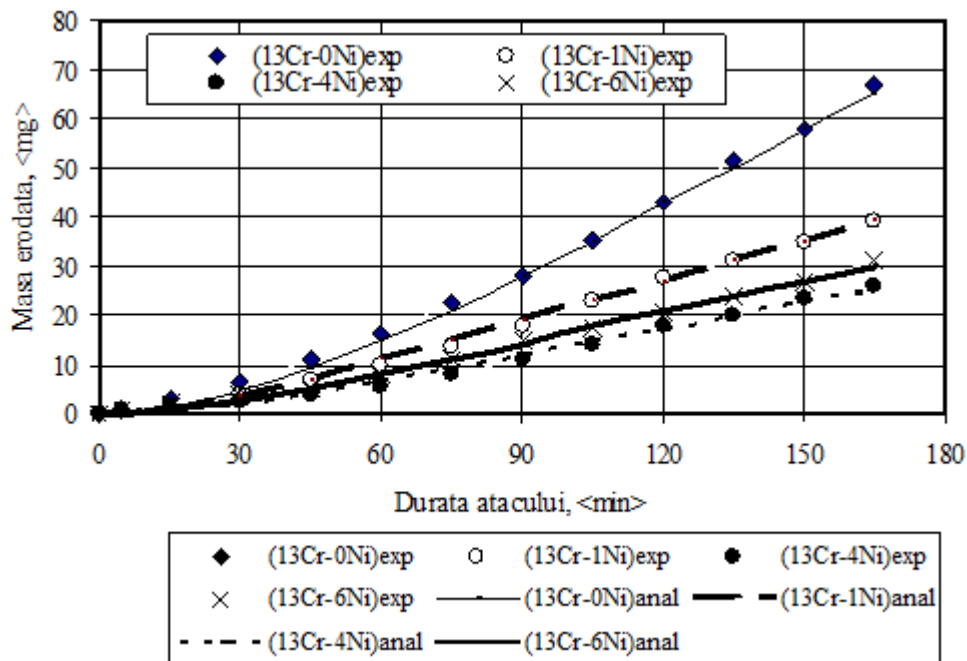


Figura 1.12a. Evoluția pierderilor masice cu timpul de atac cavitațional [10], [92]



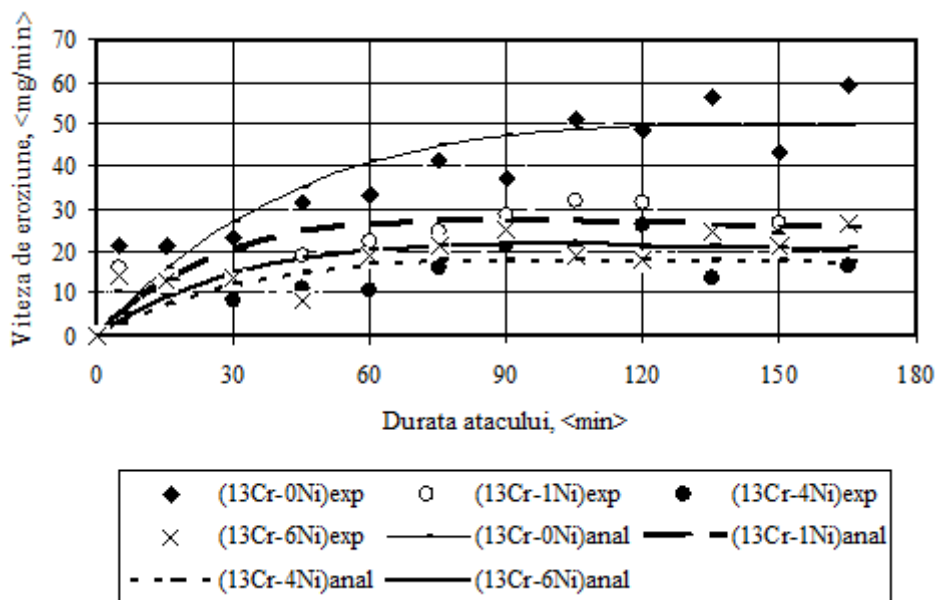


Figura 1.12b. Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac cavitațional [10], [92]

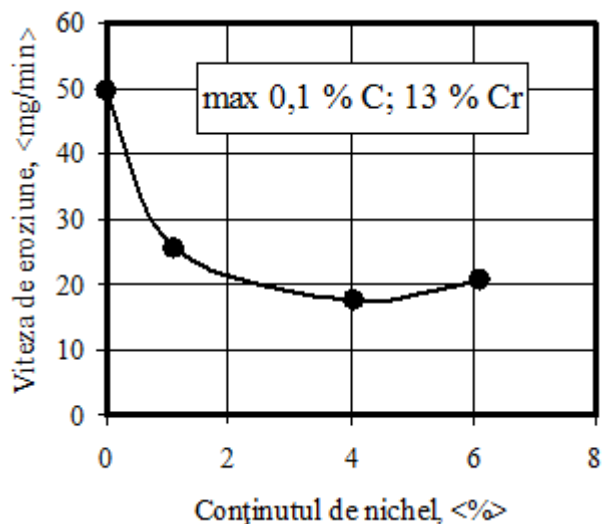


Fig. 1.12c Variația vitezei de eroziune a eroziunii cavitaționale cu conținutul de nichel [10]

Evoluția curbelor din figura 1.12b și 1.12c și datele din tabel confirmă, încă odată, că oțelul inoxidabil aliat cu 4 % nichel are cea mai bună rezistență la cavitație. Totodată, evoluția curbelor vitezelor de eroziune sugerează un comportament cavitațional asemănător, al celor patru materiale. Diferența dintre viteze este dată de constituția microstructurală, care avatajează oțelul cu 4 % nichel.

- Concluzii finale la care ajung Mitelea și colaboratorii [ ]sunt:
- Oțelurile inoxidabile cu 13 % crom, până la 0,1 % carbon și fără nichel prezintă, în microstructură, o cantitate de 20 ÷ 30 % ferită  $\delta$  care afectează caracteristicile mecanice și implicit rezistența la eroziune cavitațională.
  - Alierea oțelului cu 1 ÷ 6 % nichel conduce la mărirea conținutului de nichel echivalent pe diagrama Schäffler, la micșorarea cantității de ferită până la 2 ÷ 4 % și la creșterea proporției de martensită, cu implicații în îmbunătățirea proprietăților mecanice și a comportării cavitaționale.
  - Examinarea suprafețelor degradate, la microscopul optic cu baleiaj, pune în evidență caracterul punctiform al procesului erozional, determinat de microstrucra omogenă a oțelurilor 13/4 și 13/6, care asigură atât caracteristici ridicate de rezistență mecanică cât și o mare rezistență la rupere fragilă.

### **1.5.1.2. Cercetările efectuate în Computational Materials Science Laboratory, Department of Metallurgical and Materials Engineering, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo [25]**

Lucrarea studiază rezistența la eroziunea cavitațională pe unsprezece aliaje de Fe-Cr-Ni-C. S-au alege două grupuri de aliaje cu conținut constant de crom, unul cu  $\approx 25\%$  Cr și un altul  $\approx 35\%$  Cr. Au fost efectuate teste de eroziune cavitațională, iar rezultatele au fost asociate cu distribuția tensiunilor în diferitele microstructuri, calculate cu ajutorul modelării cu element finit.

**Tabel 1.5** Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %) [25]

	<b>C</b>	<b>Si</b>	<b>Mn</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Mo</b>	<b>W</b>
<b>Aliaj 2</b>	1,97	1,55	1,57	14,8	3,12	3,12	1,32
<b>Aliaj 3</b>	1,92	1,01	1,52	25,81	3,2	3,2	1,28
<b>Aliaj 5</b>	1,21	1,23	1,55	24,84	3,05	3,05	1,25
<b>Aliaj 7</b>	1,17	1,24	1,6	25,53	2,79	2,79	1,59
<b>Aliaj 8</b>	1,18	1,13	1,66	15,47	3,40	3,40	1,70
<b>Aliaj 11</b>	2,41	1,12	1,56	15,49	2,98	2,98	1,74

Încercările au fost efectuate pe un aparat vibrator (TELSONIC SG 1000). Probele au stat fixe la o distanță de 1 mm față de cap. Frecvența și amplitudinea aparatului vibrator au fost de 20kHz respectiv 40 $\mu$ m. Testele au fost efectuate în apă distilată păstrată la o temperatură constantă de 20°C.

În figurile 1.13 și 1.14 sunt prezentate, comparativ, evoluțiile curbelor pierderilor masice, care evidențiază efectul cumulativ al concentrațiilor de nichel și carbon.

1.5. Evaluarea cercetărilor de eroziune cavitațională a oțelurilor inoxidabile – 27

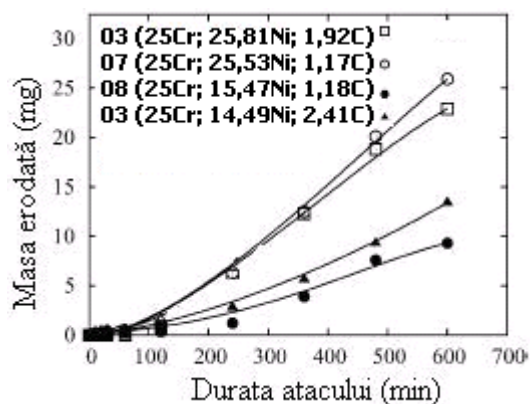


Fig. 1.13 Graficul de evoluție în timp a probelor cu 25% Cr [25]

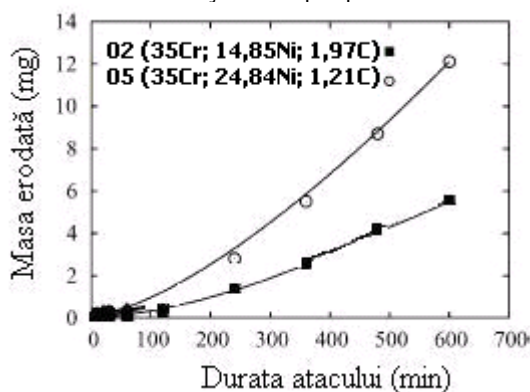


Fig. 1.14 Graficul de evoluție în timp a probelor cu 35% Cr [25]

**Concluzie:**

Diagramele din fig.1.13 și 1.14 arată că pentru aceleași concentrații de crom în funcție de proporția de nichel și procentul de carbon rezistența la cavitație poate crește sau scade.

**1.5.1.3. Cercetările efectuate în Materials Engineering Center, University of Perugia, Loc. Pentima Bassa 21, IT-05100 Terni, Italy [24]**

Testele de eroziune cavitațională au fost efectuate pe două oțeluri inoxidabile austenitice diferite în apă cu pH variabil, la temperatura camerei, pe un aparat vibrator ultrasonic de 20kHz. Oțelurile austenitice cercetate, tabelul 1.8, sunt: X5CrNi18-10 (18Cr-10Ni) și un oțel cu conținut ridicat de azot (HN).

**Tabel 1.6** Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %) [24]

Material	C%	Si%	Cr%	Ni%	Mo%	N%	S%	Mn%	P%
X5CrNi18-10	0,037	0,26	17,97	8,55	0,22	0,046	0,003	1,04	0,025
HN	0,037	0,12	18,5	1,07	0,08	0,37	0,003	11,4	0,022

Pentru fiecare oțel au fost confecționate câte trei probe cu mărimi diferite ale grăunților: 2,5 μm, 20μm și 45μm. Cercetările au arătat că dimensiunile grăunților au un efect important asupra naturii distrugerii produse pe suprafața probelor.

**Concluziile** desprinse sunt:

1. Rezistența la eroziunea cavitațională crește continuu cu scăderea dimensiunilor grăunților.

2. Rezistența la eroziunea cavitațională a celor două oțeluri este influențată de pH-ul apei: o scădere a pH-ului produce o creștere a distrugerii suprafeței. Oțelul HN are o mai bună rezistență la eroziunea cavitațională decât oțelul X5CrNi18-10.

#### **1.5.1.4. Cercetările efectuate în State Key Laboratory for Corrosion and Protection, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning 110016, China [124]**

Lucrarea analizează comportarea la eroziunea cavitațională și coroziune a tratamentului de suprafață cu CrMnB, în comparație cu oțelul inoxidabil 0CrNi15Mo, folosind o instalație magnetostrictivă. Microstructurile suprafețelor distruse au fost studiate la microscopul electronic cu baleiaj.

Rezultatele obținute de autori arată că rezistența la eroziunea cavitațională și coroziune a probelor tratate superficial cu CrMnB a fost de 14 ori mai mare decât a oțelului inoxidabil 0Cr13Ni15Mo și în soluții de NaCl, iar rezistența la eroziune cavitațională-coroziune a fost de 5,7 ori mai mică în soluție HCl.

Concluzii deduse pe baza rezultatelor obținute arată:

Pentru straturile de suprafață de CrMnB și soluțiile de 0,5NaCl cavitația accelerează puternic coroziunea electrochimică.

Transformarea martensitică indusă de tensiuni în stratul de suprafață CrMnB a condus la o excelentă rezistență la cavitație.

#### **1.5.1.5. Cercetările efectuate în Metallurgical and Materials Engineering Department of the University of São Paulo, Brazil; Mechanical Technology Program, Technological University of Pereira, Vereda La Julita, Pereira, Risaralda, Colombia; Physics Department, National University of Colombia, Ciudad Universitaria, Bogotá D.C., Colombia [26]**

Cercetările au fost efectuate pe oțelul inoxidabil austenitic cu conținut crescut de azot (0,9%) X2CrNi18-9 și oțelul inoxidabil austenitic X5CrNi18-10 cu compoziția chimică din tabelul 1.7, într-un aparat vibrator cu frecvența de 20kHz. Oțelul inoxidabil cu conținut crescut de azot a fost obținut prin nitrurare în gaz la temperatura de 1200 °C a unei benzi de oțel inoxidabil duplex X2CrNiMoN22-5-3 cu grosimea de 1 mm. Oțelul X5CrNi18-10 a fost utilizat pentru comparație. Probele au fost analizate la microscopul electronic cu baleiaj și prin difracție. Suprafața cavitată a probei a fost analizată în încercarea de a găsi zone afectate neuniform. Distribuția zonelor unde a avut loc inițierea cavitației a fost foarte neomogenă, constatându-se

acest lucru la limitele de alunecare din interiorul unor grăunți și la limitele rețelelor cristaline. Mai mult s-a observat că distrugerile cauzate de eroziunea cavitațională s-au răspândit mai repede în interiorul grăunților care au o predispoziție mai mare la incubație. Neomogenitatea distrugerilor a fost asociată anizotropiei plastice. Grăunții, în care orientarea cristalografică duce la tensiuni de forfecare mari, arată distrugeri mari la linii de alunecare.

**Tabel 1.7** Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %) [26]

Material	Cr%	C%	Ni%	Mn%	Si%	Cu%	N%	S%	Mo%
X2CrNi18-9	18,7	0,03	9,6	1,9	0,95	-	-	0,02	-
X2CrNiMoN22-5-3	22,5	0,019	5,4	1,9	-	0,14	0,16	0,001	3,0

**Concluzii** desprinse de autori arată că:

- Azotul crește rezistența la eroziune cavitațională a oțelurilor inoxidabile austenitice.
- Inițierea și creșterea ulterioară a distrugerilor provocate de eroziunea cavitațională este neuniformă de-a lungul microstructurilor oțelurilor inoxidabile austenitice. Această neuniformitate rezultă din neuniformitatea cristalografică la nivel de grăunți.
- Distrugerile provocate prin eroziune cavitațională au o mare predispoziție de inițiere de-a lungul liniilor de grăunți unde există diferențe mari ale tensiunilor de forfecare.

## 1.6. Concluzii

**Din cele prezentate mai sus se desprind următoarele concluzii:**

a1) – cercetarea eroziunii cavitației pe mașina industrială și în laborator, continuă să fie o preocupare atentă a oamenilor de știință ca urmare a multitudinii factorilor ce definesc hidrodinamica curgerii și materialul;

a2) investigarea eroziunii cavitaționale pe mașina industrială, este dificilă, costisitoare și necesită un timp mai mare ca urmare a operațiilor de montare și demontare. De asemenea, erorile ce pot apărea sunt foarte mari, circa 100 - 200 % [10].

a3) – investigarea eroziunii cavitaționale în laborator este foarte utilă, mai ales dacă se urmărește analiza evaluării comportării și rezistenței la cavitație, precum și influența factorilor ce definesc marca de oțel;

a4) – evaluarea comportării la eroziunea cavitației este indicat să se facă nu numai pe baza curbelor și parametrilor caracteristici ci și pe baza microfotografiilor realizate pe suprafețele degradate, dar și în structurile secționate, la diverși timpi finali ai atacului cavitației;

a5) - oțelurile inoxidabile cu conținuturi bine corelate de Cr și Ni au cea mai largă utilizarea în fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice;

a6) – necesitatea generării de noi oțeluri inoxidabile, prin diverse combinații ale cromului și nichelului, astfel încât să se poată obține combinații ale constituenților structurali care, prin proprietățile mecanice dobândite în urma tratamentelor termice specifice, să conducă la creșterea rezistenței la cavitație;

a7) – lipsa unor criterii/modele analitice sau grafice care să permită ierarhizarea materialelor și în special a oțelurilor inoxidabile folosite în fabricarea pieselor intens solificate la cavitație;

**Din punct de vedere al eroziunii cavitaționale se impune:**

b1) - continuarea studierii în laborator a degradării prin cavitație a oțelurilor inoxidabile folosite în fabricarea mașinilor și echipamentelor hidraulice și stabilirea factorilor ce duc la creșterea rezistenței;

b2) - utilizarea celor mai performante aparate pentru efectuarea unor analize, mai profunde, asupra modului în care principalii factori:

- tehnologia de elaborare,
- structura și constituenții structurali,
- proprietățile mecanice,
- elementele chimice componente,
- tratamentele termice aplicate.

Influențează rezistența oțelului inoxidabil la eroziunea cavitațională.

b4) - stabilirea factorilor ce determină alura curbelor vitezelor de eroziune cavitațională și modul de dispersie al punctelor experimentale față de curbele de aproximație. Calculul erorilor de aproximație pentru stabilirea celor mai bune relații de descriere analitică a curbelor de aproximație. Definirea parametrilor specifici eroziunii cavitației, care să asigure evaluarea și compararea rezistenței la cavitație;

b5) - continuarea investigațiilor pentru stabilirea unor dependențe grafice sau analitice ce pot permite ierarhizarea oțelurilor inoxidabile după rezistența la eroziunea cavitației creată în același aparat de testare.

## 1.7. Obiectivele tezei de doctorat

**În cadrul tezei sunt abordate și rezolvate următoarele obiective:**

1. proiectarea și realizarea unei game de opt oțeluri inoxidabile, cu conținut constant de crom (12 %) și variabil de nichel, destinate fabricării paletelor și rotoarelor pompelor și turbinelor hidraulice. Cele opt oțeluri sunt împărțite, după conținutul de carbon, în două grupe: una cu  $\cong 0,1$  % carbon și cealaltă cu 0,036 % carbon;
2. cercetarea rezistenței și comportării la cavitație a acestor oțeluri inoxidabile cu conținut constant de crom și variabil de nichel, folosind două aparate vibratorii: unul magnetostrictiv cu tub de nichel, T1, (amplitudinea vibrațiilor = 47  $\mu\text{m}$ , frecvența vibrațiilor = 7000  $\pm 3\%$  Hz, diametrul probei = 14 mm), celălalt cu cristale piezoceramice, T2, care respectă normele ASTM G32-2010 (amplitudinea vibrațiilor = 50  $\mu\text{m}$ , frecvența vibrațiilor = 20000  $\pm 3\%$  Hz, diametrul probei = 15,8 mm), aflate în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara;
3. analizarea tendinței de influență a principalelor proprietăți mecanice ( $R_m$ , HB,  $R_{p0,2}$ ), de care depinde alegerea materialului din punct de vedere al sollicitărilor mecanice [2], [10], [32], [42], [93], [49], asupra comportării cavitaționale a celor opt oțeluri inoxidabile construite. Această investigație aduce elemente noi față de cele prezentate de Garcia [37], [38], Hammitt [50], [51], [49], Hobbs [53] și Steller [115], [116].
4. conceperea unei metode estimative de categorisire a oțelurilor inoxidabile, cercetate în Laboratorul de Cavitație din cadrul UP Timișoara, după rezistența la eroziunea cavitației (bună, foarte bună excelentă). Metoda este o perfecționare a metodelor stabilite de Bordeasu [2], [10] și Sakai-Shima [2], [10] și folosește ca parametru rezistența normalizată la cavitație  $R_{ns}$  respectiv  $R_{nmax}$ .

## **2. Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație a unei game de oțeluri inoxidabile cu conținut constant de crom și variabil de nichel**

### **2.1. Considerații privind oțelurile cercetate**

Materialele testate din punct de vedere al rezistenței la eroziunea cavitațională, fac parte din gama oțelurilor inoxidabile utilizate la fabricarea rotoarelor și paletelor turbinelor și pompelor hidraulice. Experimentele au fost conduse pe 8 oțeluri inoxidabile, pentru fiecare dintre ele au fost testate câte trei probe, în conformitate cu cerințele normei ASTM G32 [123].

Semifabricatele oțelurilor inoxidabile au fost obținute prin turnare după rețete construite în urma discuțiilor avute cu specialiștii de la Centrul de Expertizări Materiale Speciale, al Universității Politehnica din București și de la SC. Prod SRL din București, având ca principal scop crearea unor oțeluri cu conținuturi aproximativ constante de crom și carbon și variabile de nichel. Astfel, s-au generat 8 semifabricate împărțite, după conținutul în carbon, în două grupe: 4 cu  $\approx 0,1\%$  carbon,  $\approx 12\%$  crom și variabil de nichel ( $\approx 0,5\%$ ;  $\approx 2\%$ ;  $\approx 6\%$ ;  $\approx 10\%$ ) și 4 cu  $\approx 0,036\%$  carbon,  $\approx 12\%$  crom și variabil de nichel ( $\approx 2\%$ ;  $\approx 4\%$ ;  $\approx 6\%$ ;  $\approx 8\%$ ). Cele opt semifabricate au fost turnate sub formă de cilindri astfel: patru - prima grupă - cu diametrul de 80 mm și o lungime de 170 mm (în cuptor cu inducție, cu o masă de maxim 10 kg) și patru, - a doua grupă - cu diametrul de 30 mm (în cuptorul de topire în vid cu flux de electroni EMO 1200 R). După turnare, oțelurile au fost supuse tratamentului termic preliminar de recoacere pentru omogenizare urmată de o revenire la temperatură înaltă. Ulterior, lingourile au fost prelucrate prin strunjire de degroșare și de semifinisare, după care s-a aplicat tratamentul termic de călire prin punere în soluție la  $1050^{\circ}\text{C}$  cu răcire în apă. Astfel pregătite, semifabricatele au servit la execuția probelor pentru încercări mecanice, teste cavitaționale și examinări metalografice.

Pentru evaluarea rezistenței opuse cavitației și a comportamentului pe timpul atacului acesteia, pe baza curbelor caracteristice și a valorilor parametrilor specifici, s-au utilizat, ca oțeluri de comparație 41Cr4 (oțel etalon pentru laboratorul de cavitație din UPT) și OH12NDL (oțel inoxidabil martensitic, de fabricație rusească, folosit la turnarea paletelor turbinelor de la CHE Porțile de fier I și II, considerat de referință pentru pompele și turbinele hidraulice din România) [9] [10] [14] [71].

În cele ce urmează se prezintă, succint, pașii tehnologici urmații pentru procesarea probelor cercetate experimental.

### 2.1.1.Procedura de elaborare

Elaborarea celor patru semifabricate cu diametrul de 30 mm, necesare probelor experimentale, s-a realizat de către firma SC Zirom SA, din Giurgiu, în **Cuptorul de topire în vid cu flux de electroni EMO 1200 R, fig.2.1**



Fig. 2.1 Cuptorului de topire în vid cu flux de electroni EMO 1200 R

Cuptorul de topire în vid cu flux de electroni EMO 1200 R are următoarea componență :

- Bloc tun KEN 1200/50
- Lift de capac
- Dispozitivul de pivotare a pupitrului de comandă
- Vizor 80 x 40°
- Instalație de vid pentru recipient
- Instalație de vid pentru tun electronic
- Cristalizator  $\Phi$  500 cu dispozitiv de extracție  $\Phi$  500
- Cristalizator  $\Phi$  420 cu dispozitiv de extracție  $\Phi$  420
- Supraveghetor de apă
- Instalație de înaltă tensiune
- Instalație de joasă tensiune pentru instalația de vid
- Dispozitiv de ghidaj al fasciculului
- Camera de topire
- Trapă de vapori
- Deflector de picături
- Cărucior port-capac
- Dispozitiv de șarjare, dreapta-stânga
- Construcție metalică
- AMC pentru circuitul de apă
- Instalație de joasă tensiune
- Instalație de tensiune medie

Camera de topire are forma unui vas cilindric orizontal, având în partea frontală un capac mobil. În imediata apropiere a zonei de topire se montează trapa de condens, care împiedică depuneri excesive pe suprafața interioară a recipientului.

Pe coama recipientului și pe cristalizator este montat vertical blocul-tun EH 1200/50 care cuprinde tunul EH 1200/50, calota de înaltă tensiune, legată de liftul calotei HL/200, pompele de vid avansat și monitorul de apă WK.

Instalația EMO 1200 R este dotată cu șase dispozitive de vid VR 1000 pentru realizarea vidului în camera de topire.



**2.1.2. Caracteristicile tehnice ale cuptorului EMO 1200 R**

a) Tipul cuptorului	EMO 1200 R
- Puterea nominală (puterea fasciculului general de tunul de electroni)	1200 KW
- Domeniul de reglare a puterii fasciculului (reglare continuă)	100 ÷ 1200 KW
- Tensiunea de accelerare	≤ 50 KVcc
- Intensitatea fasciculului	≤ 27 A la 45 KV
- Tensiunea de racord (tensiunea medie)	3 N 6 KV, 50 Hz
- Puterea de racord	1600 KVA
- Tensiunea de racord (tensiunea joasă)	3N,380 V,50 Hz
- Puterea de racord	~ 400 KVA
b) Dimensiunile de gabarit	
- Lungimea max. în direcția axială a recipientului	~ 25,050 m
- Lățimea	~ 24,250 m
- Înălțimea deasupra pardoselii	~ + 9,250 m
- Adâncimea sub pardoseală	- 2,155 m
- Înălțimea platformei de lucru	+ 4,111 m
c) Materialul de șarjă	
d) Produsul rezultat :	
Lingoul de oțel inoxidabil	
- Diametrul	≤ 500 mm
- Lungimea maximă posibilă	≤ 3000 mm
e) Capacitatea de topire	~ 400 Kg/h
f) Consumul specific de energie	~ 2 Kw/h/Kg
g) Vidul	
- vidul final realizabil cu instalația curată	$3 \cdot 10^{-2}$ Pa
- vidul în sistemul catodic	$3 \cdot 10^{-2}$ Pa
- capacitatea nominală a pompelor de vid înaintat pentru aer:	
- recipientul (la $10^{-2}$ Pa)	6 x 50 Kl/s
- tun electronic ( $10^{-1} \div 10^{-3}$ Pa)	3 x 3 Kl/s
- rata de scurgere:	
- recipient	0,7 Pal/s
- tunul (camera de generare fascicul)	0,2 Pal/s
h) Racordul de apă	
- necesarul de apă rece	~ 2000 l/min
- temperatura la intrare	≤ 28° C
- presiunea	0,4 ÷ 0,6
MPa	
- necesarul de apă caldă	~ 300 l/min.
- temperatură la intrare	50° ÷ 60° C
i) Calitatea apei	apă curată
- particulele filtrabile:	
- dimensiune	≤ 2
mm	
- conținutul	≤ 5 mg/l
- pH-ul	6,5
- duritatea permanentă	6° dH
- conținutul de fier	0,5 mg/l

- conținutul de mangan	0,3 mg/l
- conținutul de clor	350 mg/l

### 2.1.3.Descrierea procesului tehnologic

Cuptorul multicameral cu fascicul de electroni EMO 1200 R este o instalație specifică metalurgiei în vid, care asigură o topire de compactizare a deșeurilor, transformându-le în bare/lingouri. Se pot fabrica lingouri cu secțiune rotundă în funcție de cristalizatorul folosit (diametrul de 420 sau 500 mm).

Cuptorul EMO 1200 R lucrează cu un singur tun electronic, așezat vertical. Acest tun emite un fascicul de electroni axial simetric în incinta de topire. Fasciculul de electroni poate fi deviat astfel încât să asigure distribuția corectă a energiei între materialul supus topirii și baia de topire.

Materialele supuse topirii sunt încărcate manual în două instalații de șarjare dotate cu jgheaburi vibratoare ce asigură înaintarea acestora spre cristalizator. Din cele două jgheaburi de șarjare, opuse unul față de celălalt, materia primă ajunge în spațiul de acționare a fasciculului de electroni (cristalizator). Întreruperea procesului de topire poate conduce la formarea unor defecte în bloc. Energia fasciculului de electroni este repartizată băii topite, astfel încât să se mențină la o valoare constantă adâncimea dorită topiturii, pentru a realiza o omogenizare și o compactizare bună a lingoului obținut.

Formarea lingoului se realizează prin deplasarea capului de extragere treptat în jos după un program ales permițând formarea/solidificarea acestuia.

#### 2.1.3.1. Tratamente termice

Tratamentele termice aplicate oțelurilor inoxidabile au fost realizate la sediul Centrului de Cercetări și Expertizări Materiale Speciale, cu ajutorul unui cuptor cu atmosferă controlată (fig. 2.2) care are următoarele caracteristici:

Temperatură maximă de lucru: 1150 °C;

- Încărcarea maximă: 50kg;
- Programarea digitală;
- Atmosfera: amestec de gaz inert și hexafluorură de sulf la o presiune de 5-10 mbar.

Tratamentul de recoacere pentru omogenizare a vizat reducerea neomogenităților de ordin chimic datorate difuziei insuficiente a C, P, S și elementelor de aliere în cursul răcirii în lingotiere.

Pentru diminuarea microsegregațiilor intradendritice, încălzirea s-a făcut lent, cu o viteză de 80 °C/ore deoarece lingourile posedă de la turnare tensiuni interne mari care pot cauza deformări sau chiar fisurări. Temperatura de încălzire a fost de 1150 °C iar durata de menținere a fost de 6 h. Răcirea s-a realizat lent, în cuptor, cu 50 °C/ore până la 500 °C și apoi în aer.

Pentru corectarea defectelor superficiale și micșorarea durtății, în urma recoacerii lingourile au fost supuse unei reveniri la 670 – 680 °C timp de 4 ore urmată de răcire în aer.



Fig. 2.2 Cuptorul de tratamente termice cu atmosfera controlată

Călirea pentru punere în soluție a urmărit obținerea unei structuri cât mai apropiată de cea monofazică pentru a se asigura o rezistență maximă la diversele forme de coroziune. Ciclogramele de tratament termic pentru oțelurile austenitice respectiv martensitice sunt redată în fig.2.3 și 2.4.

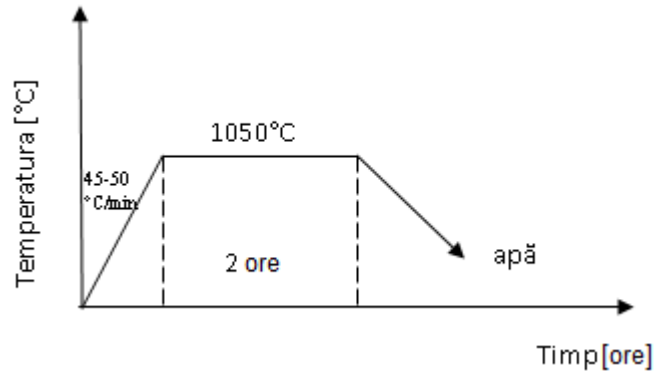


Fig. 2.3 Tratamentul de călire de punere în soluție pentru oțelurile austenitice

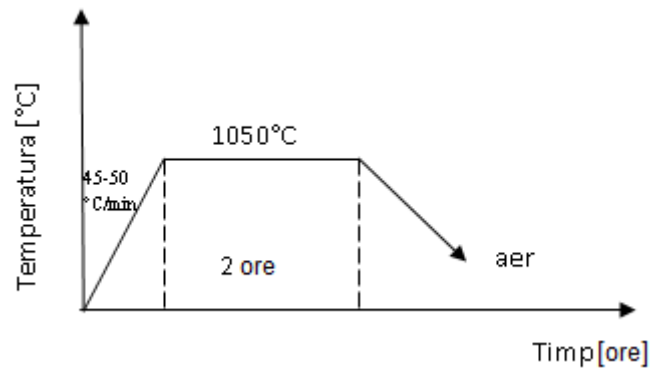


Fig. 2.4 Tratamentul de călire de punere în soluție pentru oțelurile martensitice

Probele pentru încercări mecanice (Tabel 2.1) și investigații microstructurale au fost prelevate din aceleași șarje din care au fost executate și cele care au fost testate la eroziune cavitațională. Compoziția chimică a acestora (Tabel 2.2) a fost determinată la spectrometrul de emisie optică prin scânteie tip Foundry Master, producător WAS (Germania), aflat în dotarea Centrului de Expertizări Materiale Speciale.

Pentru simplitate s-au folosit următoarele notații de identificare:

- **C1(12/0,5)** - pentru oțelul cu 12% crom și 0,5% nichel
- **C2 (12/2)** - pentru oțelul cu 12% crom și 2% nichel
- **C3 (12/6)** - pentru oțelul cu 12% crom și 6% nichel
- **C4(12/10)** - pentru oțelul cu 12% crom și 10% nichel
- **C5(12/2)\*** - pentru oțelul cu 12% crom și 2% nichel
- **C6(12/4)** - pentru oțelul cu 12% crom și 4% nichel
- **C7(12/6)\*** - pentru oțelul cu 12% crom și 6% nichel
- **C8(12/8)** - pentru oțelul cu 12% crom și 8% nichel

În tabelul 2.1 și 2.2 sunt date și caracteristicile mecanice și compozițiile chimice ale oțelurilor cercetate și oțelurilor etalon 41Cr4 și OH12NDL [9], [10].

**Tabelul 2.1** Valorile medii ale unor caracteristici mecanice

Oțelul	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	HRC	Z, %	A <sub>5</sub> , %
C1(12/0,5)	1450	1020	44	26,8	6,8
C2 (12/2)	1336	935	40	25,4	6,9
C3 (12/6)	1540	1083	46	24,8	6,3
C4(12/10)	835	626	25	32,2	11
C5 (12/2)*	968	678	29	29,3	8,2
C6 (12/4)	989	695	30	28,7	8
C7 (12/6)*	1035	725	31	30,1	8,7
C8 (12/8)	1002	701	30	31,3	8,8
41Cr4	808	790	238 HB	nedeterminate	
OH12NDL	650	400	225 HB	nedeterminate	

**Tabel 2.2** Compoziția chimică C1-C8, 41Cr4 și OH12NDL%

Symbol oțel (Cr/Ni)	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V
<b>C1 12/0,5</b>	0,121	1,5	1,36	0,018	0,02	12,08	0,5	0,185	0,51	0,073	0,095	0,075	0,087	1,2
<b>C2 12/2</b>	0,114	1,35	1,36	0,023	0,015	12,02	2,15	0,05	0,55	0,031	0,0310	0,2570	0,0340	0,0970
<b>C3 12/6</b>	0,112	1,79	1,67	0,021	0,014	12,07	5,95	0,031	0,92	0,036	0,023	0,047	0,031	0,047
<b>C4 12/10</b>	0,105	1,72	2,62	0,016	0,012	12,02	10,28	0,037	1,19	0,032	0,028	0,017	0,04	0,043
<b>C5 12/2</b>	0,036	0,642	0,204	0,007	0,013	11,957	1,97	0,036	0,062	0,046	—	0,08	0,01	0,011
<b>C6 12/4</b>	0,036	0,51	0,271	0,007	0,015	11,840	4,009	0,029	0,073	0,075	0,010	0,149	0,012	0,013
<b>C7 12/6</b>	0,036	0,461	0,28	0,007	0,012	12,059	5,597	0,039	0,064	0,077	0,002	0,073	0,009	0,009
<b>C8 12/8</b>	0,036	0,696	0,427	0,009	0,020	12,206	7,847	0,041	0,044	0,090	0,035	0,024	0,018	0,010
<b>41Cr4</b>	0,445	0,28	0,561		0,94									
<b>OH12NDL</b>	0,1	0,3	0,4	0,09	0,03	12,8	1,25			0,9				

Symbol oțel (Cr/Ni)	W	Pb	B	Sb	Sn	As	Bi	Ta	Ca	Se	N	Fe	densitate kg/m <sup>3</sup>
<b>C1 12/0,5</b>	0,058	0,0042	0,0043	0,0082	0,0130	0,0150	0,0010	0,0100	0,0009	0,0370	0,0420	81,9824	7637,66
<b>C2 12/2</b>	0,0250	0,0025	0,0086	0,0020	0,0054	0,0120	0,0010	0,0100	0,0009	0,0400	0,0720	81,7436	7667,91
<b>C3 12/6</b>	0,016	0,002	0,0025	0,0055	0,0049	0,0097	0,0010	0,0100	0,0009	0,0420	0,1990	76,9445	7659,09
<b>C4 12/10</b>	0,007	0,0056	0,0045	0,1200	0,0073	0,0190	0,0010	0,0100	0,0015	0,0500	0,0380	71,5761	7700,21
<b>C5 12/2</b>	0,083					0,0010						84,842	7765,29
<b>C6 12/4</b>	0,076					0,003						82,872	7790,13
<b>C7 12/6</b>	0,153					0,0010						81,373	7822,27
<b>C8 12/8</b>	0,146					0,010						78,341	7829,12
<b>41Cr4</b>												97,765	7809,15
<b>OH12NDL</b>												83,4	7810,0

Pentru stabilirea constituției microstructurale, care influențează comportamentul la cavitație, s-a folosit diagrama Schäffler [9], [10], [59], [1], [2], fig. 2.5. În acest scop au fost determinate conținuturile echivalente de crom și nichel. În diagrama din figura 2.5 sunt poziționate cele opt oțeluri cercetate, în vederea stabilirii cantităților aproximative de constituenți structurali.

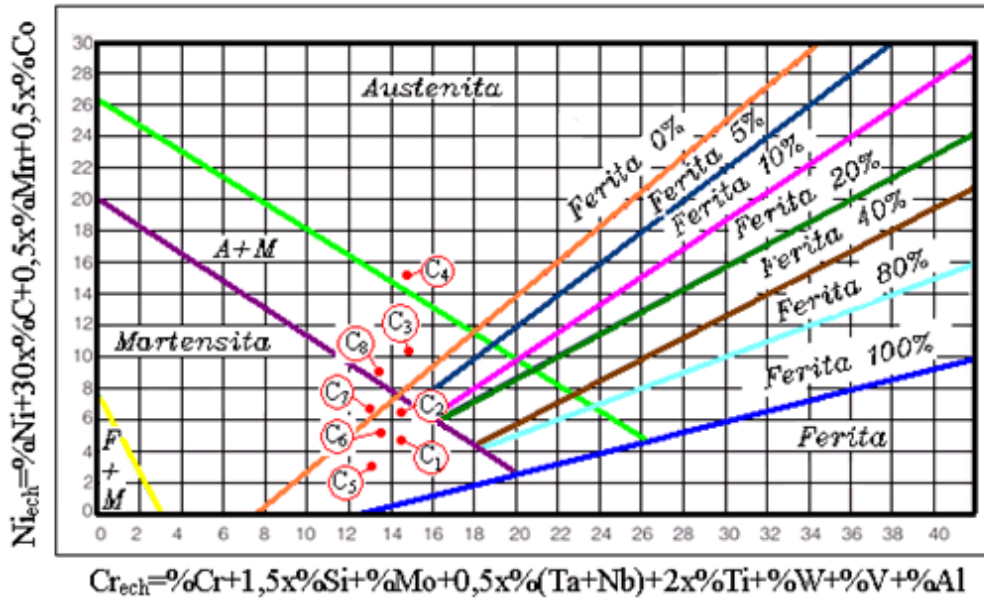


Figura 2.5 Diagrama Schäffler [59]

Constituția microstructurală, aproximativă, rezultată pe baza acestei diagrame este:

- Pentru oțelul C1(12/0,5): 75% martensită, 25 % ferită
- Pentru oțelul C2(12/2): 90 % martensită, 10 % ferită
- Pentru oțelul C3(12/6): 60 % austenită, 40 % martensită
- Pentru oțelul C4(12/10): 100 % austenită
- Pentru oțelul C5(12/2)\*: 55 % martensită, 45 % ferită
- Pentru oțelul C6(12/4): 86 % martensită, 14 % ferită
- Pentru oțelul C7(12/6)\*: 100 % martensită
- Pentru oțelul C8(12/8): 90 % martensită, 10 % austenită

În figurile de mai jos sunt prezentate microstructurile celor opt oțeluri inoxidabile, obținute la microscopul optic, înainte de atacul cavitațional. Atacul metalografic folosit pentru evidențierea microstructurii a fost de tip Vilella.



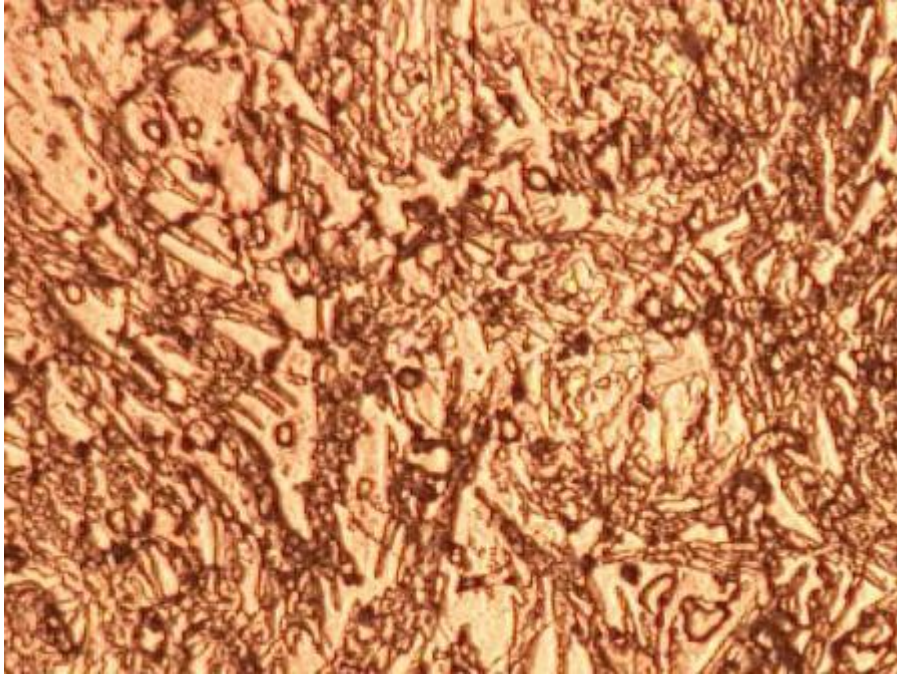


Fig. 2.6 Microstructura oțelului C1(12/0,5), ( x500)

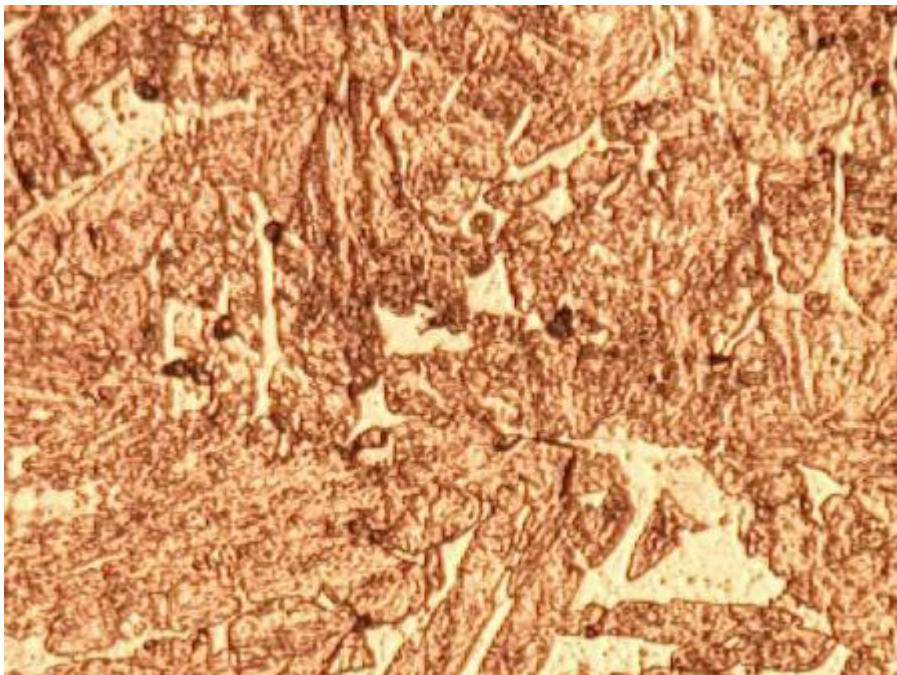


Fig. 2.7 Microstructura oțelului C2(12/2), ( x500)

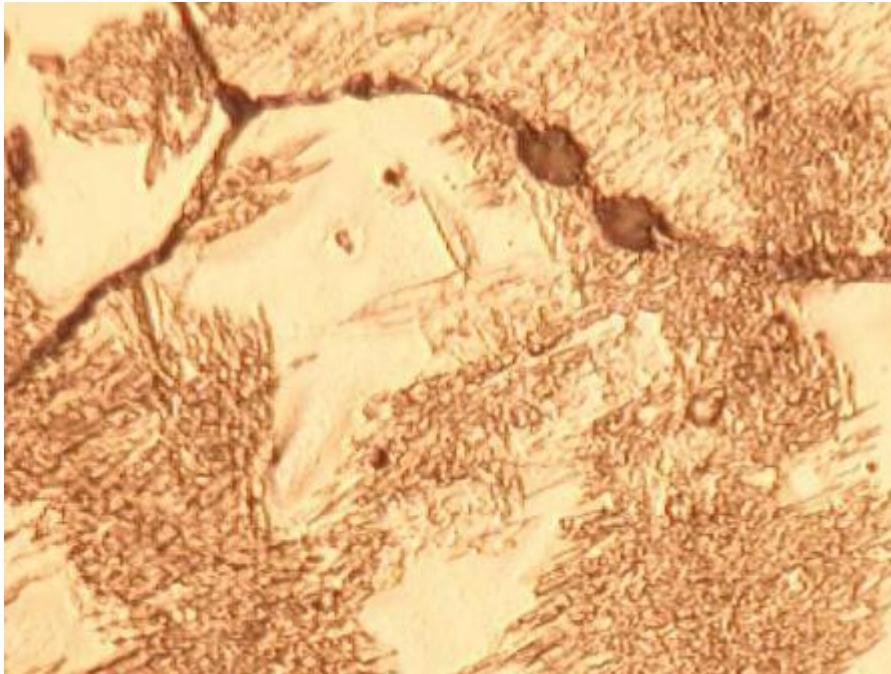


Fig. 2.8 Microstructura oțelului C3 (12/6), ( x500)

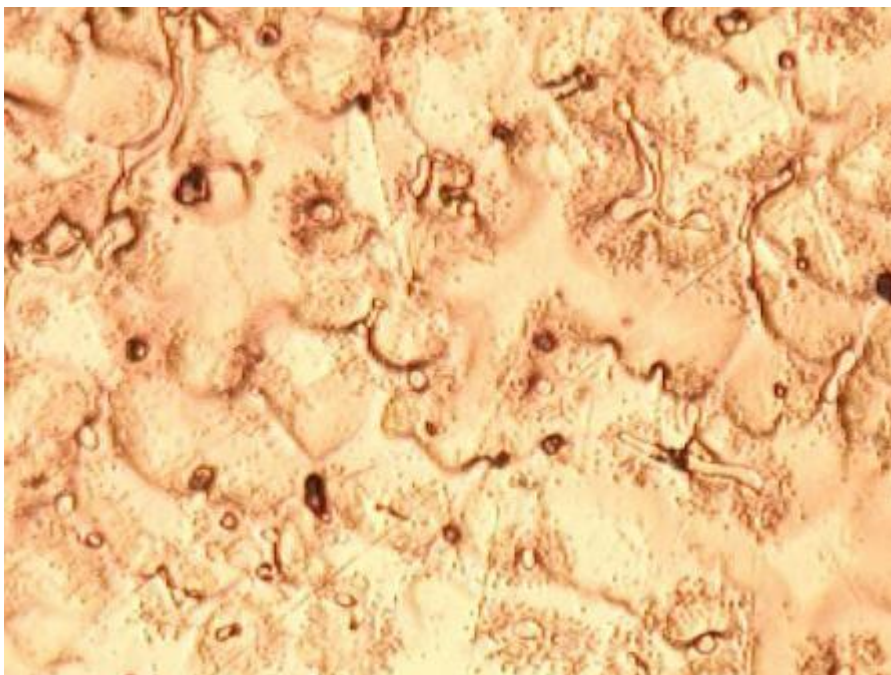


Fig. 2.9 Microstructura oțelului C4(12/10), ( x500)





Fig. 2.10 Microstructura oțelului C5(12/2)\*, ( x500)

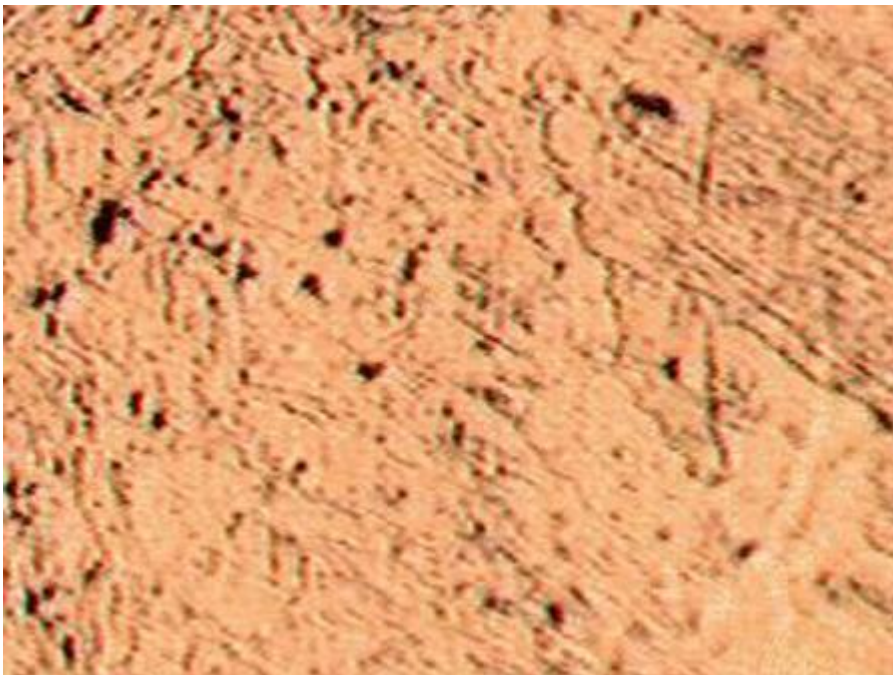


Fig. 2.11 Microstructura oțelului C6(12/4), ( x500)

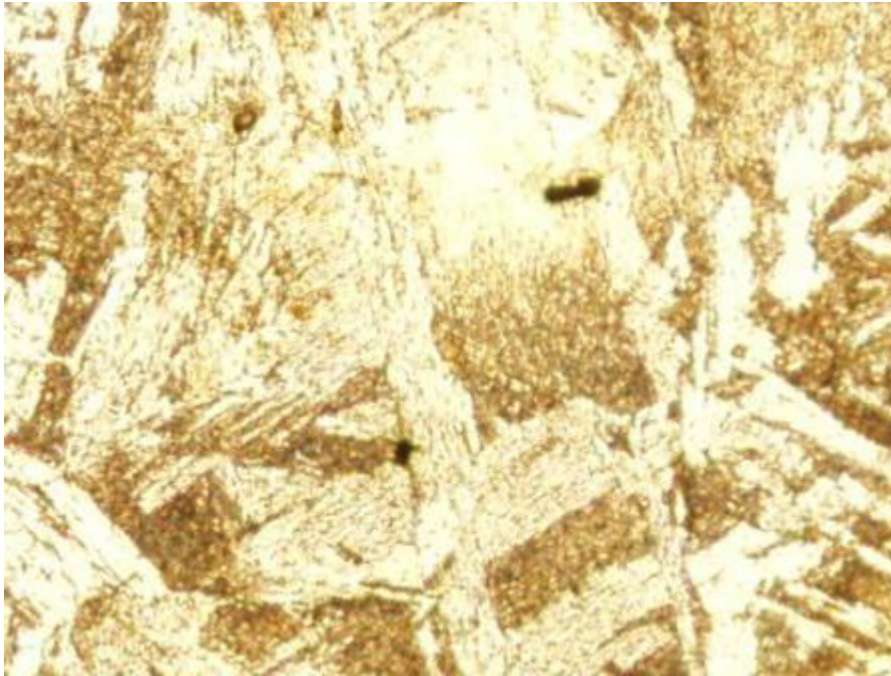


Fig. 2.12 Microstructura oțelului C7(12/6)\*, ( x500)

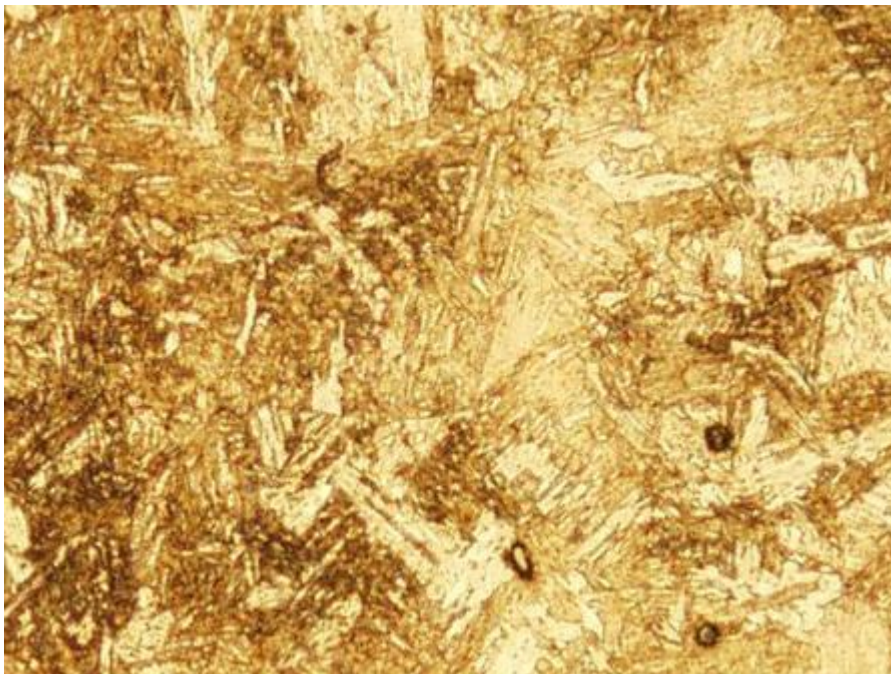


Fig. 2.13 Microstructura oțelului C8(12/8), ( x500)

## **2.2. Metodica și aparatura utilizată**

### **2.2.1. Aparatura și metoda de testare la cavitație**

Testele de eroziune cavitațională au fost efectuate în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara, pe două aparate vibratorii cu parametrii funcționali diferiți. Unul este de tip magnetostrictiv cu tub de nichel (T1), iar celălalt este cu cristale piezoceramice (T2). Studiarea suprafețelor, rezultate în urma atacului cavitațional, s-a făcut la microscopul optic Optika (mărire de 4x, 10x, 20x, 40x respectiv 80x). De asemenea, după fiecare perioadă de testare, s-au realizat fotografiile cu un aparat de fotografiat (Canon Power Shot A480), de mare rezoluție, pentru a se urmări evoluția distrugerii în suprafața expusă atacului. Masa probelor s-a măsurat cu balanța analitică Zatkłady, ce permite citirea a șase cifre semnificative.

#### **2.2.1.1. Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 (I.Potencz [10])**

Aparatul T1 (Fig. 2.14 ), construit de I. Potencz în anul 1970 [2] și îmbunătățit în perioada 2004-2008 de Bordeășu [9], are următorii parametrii funcționali:

- puterea: 500 W;
- frecvența vibrațiilor:  $7000 \pm 3\%$  Hz;
- amplitudinea dublă vibrațiilor: 94  $\mu$ m;
- diametrul probei: 14 mm (Fig. 2.16 );
- tensiunea de alimentare: 220 V/50 Hz;
- mediul lichid (orice natură);
- temperatura lichidului  $22 \pm 10$  °C;



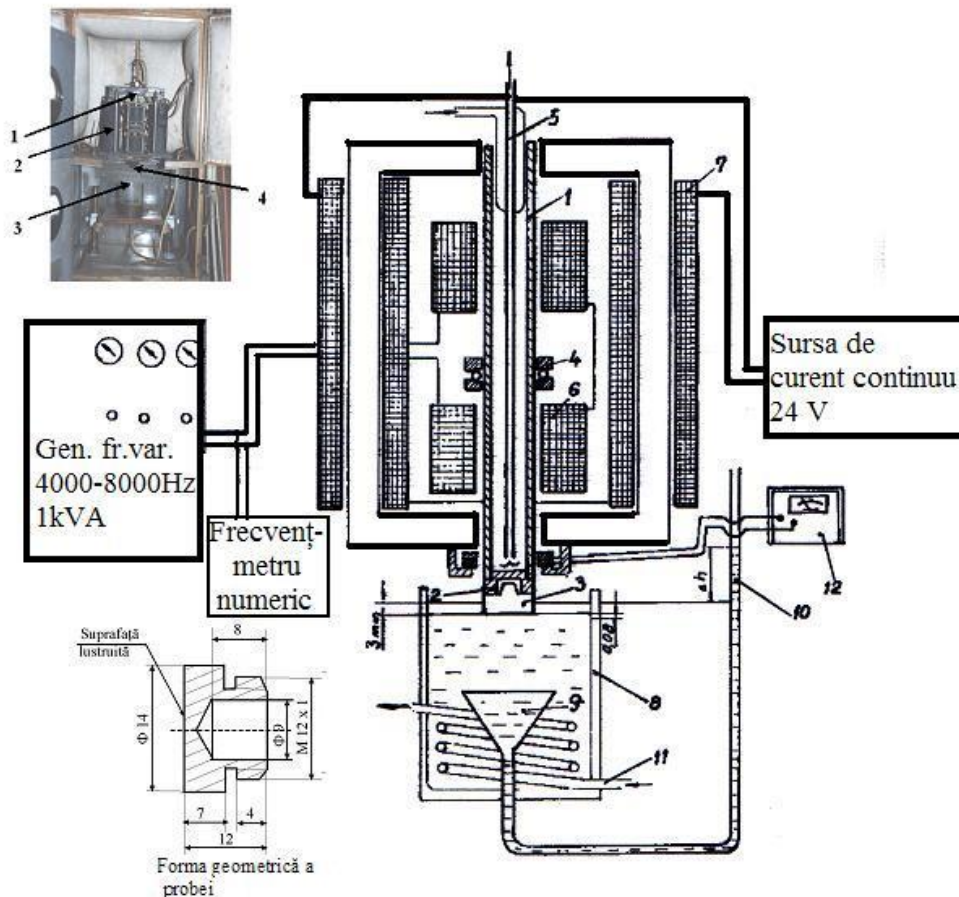


Fig. 2.14 Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1

1- tubul de nichel; 2 - piesa -fixare proba; 3 - proba; 4 - sistemul inelar fixare tub nichel; 5 -sistemul răcire tub nichel; 6 -bobine de curent alternativ; 7 - bobine de curent continuu; 8 - vasull cu lichid de lucru; 9 - pâlniea de captarea undei sonice; 10 - piezometrul; 11 - serpentina răcire; 12 - aparatul electric (voltampermetrul)

### 2.2.1.2. Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2

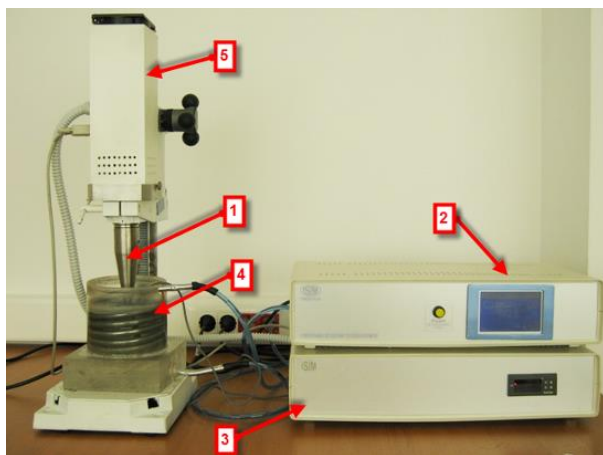
Aparatul cu cristale piezoceramice (T2), prezentat în Fig. 2.15, este construit după cerințele normelor ASTM G 32-2010, similar aparatului model de la Universitatea din Michigan [37].

Parametrii funcționali ai aparatului sunt:

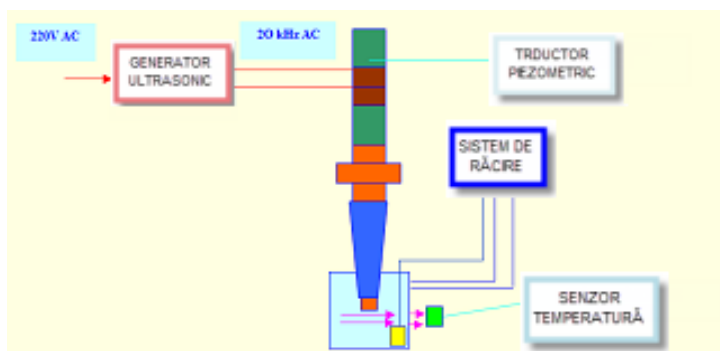
- Puterea: 500 W
- frecvența de vibrații:  $20000 \pm 2\%$  Hz
- amplitudine vibrațiilor: 50  $\mu\text{m}$
- diametrul probei: 15,8 mm (Fig. 2.19)
- tensiunea de alimentare: 220 V/50 Hz

- temperatura lichidului de lucru:  $22 \pm 10^\circ\text{C}$

În cadrul cercetărilor, testarea celor opt oțeluri inoxidabile, în ambele aparate, s-a făcut în apă potabilă de la rețea, din considerentul că este cea mai apropiată de mediul în care sunt exploatate pompele și turbinele hidraulice.



a) imaginea de ansamblu



b) schema funcțională

Fig. 2.15 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2

1-sonotrada, 2-sistemul electronic, 3-regulatorul de temperatură a apei, 4-vasul cu lichid și serpentina de răcire, 5-sistemul de ventilație

În fig. 2.16 se prezintă componența structurală a sistemului mecanic vibrator al aparatului T2

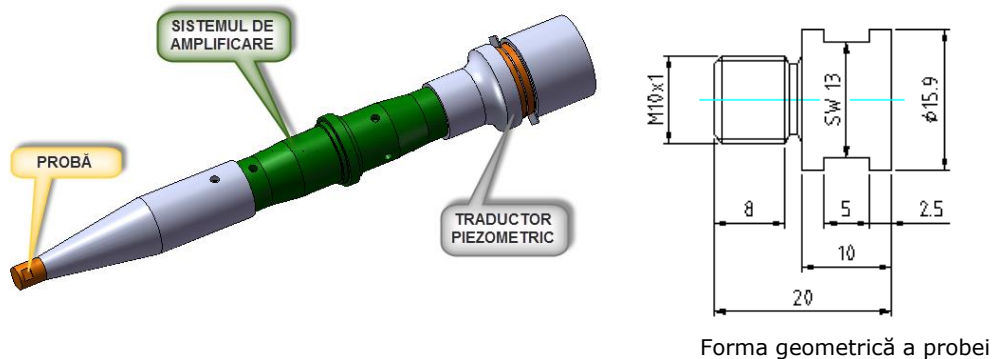


Fig. 2.16 Sistemului mecanic.

### 2.2.1.3. Microscopul Optika

Încercările de eroziune cavitațională, conform procedurii impuse în cadrul laboratorului și prevederilor normelor ASTM [123], sunt întrerupte la intervale regulate de timp în vederea examinării suprafețelor atacate cavitațional. Examinarea acestora se face cu ajutorul microscopului optic, Fig. 2.17 și pe baza microfotografiilor realizate cu aparatul de fotografiat (Canon Power Shot A480). Astfel, se obțin imagini ale evoluției eroziunii cavitaționale din zona atacată cavitațional. Microscopul, de înalte performanțe, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație din UPT, poate mări imaginea de 4x, 10x, 20x, 40x respectiv 80x. Avantajul acestui microscop este că fiind racordat la calculator se pot realiza imagini de tipul celei prezentate în Fig. 2.18 (mărire 10x), care permite o profundă analiză a distrugerii microstructurale.

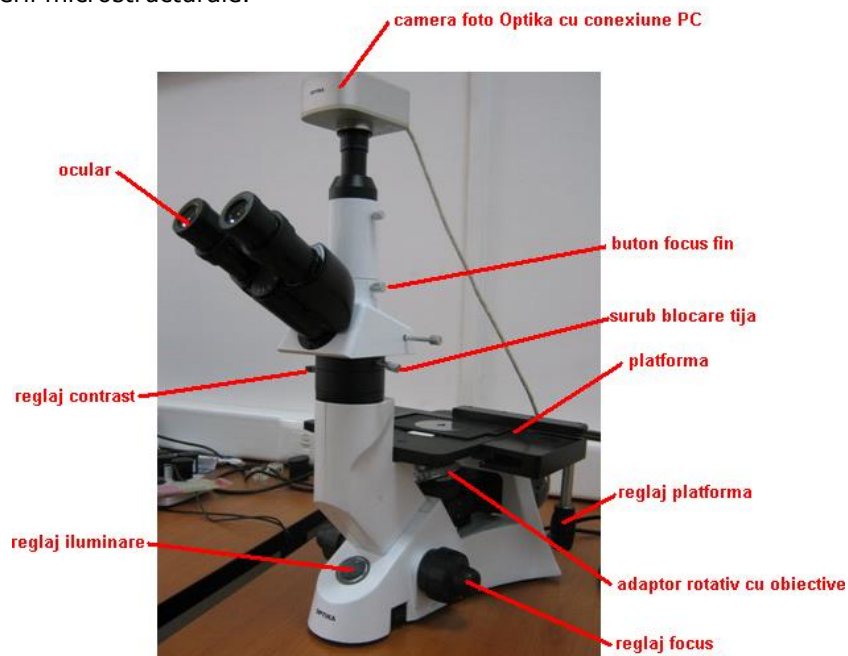


Fig. 2.17 Microscopul optic „Optika”.

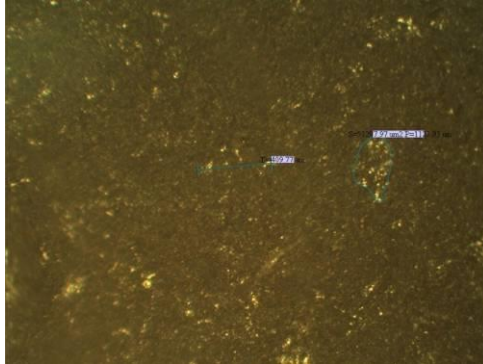


Fig. 2.18 Imagine obținută cu ajutorul microscopului optic (10x)  
(oțelul inoxidabil C3 min 90)

#### 2.2.1.4. Balanța analitică Zatkłady

Cântărirea probelor s-a făcut cu balanța analitică de tip Zatkłady WP 11, Fig. 2.19, aflată în dotarea Laboratului de Cavitație din UPT. Această balanță poate cântări mase cu o precizie de cinci zecimale.



Fig. 2.19 Balanța analitică de tip Zatkłady WP 11

### 2.2.1.5. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

Metoda de testare folosită în cercetarea eroziunii cavitaționale este în conformitate cu norma ASTM G32-10; pentru fiecare tip oțel s-au încercat câte trei probe (care provin din același semifabricat și șarjă) [123]. Probele, prelevate din semifabricatele turnate, au fost realizate în cadrul Laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara conform ASTM G32-2010. Pentru fiecare probă suprafața de atac a fost lustruită la o rugozitate de  $R_a=0,2\div 0,8 \mu\text{m}$ .

Durata totală a testării fiecărei probe a fost de 165 minute, aceasta a fost împărțită în 12 perioade (câte una de 5 și 10 minute, iar 10 de câte 15 minute).

**Precizare:** Această durată depinde de aparatul de testare, material și în funcție de timpul la care se stabilizează viteza de eroziune cavitațională, astfel încât după testare curba vitezei să aibă o formă asemănătoare celei stabilite de Thiruvengadam [10], [1], [120], fig. 1.5, considerată model de către specialiști. Cercetările efectuate în decursul a peste 60 ani în cadrul Laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara, pe aparatul magnetostriktiv T1 și cele de aproximativ 3 ani realizate cu aparatul cu cristale piezoceramice T2, au demonstrat că durata de 165 minute este suficientă pentru atingerea palierului curbei vitezei de eroziune.

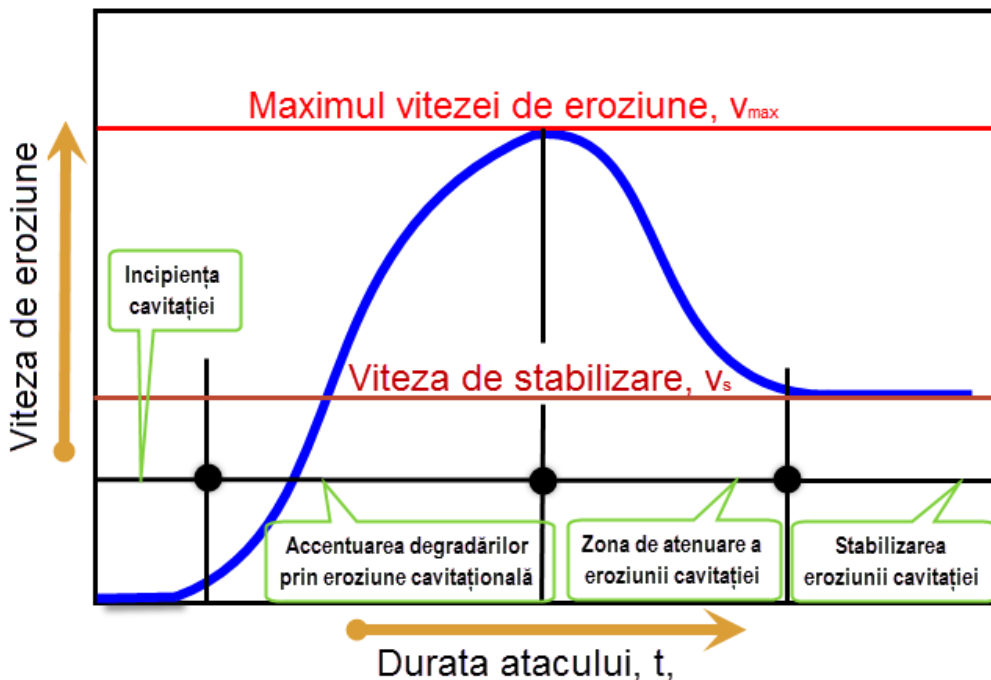


Fig. 2.20 Curba vitezei de eroziune cavitațională de forma celei stabilite de Thiruvengadam

La începutul și sfârșitul fiecărei perioade de testare, probele au fost spălate sub jet de apă (de la rețea), apă distilată, alcool, acetonă, uscate sub jet de aer cald și cântărite. Suprafețele erodate prin cavitație, la finalul fiecărei perioade, intermediară, de testare, au fost examinate la microscopul optic și fotografiate.



În timpul atacului cavitațional amplitudinea și frecvența vibrațiilor, fiecărui aparat, au fost menținute constante la valorile precizate anterior. De asemenea, temperatura lichidului de lucru, pentru toate cercetările, s-a menținut în jurul valorii de  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ .

### 2.2.2. Aparate și metode de investigare a structurii erodate prin cavitație

Toate aparatele folosite pentru investigarea metalografică a distrugerilor produse în suprafețele probelor atacate prin cavitație se află în dotarea Centrului de Cercetare și Expertizare Materiale Speciale, din cadrul Universității Politehnica din București

Determinarea adâncimii maxime de pătrundere și evidențierea modului de distrugere prin cavitație au fost realizate cu ajutorul microscopului electronic cu baleaj tip Philips XL 30 ESEM, fig.2.21.

Pentru examinări macro- și micrografice s-a utilizat microscopul Olympus SYX7, fig. 2.22.



Fig. 2.21 Microscopul electronic cu baleaj Philips XL 30 ESEM

Principalele caracteristici tehnice, ale ajutorul microscopului electronic cu baleaj tip Philips XL 30 ESEM, sunt:

Rezoluția		2 nm
Tensiunea de accelerare		0.2 to 30 kV
Tunul de electroni		Emisie de Câmp
Mărirea		15 to 500,000
Gradul de mișcare		Rotire $-15^\circ$ to $+75^\circ$
(mișcare motorizată pe 4 axe) Z	50 mm	
	X	50 mm
	Y	50 mm
Stocarea imaginilor:		Stocare digitală
		Film Polaroid

Detectori:

Modul Umed:       Detector secundar de electroni pentru mediu gazos  
                      Set de detectori secundari de mediu  
                      Detector de electroni de fundal pentru stare solidă

Modul de vid înalt:   Detector de electroni secundar Everhart-Thornley  
                          Detector de electroni de fundal pentru stare solidă

Investigațiile macro și micrografice, realizate cu microscopul OPLIMPUS SYX7, fig.2.22, care au permis evidențierea evoluției distrugerii prin cavitație în structura oțelului, s-au efectuat după finalizarea testelor de atac prin cavitație (165 minute). Pentru aceasta, suprafețele erodate au fost atacate metalografic, iar probele au fost secționare axial. Investigarea distrugerilor s-a realizat atât în suprafața secționată cât și neseționată.

Microscopul este dotat cu un sistem de mărire zoom care îi permite realizarea de mai multe mărimi. Distanța de lucru este mai mare decât cea a unui microscop complex tipic, permițând ca investigarea să se facă pe probă în timp ce aceasta este observată prin microscop (de unde numele "microscop de analiză"). Acest stereomicroscop are un design modular care permite implementarea unei varietăți de oculare, obiective și tehnici de iluminare în funcție de scopul utilizării.



Fig. 2.22 Microscopul OPLIMPUS SYX7

Tăierea probelor, axial și perpendicular pe suprafața atacată, s-a făcut cu aparatul de tăiat cu pânză și lichid de răcire de tip Buehler 4000, fig. 2.23.



Fig. 2.23 Aparatul de taiat cu pânză BUEHLER 4000

Pentru a putea realiza investigațiile metalografice, probele au fost înglobate la cald în rășina polimerică cu aparatul de tip Buehler Simplimet 1000 (Fig. 2.24).



Fig. 2.24 Aparatul de înglobat la cald BUEHLER SIMPLIMET 1000

Șlefuirea și lustruirea probelor înglobate s-a făcut pe aparatul Buehler Phoenix Beta (fig. 2.25) care este echipat cu un cap de șlefuire/lustruire Buehler Vector.



Fig. 2.25 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta

## 2.3. Rezultate experimentale

### 2.3.1. Curbe caracteristice. Model analitic

Pentru descrierea comportamentului la cavitație, a fost necesară construirea unui model pentru curba de aproximare a punctelor experimentale, a căror dispersie este dictată, în mare măsură, de constituenții structurali, compoziția chimică și proprietățile fizico-mecanice ale oțelurilor [10], [16], [17], [72], [62], [81].

Relațiile de construire a curbelor de aproximație a punctelor experimentale pentru mase și viteze au fost construite cu metoda dezvoltată în cadrul proiectului de Cercetare IDEI [44], în colaborare cu matematicianul lector. dr. Pătrășcoiu C-tin, de la Universitatea din Craiova.

Cercetările de eroziune cavitațională efectuate asupra unor game largi de materiale, indiferent de stațiunea sau aparatul utilizat, sugerează că evoluția pierderilor masice cu timpul de atac este aproximativ liniară, fig.2.26, iar pentru curbele vitezelor de eroziune variația cu timpul de atac este foarte diferită, fig.2.27 [108].

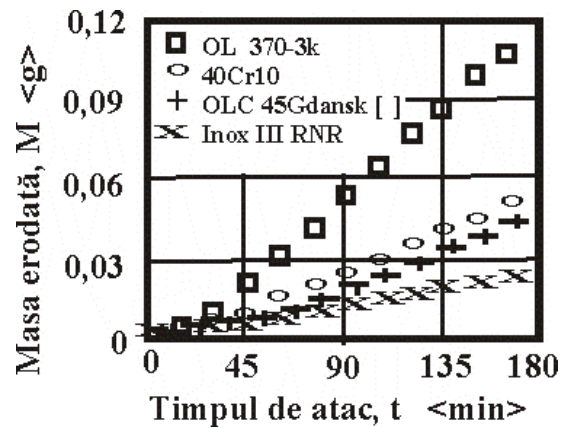


Fig. 2.26 Variația pierderilor masice cu timpul de atac

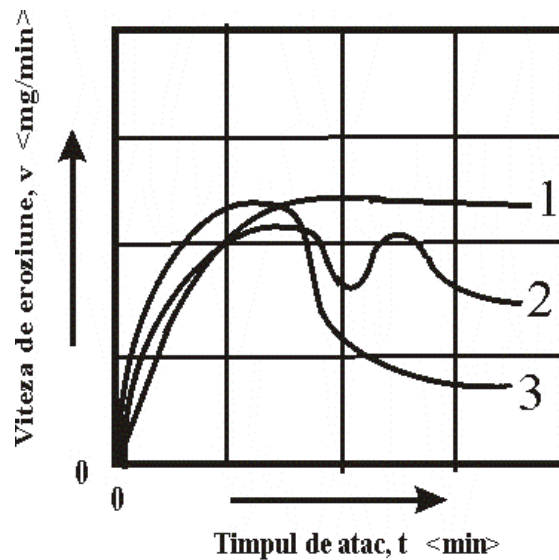


Fig. 2.27 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac (tipuri de curbe)

Variația aproximativ liniară a pierderilor masice poate fi descrisă de soluția următoarei ecuații diferențiale liniare [9],[10]:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m}{t} + Kte^{-Bt}, \quad t \geq 0, \quad B > 0 \quad (2.1)$$

După valorile lui K avem două cazuri:

Cazul I:  $K > 0$

Notând  $K = B \frac{K}{B}$ , respectiv  $\frac{K}{B} = A > 0$  ecuația (1) devine:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{m}{t} + ABte^{-Bt}, \quad t \geq 0 \quad (2.2)$$

a cărei soluție generală este:

$$\begin{aligned} m(t) &= e^{\int \frac{1}{t} dt} (C + AB \int te^{-Bt} e^{-\int \frac{1}{t} dt} dt) = e^{\ln t} (C + AB \int te^{-Bt} e^{-\ln t} dt) = \\ &= t(C + AB \int te^{-Bt} \frac{1}{t} dt) = t(C + A \int Be^{-Bt} dt) = t(C - Ae^{-Bt}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Deci:

$$m(t) = t(C - Ae^{-Bt}) \quad (2.4)$$

Viteza eroziunii cavitaționale este:

$$v(t) = \frac{dm(t)}{dt} = C + Ae^{-Bt}(Bt - 1) \quad (2.5)$$

Cum la  $t = 0$  masa erodată este  $m = 0$  rezultă:

$$C = A \quad (2.6)$$

A este un parametru de scară stabilit statistic pentru construirea curbei de aproximație, cu condiția ca abaterile punctelor experimentale față de această curbă să fie minime.

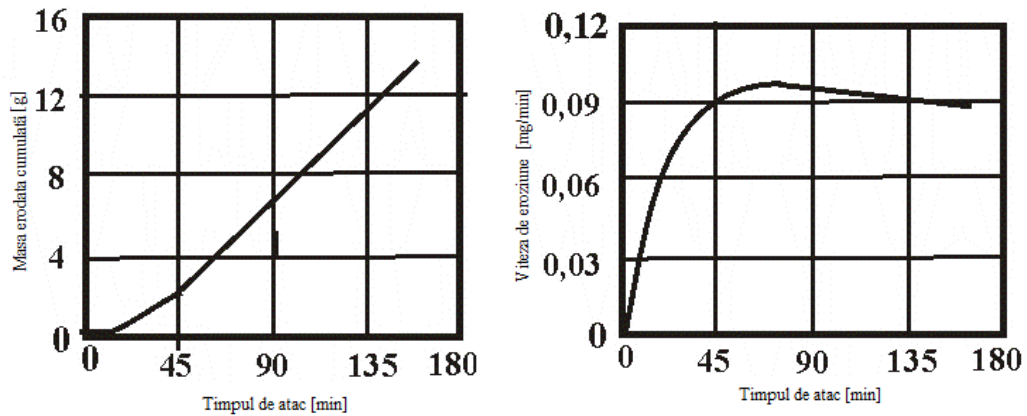
B-este un parametru de formă, definit astfel:

$$B = \frac{-\ln[1 - \frac{m_{tot}}{A \cdot t_{fin}}]}{t_{fin}} \quad (2.7)$$

$t_{fin}$ - durată totală

$m_{tot}$ - masă erodată cumulată

În fig.2.28 se prezintă curbele teoretice  $m(t)$  și  $v(t)$  construite cu relațiile (2.4) și (2.5) folosind pentru coeficienții A și B valori arbitrare ( $A = 0,084$ ;  $B = 0,024$ ).



a) Masa erodată

b) Viteza de eroziune

Fig. 2.28 Curbele teoretice

Deoarece, formele curbelor din fig.2.28 sunt în concordanță cu distribuția punctelor experimentale din fig.2.26 și formele curbelor vitezei de eroziune indicate de literatură, fig.2.27, arata că relațiile (2.4) și (2.5), corespunzătoare cazului  $K > 0$ , pot fi utilizate pentru descrierea curbelor caracteristice de cavitație.

**Cazul II:  $K < 0$** 

Notând  $K = B \frac{K}{B}$ , respectiv  $\frac{K}{B} = -A$ ,  $A > 0$  ecuația (2.1) devine:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{1}{t} m - ABte^{-Bt}, \quad t \geq 0 \quad (2.8)$$

a cărei soluție generală este:

$$m(t) = t(C + Ae^{-Bt}) \quad (2.9)$$

Viteza de eroziune cavitațională, în acest caz, este:

$$v(t) = \frac{dm(t)}{dt} = C - Ae^{-Bt}(Bt - 1) \quad (2.10)$$

În fig.2.29 se prezintă curbele teoretice  $M(t)$  și  $v(t)$  construite cu relațiile (2.9) și (2.10) folosind pentru coeficienții  $A$  și  $B$  valori arbitrare.

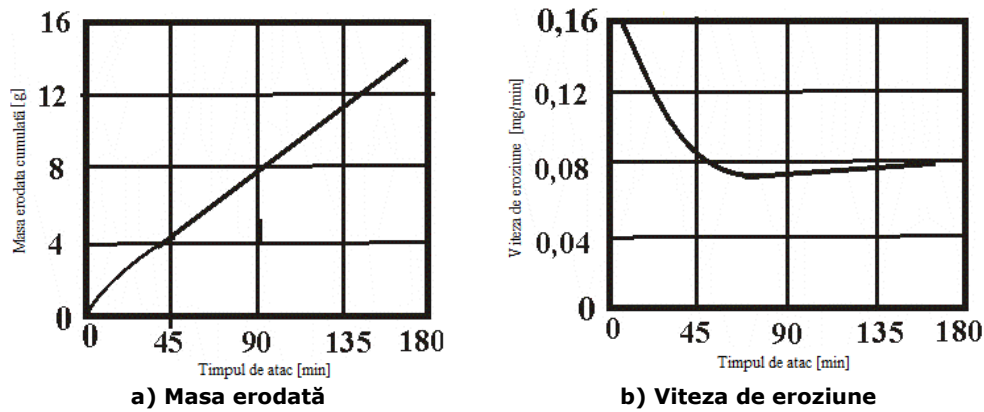


Fig. 2.29 Curbele teoretice

Din fig.2.29 se observă că variația masei de eroziune are o evoluție puțin diferită de cea sugerată de distribuția punctelor experimentale din fig.2.26, însă variația vitezei de eroziune este complet diferită de cele indicate în fig.2.27. Din acest motiv se va renunța la formulele (2.9) și (2.10), corespunzătoare cazului  $K < 0$  și se vor utiliza doar relațiile (2.4) și (2.5), deoarece este în concordanță cu evoluția reală a curbelor.

Metoda de calcul a curbelor de aproximare, descrisă mai sus, poate fi utilizată și la descrierea evoluției în timpul atacului și a altor parametri ai eroziunii cavitației, cum sunt adâncimea medie de eroziune  $MDE(t)$  și viteza medie de eroziune a cavitației,  $MDER(t)$ .

### 2.3.2. Oțelurile testate pe aparatul vibrator magnetostrictiv T1

În diagramele de mai jos sunt prezentate curbele caracteristice de eroziune cavitațională, ce dau variațiile cu timpul de atac a pierderilor masice  $m(t)$  și vitezei pierderilor masice  $v(t)$ , pentru cele opt oțeluri testate pe stațiunile T1 și T2.

Pe aceste diagrame sunt trecute punctele experimentale ale celor trei probe testate.

Pierderile masice pe fiecare perioadă de atac  $\Delta m_i$  au fost determinate cu balanța analitică, iar vitezele de eroziune aferente au fost determinate cu relația:

$$v_i = \frac{\Delta m_i}{\Delta t_i} \quad (2.11)$$

unde:

$\Delta m_i$  - pierderea de masă corespunzătoare perioadei de atac al cavitației

$\Delta t_i$  - durata perioadei de atac (5, 10, respectiv 15 minute)

Deoarece, din fiecare oțel s-au testat câte trei probe, conform cerințelor

ASTM G32- 2010, în aceste diagrame sunt folosite următoarele notații:

- Ci1 reprezintă proba unu
- Ci2 reprezintă proba doi
- Ci3 reprezintă proba trei
- Ci reprezintă curba de aproximare, calculată cu relația (2.4) - pentru pierderile masice cumulate, respectiv (2.5) - pentru vitezele de eroziune.
- i reprezintă numărul de ordine al oțelului



De asemenea, în aceste diagrame sunt atașate imagini (provenite de la o singură probă) cu evoluția eroziunii în suprafața atacată la timpii caracteristici, precum și nivelul abaterii standard, pentru zona de stabilizare a vitezei de eroziune (care diferă de la oțel la oțel).

Relația cu care s-a determinat această abatere este:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^e [v_i - v_s]^2}{n}} \quad (2.12)$$

unde:

$i = 5, 6, 7$ , sau  $8$ , funcție de valoarea de la care viteza de eroziune începe să se stabilizeze

$n = 8, 7, 6$ , sau  $5$

$e=13$

#### -oțelul C1

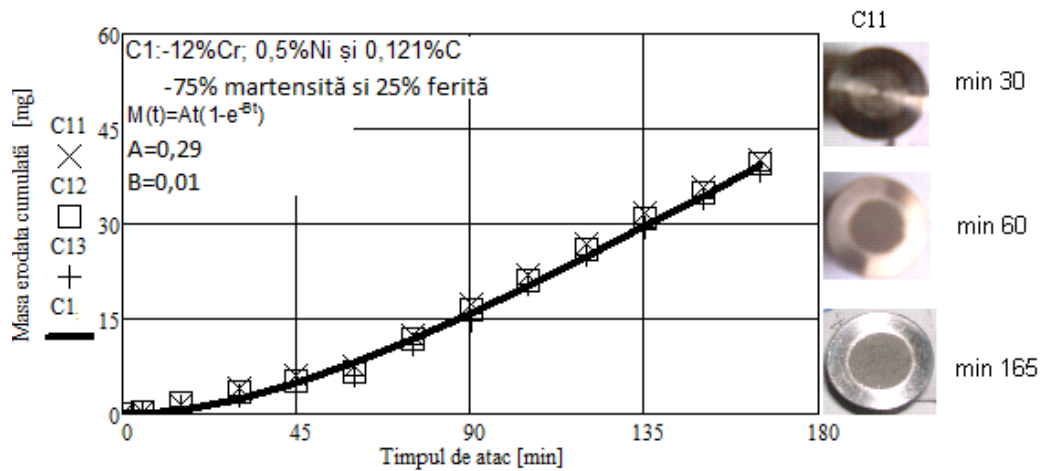


Fig. 2.30 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1, testat pe aparatul T1

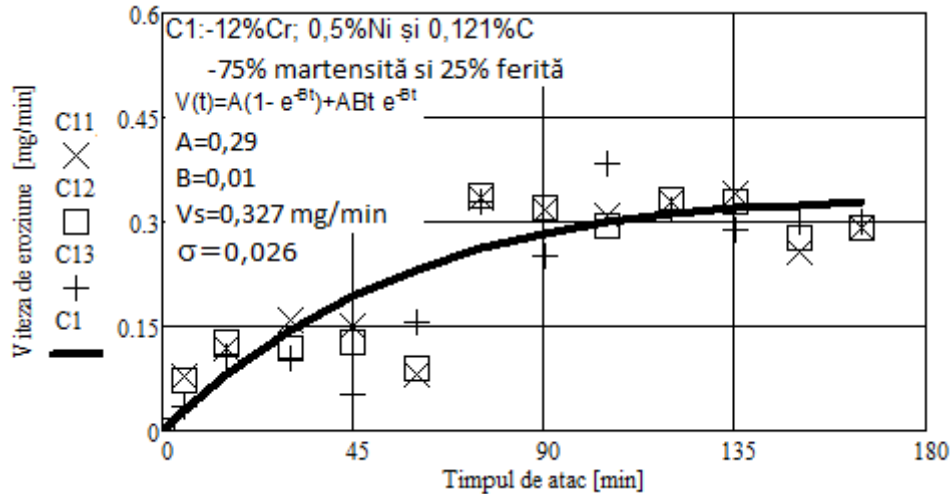


Fig. 2.31 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1, testat pe aparatul T1

Din figurile 2.30 și 2.31 putem observa că distribuția majorității punctelor experimentale, față de curba de aproximație a oțelului C1, atât pentru pierderea masică cât și pentru viteza de eroziune, este aproximativ uniformă. Această uniformitate este dată de proprietățile mecanice bune (HRC 44,  $R_m = 1450 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0.2} = 1020 \text{ N/mm}^2$ ) și de structura oțelului, formată dintr-o proporție redusă de ferită în rețea de martensită (martensita 75% și ferită 25%). Punctele experimentale, care au valori sensibil diferite de curba teoretică de aproximare (ex. la min. 45 și min. 105), sunt cauzate de ruperea legăturilor inter și transcristaline și expulzării, în primul rând a grăunțurilor de ferită, de dimensiuni ceva mai mari, așa cum se va vedea în subcapitolul 2.5. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, spre valoarea  $V_s = 0,327 \text{ mg/min}$ .

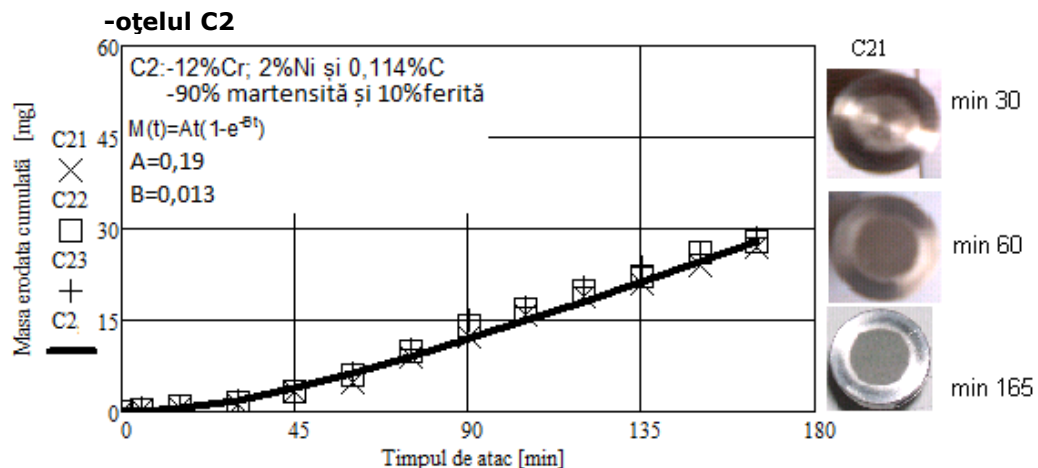


Fig. 2.32 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T1

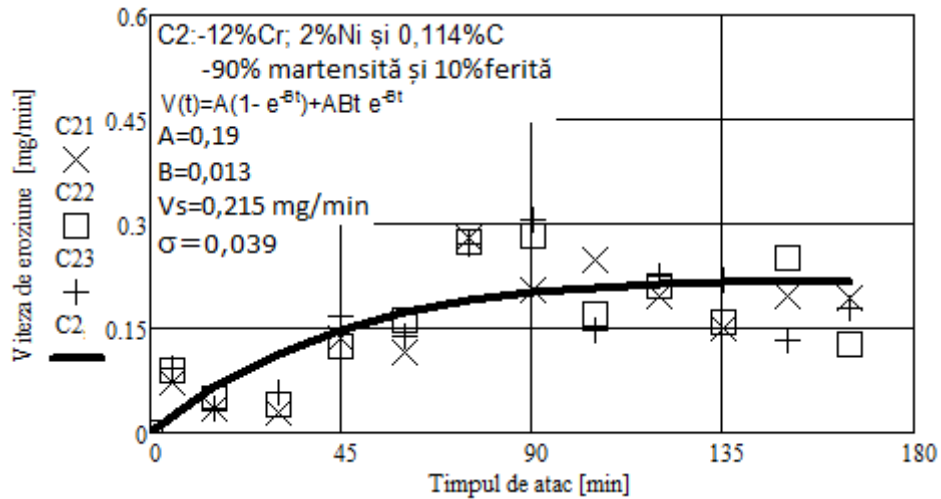


Fig.2.33 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T1

La oțelul C2 pierderea masică (fig. 2.32) și viteza de eroziune (fig. 2.33), experimentale, sunt aproximativ uniforme până la minutul 75, după care apar expulzările de grăunți sau bucăți din aceștia, de dimensiuni foarte diferite, conducând la o neuniformitate accentuată a dispersiei, față de curba de aproximație. Acest aspect arată și modul în care s-a utilizat energia absorbită de material, în timpul procesului eroziv. Apreciez că principala cauză a acestei dispersii mari o reprezintă structura oțelului (martensita 90% și ferită 10%). În prima parte, ca urmare a cantității ridicate de martensită, legătura acesteia cu grăunții de ferită este destul de puternică, motiv pentru care și dispersia este mai redusă. Atacul repetat al undelor de șoc ale microjeturilor generate în timpul cavitației, prin implozia bulelor, face ca aceste legături să fie rupte și să fie expulzați grăunți, în special de ferită, cu dimensiuni foarte diferite (fenomenologia degradării este detaliată la subcapitolul 2.5), explicând astfel dispersia mare a punctelor măsurate față de curba de aproximație. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, spre valoarea  $V_s = 0,215 \text{ mg/min}$ .

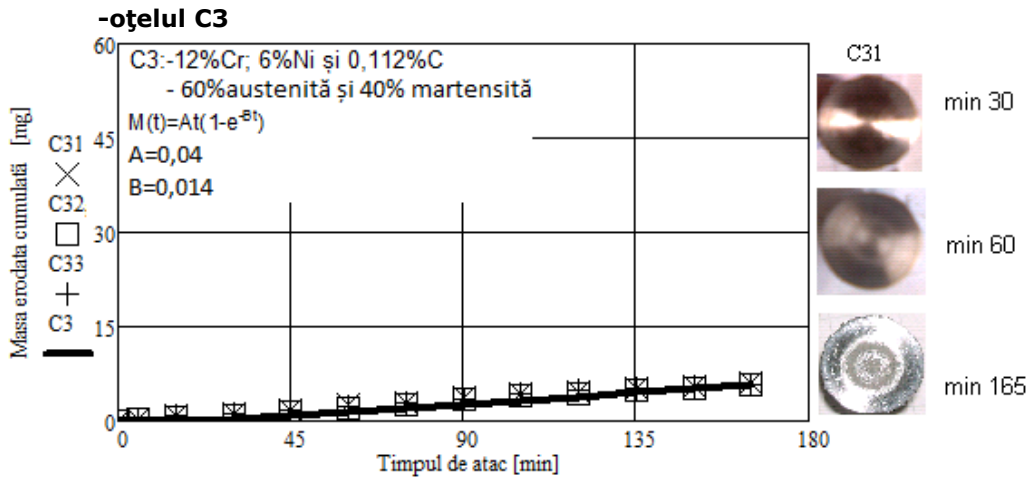


Fig. 2.34 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T1

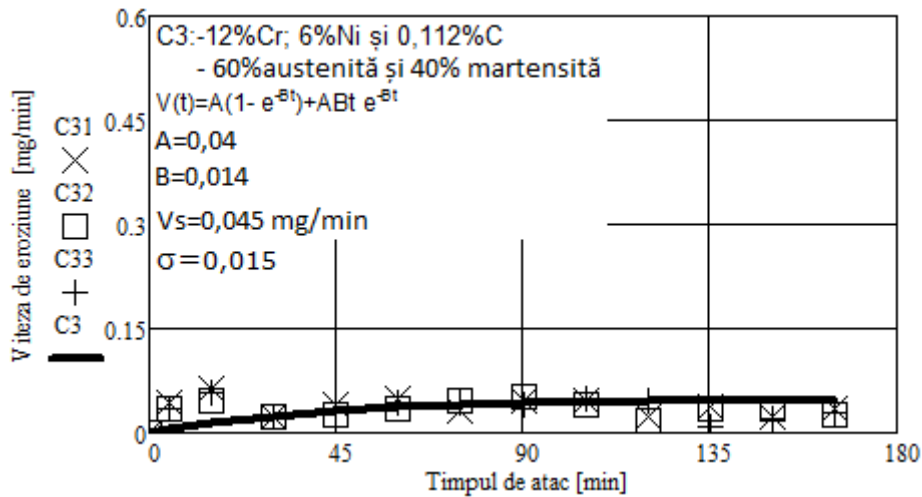


Fig.2.35 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T1

La oțelul C3 se poate observa că pierderea masică (fig. 2.34) și viteza de eroziune (fig. 2.35) sunt neuniforme în prima și ultima parte a atacului. Cum proprietățile mecanice au valori mai mari ( $HRC\ 46$ ,  $R_m = 1540\text{N/mm}^2$ ,  $R_{p0.2} = 1083\text{N/mm}^2$ ), în raport cu celelalte oțeluri cercetate, consider că acest comportament este cauzat de rugozitatea suprafeței atacate și constituția structurală. În prima parte neuniformitatea este dată de ruperea vârfurilor asperităților de pe suprafața de atac, iar în ultima parte de expulzarea grăunților de austenită/martensită sau a părților din aceștia. Totuși, datorită structurii formată din austenită (care prin impactul mecanic, repetat cu undele de șoc și microjeturile, generate pe parcursul cavitației, poate trece în martensită) și martensită, dispersia față de curba de aproximație, este mult redusă față de cea înregistrată la oțelurile C1 și C2. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea de  $V_s = 0,045\text{mg/min}$ .

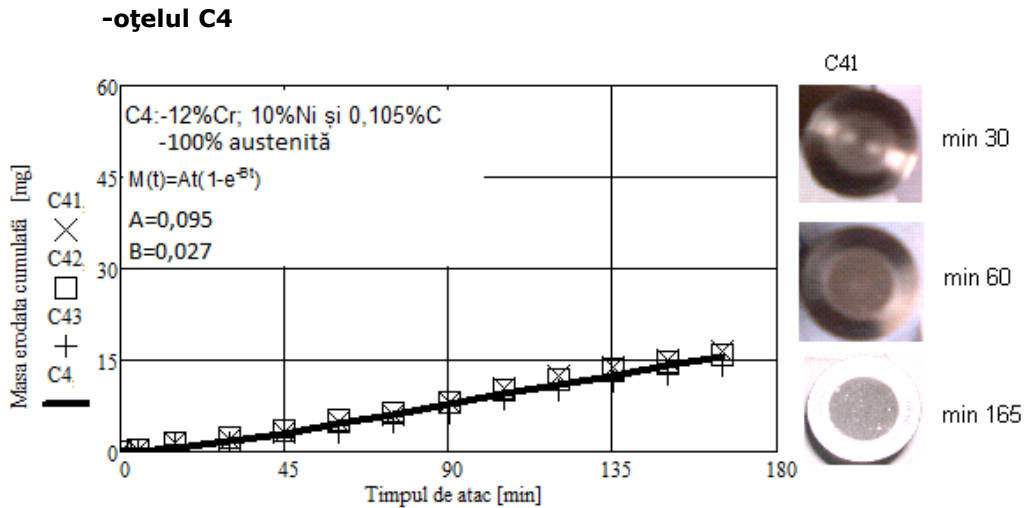


Fig. 2.36 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T1

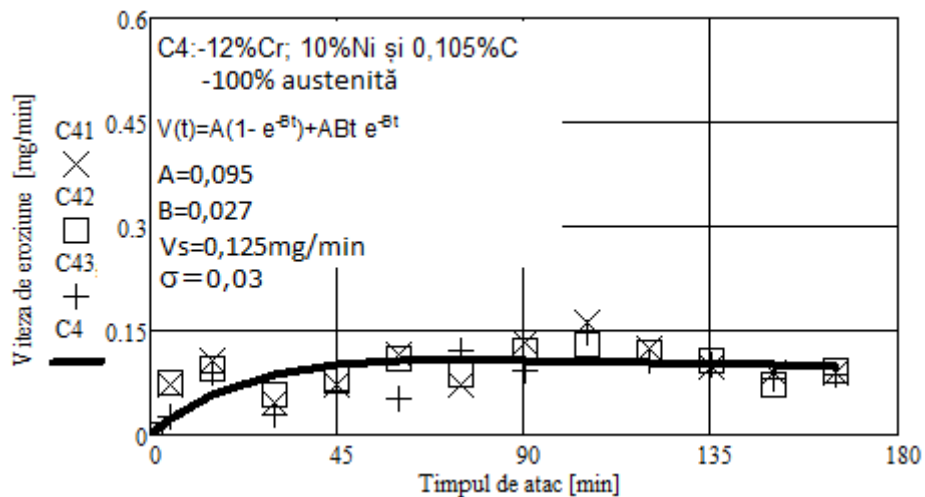


Fig.2.37 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T1

Din fig. 2.36 și 2.37 se observă că dispersia punctelor măsurate, față de ambele curbe de aproximație (pierderea masică și viteza de eroziune) sunt mari și neuniforme în intervalul 30-90 min. Apreciez că acest mod de comportament se datorează, probabil, neuniformității structurii de austenită (100%) formată din grăunți de dimensiuni diferite, rezultați din procesul de turnare. După distribuția punctelor experimentale față de curba de aproximație, se observă dispersia cea mai ridicată și neuniformă este în intervalul (45 -90 ) minute de atac al cavitației. După minutul 90 suprafața atacată, datorită specificului austenitei, începe să se durifice, ceea ce face ca această distribuție să fie mai uniformă. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea  $V_s=0,125\text{ mg/min}$ .

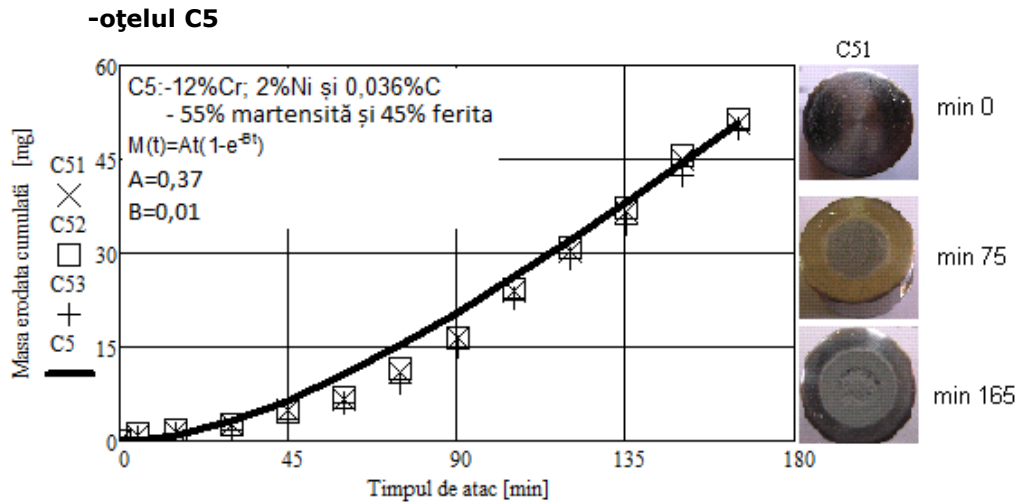


Fig. 2.38 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T1

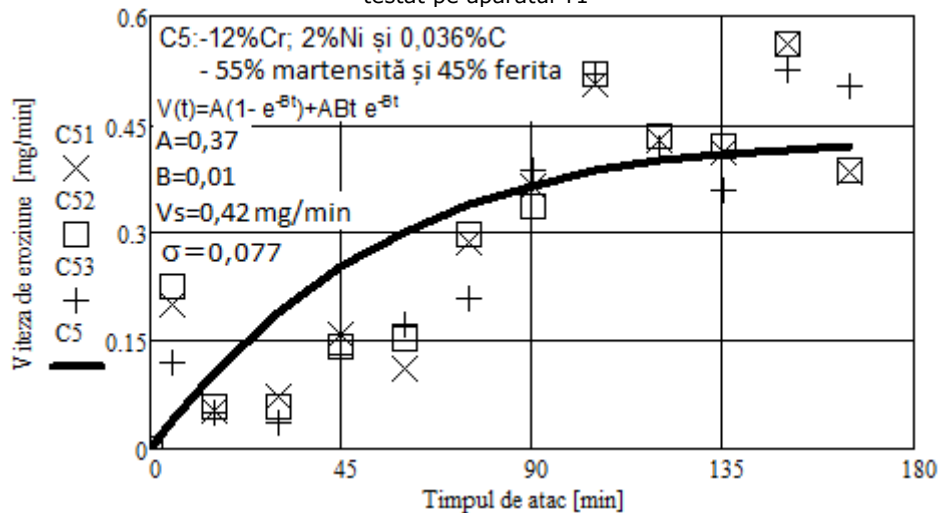


Fig.2.39 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T1

Dispersia punctelor experimentale față de curba de aproximație, pentru pierderea masică (fig. 2.38) și viteza de eroziune (fig. 2.39), arată că oțelul inoxidabil C5 are un comportament neuniform pe toată durata atacului. Acest tip de comportament este cauzat pe de o parte de proprietățile mecanice mai scăzute (HRC 29,  $R_m = 968 \text{ N/mm}^2$ ,  $R_{p0.2} = 678 \text{ N/mm}^2$ ), iar pe de altă parte de cantitatea cea mai ridicată de ferită (martensită 55% și ferită 45%), dintre toate oțelurile studiate. Această structură face ca oțelul să aibă expulzări de grăunți sau părți mari din aceștia încă din minutul 30 al atacului cavitației. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea  $V_s = 0,42 \text{ mg/min}$ .

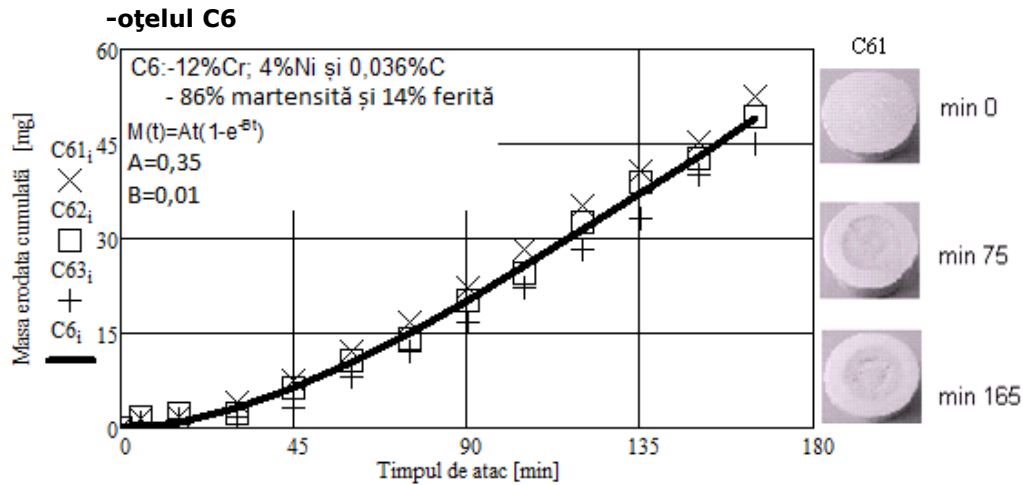


Fig. 2.40 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T1

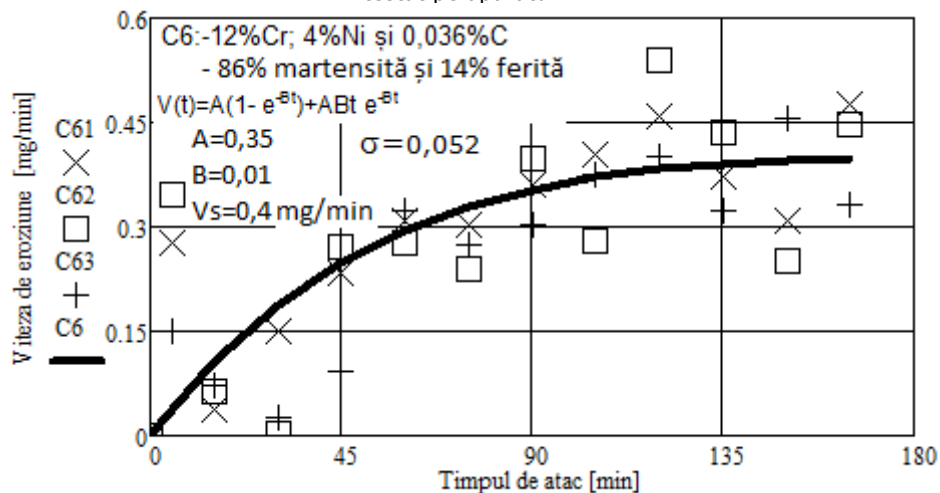


Fig.2.41 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T1

Evoluțiile curbelor de aproximație și dispersiile punctelor experimentale față de acestea (fig. 2.40 și fig. 2.41) arată că oțelul C6 are un comportament aproape similar oțelului C5. Cum proporția de ferită, la oțelul C6, este mult redusă față de cea de la oțelul C5 (de aproximativ 3 ori), iar comportamentul este aproximativ identic, duce la ideea că comportamentul este determinat de valorile mai mici ale caracteristicilor de plasticitate ( $Z = 28,7 \%$  și  $A_5 = 8\%$ ). De asemenea, dispersia punctelor experimentale, față de curba de aproximație, arată că structura este una grosolană, caracterizată prin grăunți de mari dimensiuni, specific semifabricatelor turnate [18]. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea  $V_s = 0,4 \text{ mg/min}$ .



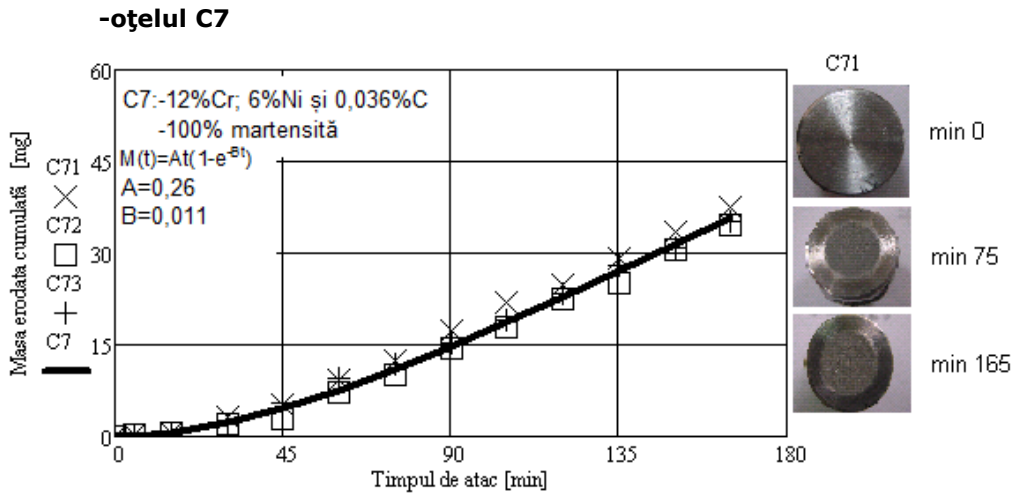


Fig. 2.42 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T1

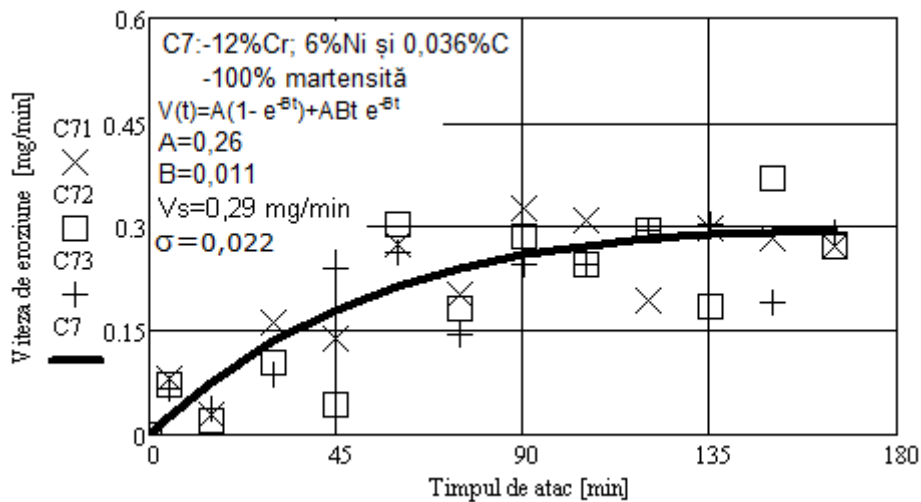


Fig.2.43 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T1

Spre deosebire de oțelurile anterioare oțelul C7 comportamentul său, după dispersia punctelor experimentale față de curbele de aproximație, în special la viteza de eroziune (fig. 2.43), este unul uniform, constant pe parcursul atacului realizat timp de 165 minute. Apreciez că această uniformitate se datorează caracteristicilor mecanice ridicate și microstructurii oțelului care este 100% martensită. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea  $V_s=0,29$  mg/min.

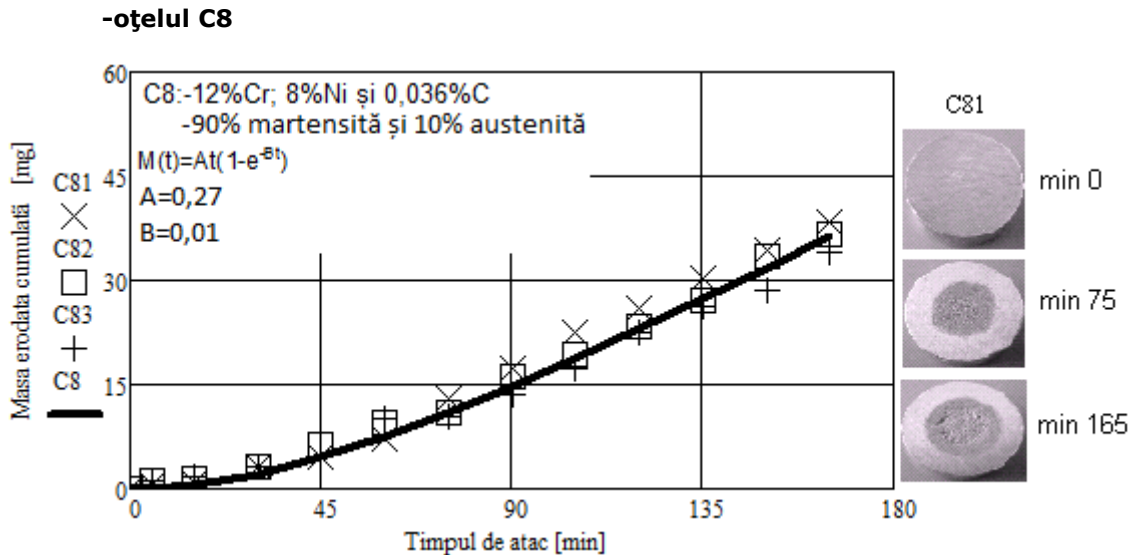


Fig. 2.44 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T1

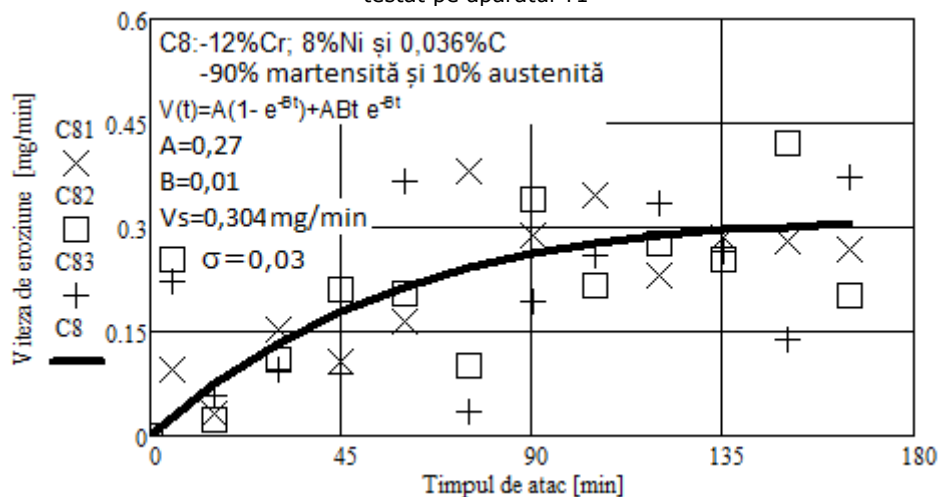


Fig.2.45 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T1

Analiza evoluției curbelor de aproximație și dispersia punctelor experimentale (fig. 2.44 și 2.45) arată că oțelul C8 are un comportament neuniform doar în prima parte a atacului (până la minutul 60). Comportamentul uniform, apropiat de al oțelului C7, după minutul 60 al atacului cavitației, este unul firesc, ca urmare a constituției structurale (90% martensită și 10% austenită) și caracteristicilor de plasticitate ridicate ( $Z = 31,3 \%$ ,  $A_5 = 8,8 \%$ ). Consider că neuniformitatea din primele minute ale cavitației este cauzată de îndepărtarea vârfurilor rugozităților suprafeței și de producerea fisurilor/ruperea legăturilor inter și transcristaline ce determină expulzări de grăunți, de diverse dimensiuni, sau părți din aceștia. După minutul 60, ca urmare a durificării stratului de material din

suprafața atacată pierderile devin aproximativ constante pe fiecare perioadă de atac. Viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, la valoarea  $V_s=0,304$  mg/min.

În figurile de mai jos sunt date curbele caracteristice obținute la testarea acelorși oțeluri în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2.

### 2.3.3. Oțelurile testate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2:

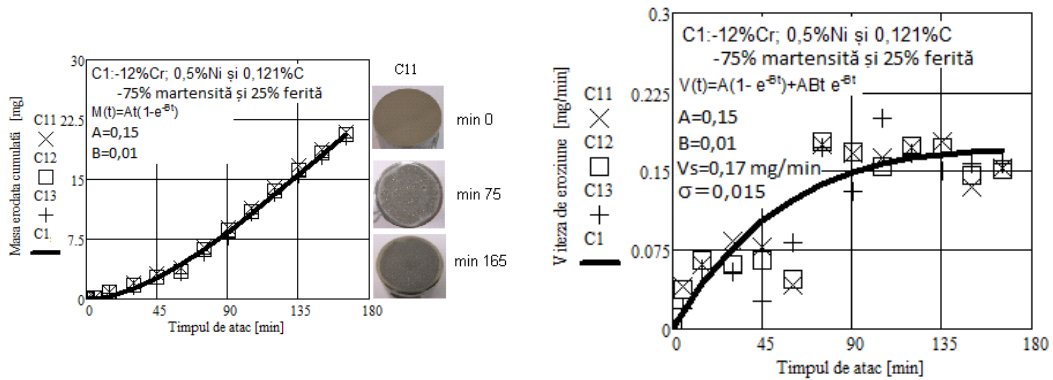


Fig. 2.46 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T2

Fig.2.47 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T2

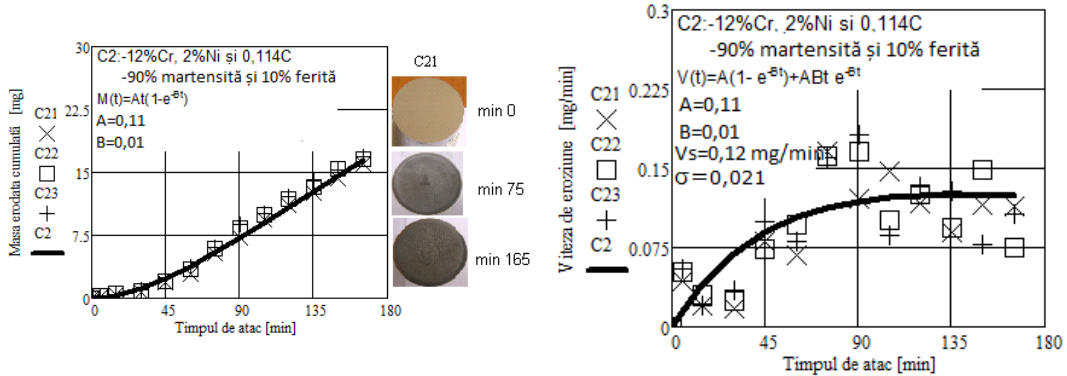


Fig. 2.48 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T2

Fig.2.49 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T2

### 2.3. Rezultate experimentale – 67

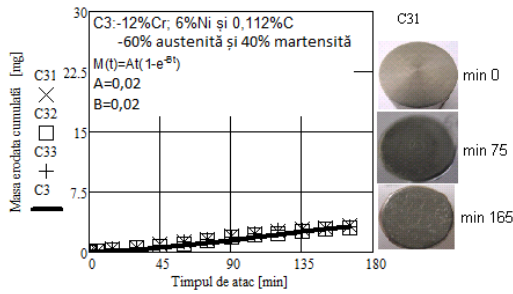


Fig. 2.50 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T2

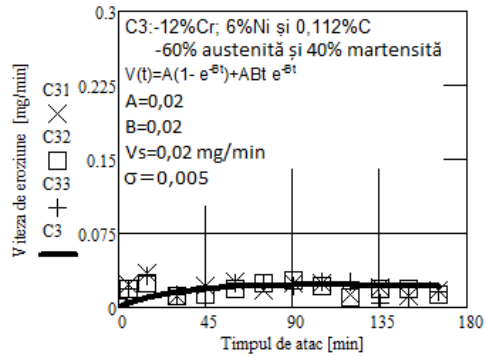


Fig.2.51 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T2

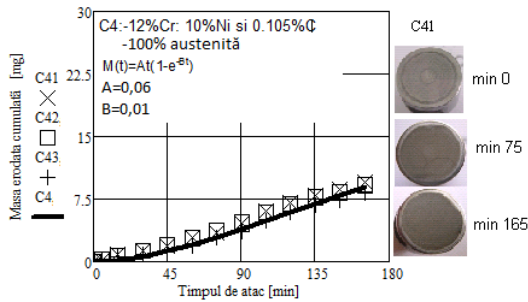


Fig. 2.52 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T2

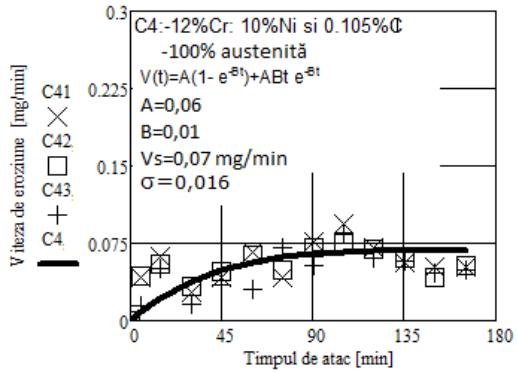


Fig.2.53 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T2

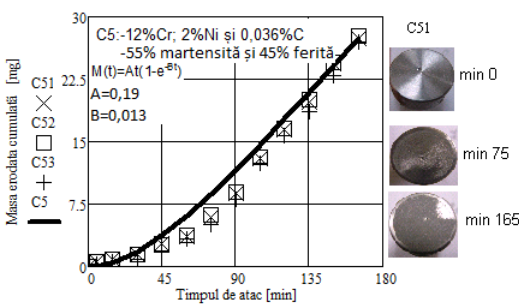


Fig. 2.54 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T2

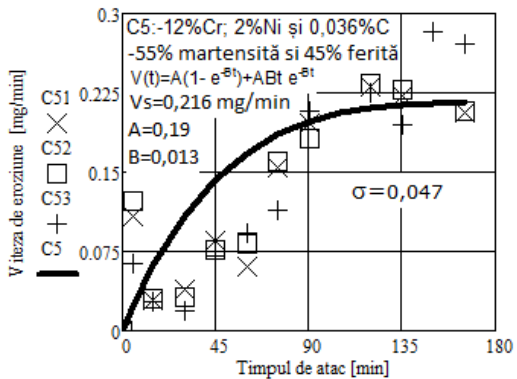


Fig.2.55 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T2

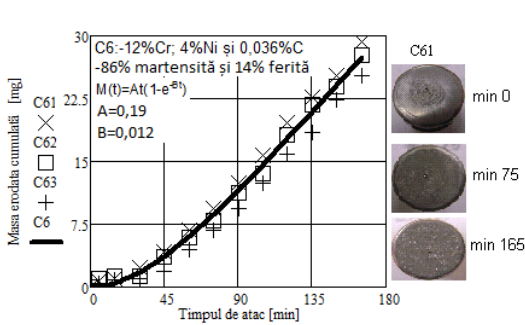


Fig. 2.56 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T2

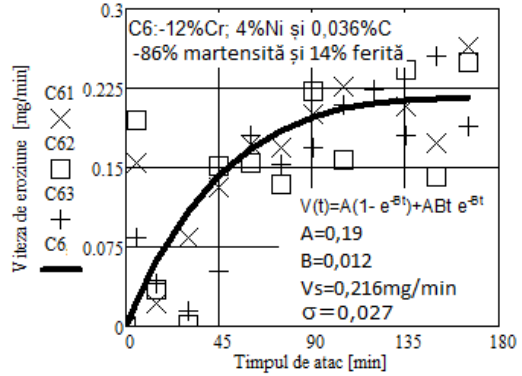


Fig.2.57 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T2

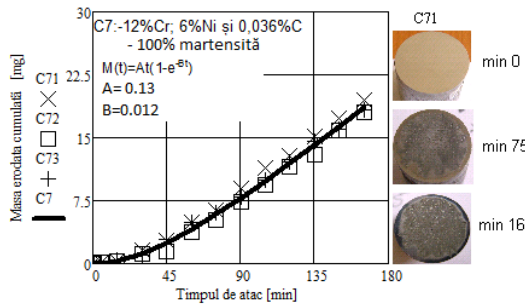


Fig. 2.58 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T2

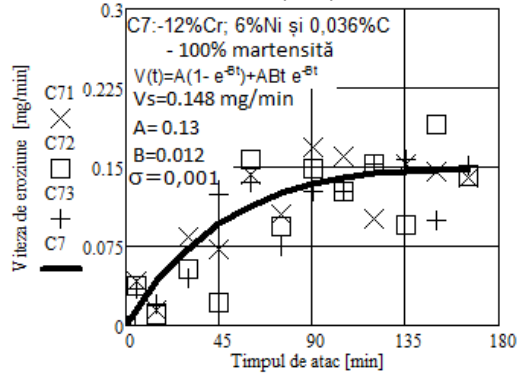


Fig.2.59 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T2

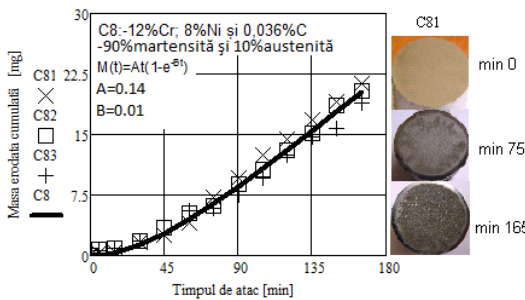


Fig. 2.60 Variația masei erodate cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T2

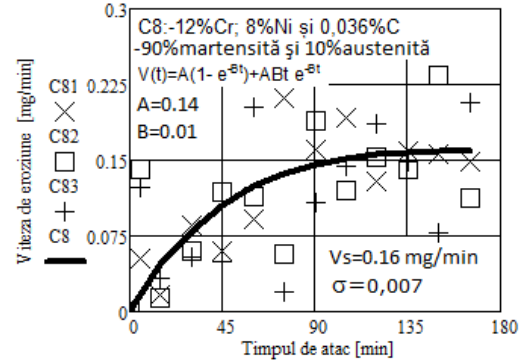


Fig.2.61 Variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T2

Analizând datele din diagramele aferente cercetărilor efectuate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (fig. 2.46-2.61) se desprind concluzii similare celor prezentate la diagramele testelor (fig.2.30-2.45) din aparatul T1, cu privire la dispersia punctelor experimentale față de curbele de aproximație. Valoarea mult mai redusă a abaterii standard de la oțelurile cu conținut important de martensită C7 și C8, este explicabilă prin rezistența pe care acest constituent structural o are față de distrugerea produsă prin cavitație în aparatul T2, a cărui amplitudine dublă a vibrațiilor este mult mai mică decât cea din aparatului T1 (50  $\mu\text{m}$  față de 94  $\mu\text{m}$ ); dar și influențată de dimensiunea acelor de martensită. Prin urmare, valorile abaterilor standard arată complexitatea mecanismului de distrugere prin cavitație, dependent de parametrii funcționali ai aparatului de cercetare, dar și de constituția structurală a oțelului. Totodată, consider că este firesc să existe oarecare asemănare între dispersiile punctelor experimentale, față de curbele de aproximație, deoarece probele provin din aceleași sarje; diferența fiind legată doar de parametrii funcționali ai aparatului vibrator (amplitudine, frecvență vibrații și diametru probe), restul condițiilor de testare (mediul lichid și temperatura, pregătire probe, etc.) fiind aceleași. Singurele diferențe care se remarcă sunt cele legate de nivelul pierderilor masice și valorile vitezelor de eroziune, datorate parametrilor aparatului.

Ca observație generală se constată că după testarea celor trei probe confecționate din același semifabricat, se obțin rezultate ușor diferite. Consider că acest lucru se datorează diferențelor de omogenitate structurală și eventual al proprietăților mecanice pe lungimea și secțiunea transversală a semifabricatului, dar și fenomenului de eroziune cavitațională, complex prin definiție.

Evident, comportamentul oțelurilor cercetate la atacurile cavitației vibratorii, realizate în cele două aparate T1 și T2, mai mult sau mai puțin uniform, după cum arată dispersiile punctelor experimentale, față de curbele de aproximație, este influențat și de proporția de elemente chimice alifagene, gamagene precum și a altora care pot crea compuși fragili și duri (carburi, fază  $\sigma$ , etc.) în structura oțelurilor.

De remarcat, că vitezele pierderilor masice, ale tuturor oțelurilor cercetate, tind să se stabilizeze la valoarea vitezei maxime. Conform studiilor și cercetărilor realizate în Laboratorul de Cavitație din cadrul UPT, pe parcursul celor circa 60 ani de experiență [9], [10], [98], [43], [73], [74], [75], [18], [19], [63], acest comportament este specific, oțelurilor cu rezistențe ridicate, ce pot fi utilizate în fabricarea pieselor intens solicitate cavitațional.

#### **2.3.4. Prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale**

Se știe că prin utilizarea metodelor moderne de prelucrarea statistică se poate obține un rezumat exact al concluziilor ce pot fi trase asupra unui experiment efectuat. Pe lângă aceasta, cu ajutorul unui mic volum de informații sau prin intermediul unor ipoteze rezonabile, se pot realiza estimări de încredere privind un experiment propus [29].

În cadrul cercetărilor, realizate în această lucrare, după obținerea rezultatelor experimentale din laborator, s-au construit benzi de dispersie pentru fiecare oțel testat pe ambele aparate. Pentru obținerea benzilor de dispersie s-a folosit eroarea de estimare și curba de regresie polinomială de gradul doi. Utilizarea curbilor de regresie constă în faptul că aceste curbe oferă o imagine mai exactă asupra rezultatelor experimentale. Benzile de dispersie prezentate au fost obținute

cu ajutorul pierderilor masice cumulate ale oțelurilor testate. Pe grafice sunt prezentate și valorile celor trei probe confecționate din același șarjă.

Curbele de regresie au fost obținute cu ajutorul programului Microsoft Excel. După introducerea datelor de intrare (pierderile masice cumulate și timpul), programul trasează automat curba de regresie care aproximează cel mai bine punctele de pe grafic. Ecuația curbei de regresie și coeficientul de corelare sunt date de program. Ecuația generală a curbei de regresie polinomiale este:

$$Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (2.13)$$

unde: - Y este curba de regresie;

- x este timpul la care se calculează valoarea Y;

- a, b, c sunt constante alese astfel încât curba de regresie să aproximeze cât mai bine punctele experimentale.

În continuare se calculează valoarea medie pentru aceasta, precum și mediile pentru pierderile masice cumulate și pentru timp. Calculul dispersiei se face cu ajutorul formulei:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.14)$$

unde: -  $s^2$  este dispersia parametrului calculat (pierderi masice cumulate, timp, etc.)

- n este numărul încercărilor efectuate

-  $x_i$  este valoarea experimentală a parametrului calculat

-  $\bar{x}$  este media aritmetică a valorilor parametrului calculat

Abaterea standard se obține cu ajutorul dispersiei, calculând rădăcina pătrată a acesteia. Calcularea erorii standard de estimare este necesară pentru construirea benzii de dispersie. Formula de calcul a erorii standard de estimare este:

$$s_{x/y} = \left[ \frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

unde: -  $y_i$  este pierderea masică experimentală la timpul i

-  $Y_i$  este eroarea de estimare la timpul i

- n este numărul de încercări

Intervalul de toleranță reprezintă numărul de puncte experimentale ce trebuie să se regăsească în banda de dispersie pentru ca această bandă să poată fi considerată corectă. Limita superioară a intervalului de toleranță, notată cu S, se obține însumând valoarea erorii standard de estimare cu valoarea curbei de regresie. Limita inferioară a intervalului de toleranță, notată cu I, se obține scăzând valoarea erorii standard de estimare din valoarea curbei de regresie. Pentru intervalul de toleranță de 99%, limitele intervalului se calculează după cum urmează:

Interval de toleranță 99%:  $S = y' + 3s_{x/y}$  ;  $I = y' - 3s_{x/y}$ .

În continuare sunt prezentate graficele benzilor de dispersie construite pentru pierderile masice cumulate (medii ale celor trei probe) ale oțelurilor inoxidabile studiate. Notațiile utilizate în grafice sunt:

y – pierderi masice cumulate medii pentru oțelul respectiv

YP – curba de regresie liniară

S – limita superioară a intervalului de toleranță

I – limita inferioară a intervalului de toleranță

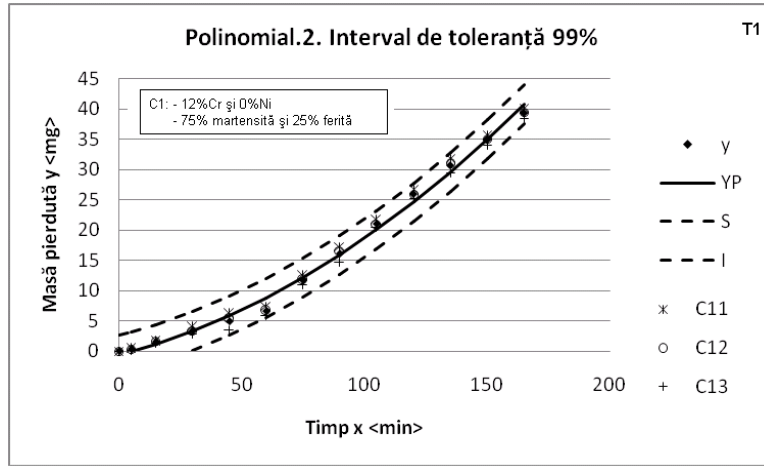


Fig. 2.62 Banda de dispersie pentru oțelul C1 testat pe T1

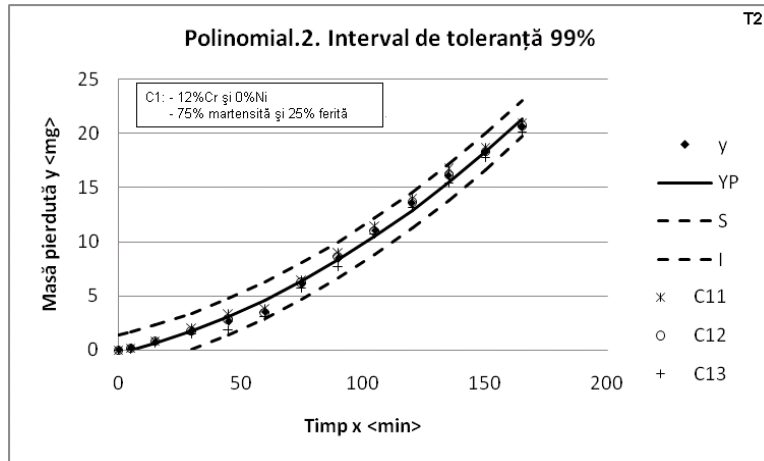


Fig. 2.63 Banda de dispersie pentru oțelul C1 testat pe T2

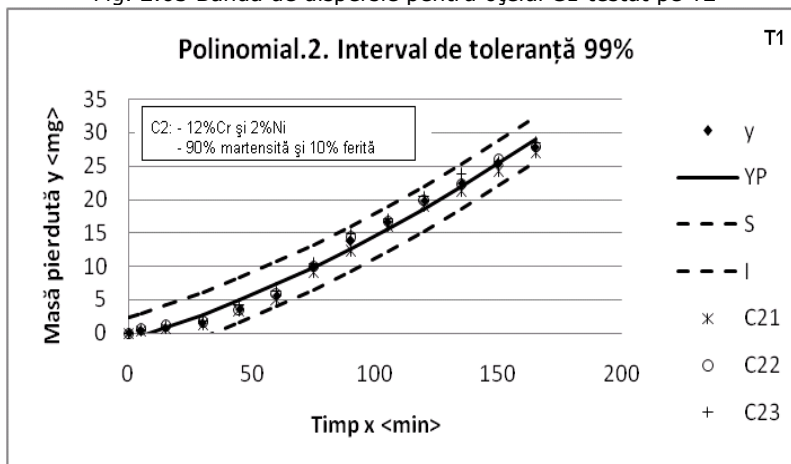


Fig. 2.64 Banda de dispersie pentru oțelul C2 testat pe T1



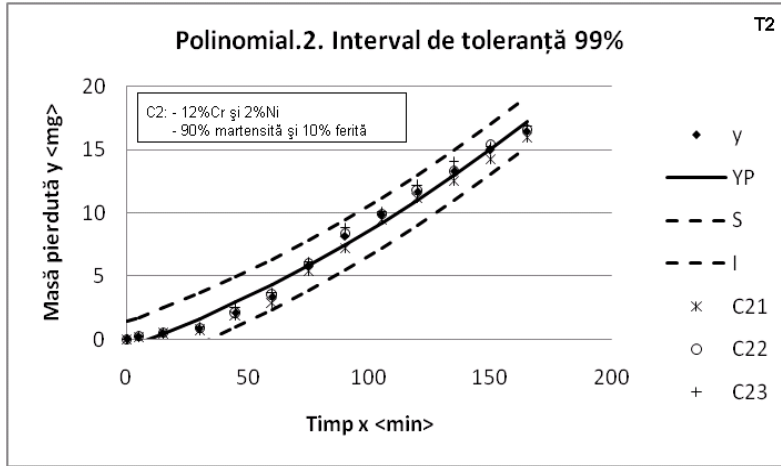


Fig. 2.65 Banda de dispersie pentru oțelul C2 testat pe T2

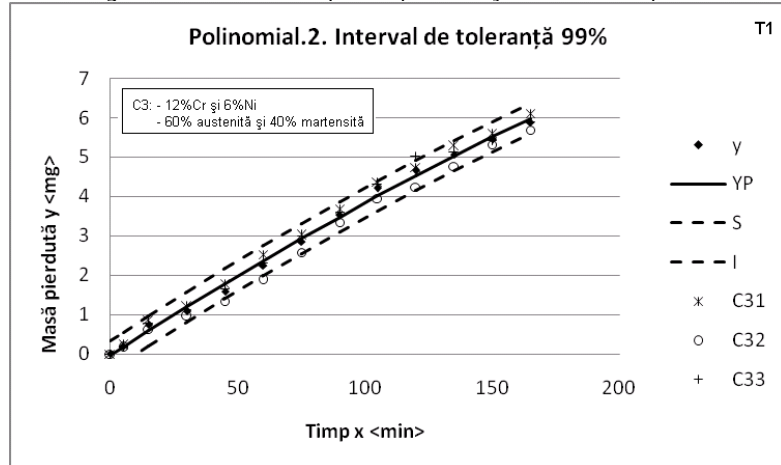


Fig. 2.66 Banda de dispersie pentru oțelul C3 testat pe T1

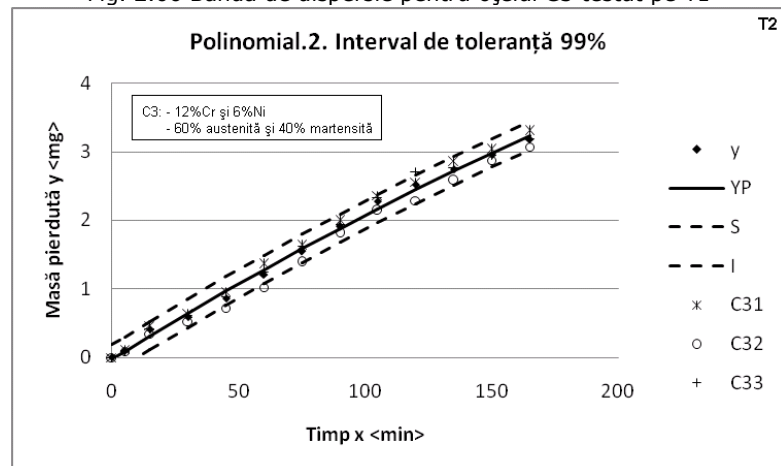


Fig. 2.67 Banda de dispersie pentru oțelul C3 testat pe T2

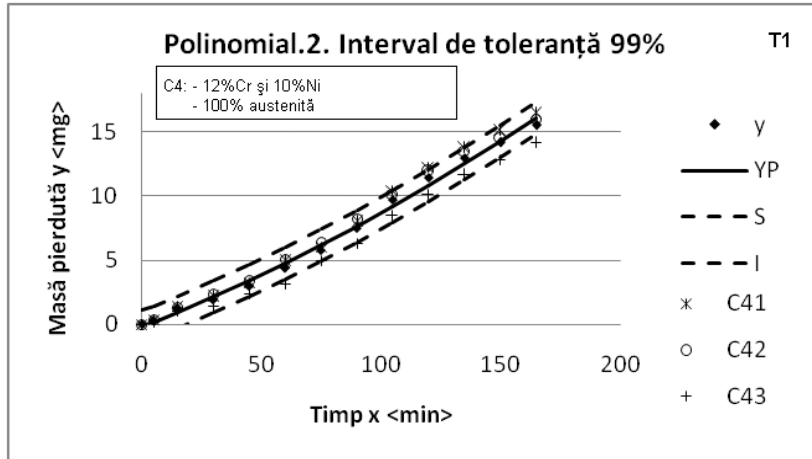


Fig. 2.68 Banda de dispersie pentru oțelul C4 testat pe T1

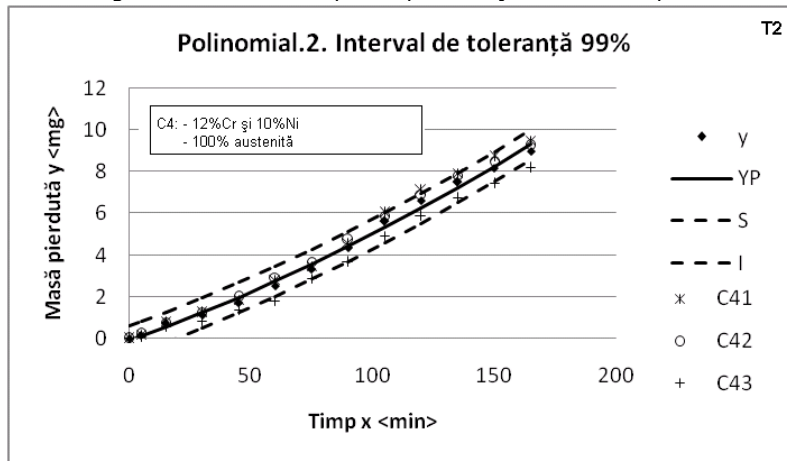


Fig. 2.69 Banda de dispersie pentru oțelul C4 testat pe T2

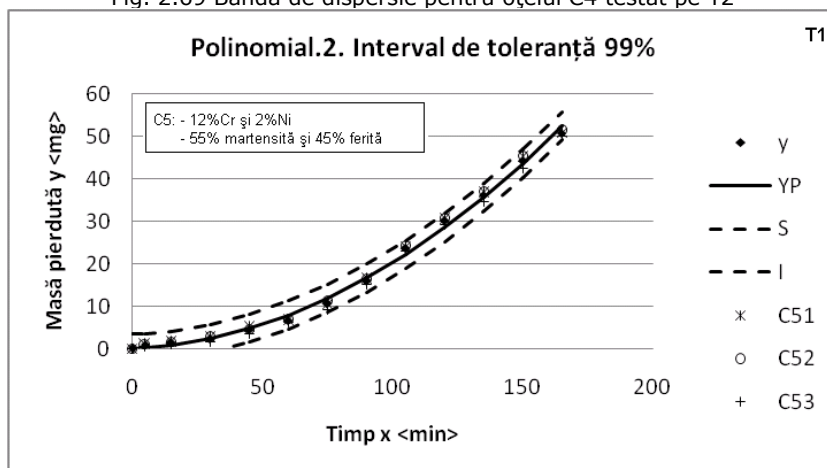


Fig. 2.70 Banda de dispersie pentru oțelul C5 testat pe T1

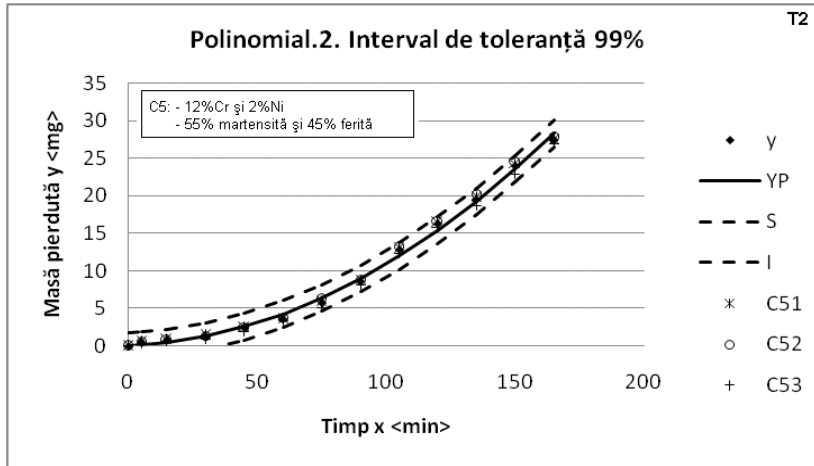


Fig. 2.71 Banda de dispersie pentru oțelul C5 testat pe T2

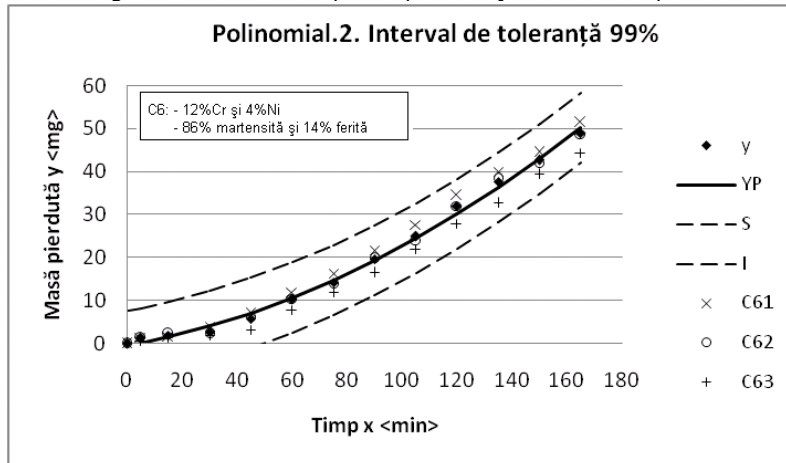


Fig. 2.72 Banda de dispersie pentru oțelul C6 testat pe T1

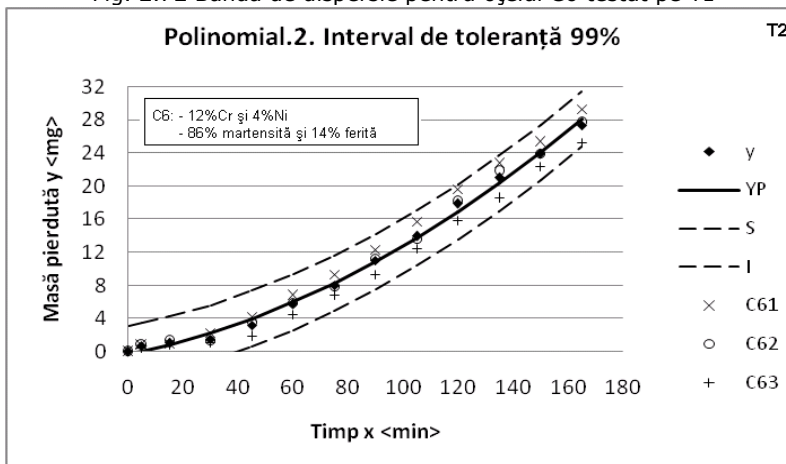


Fig. 2.73 Banda de dispersie pentru oțelul C6 testat pe T2

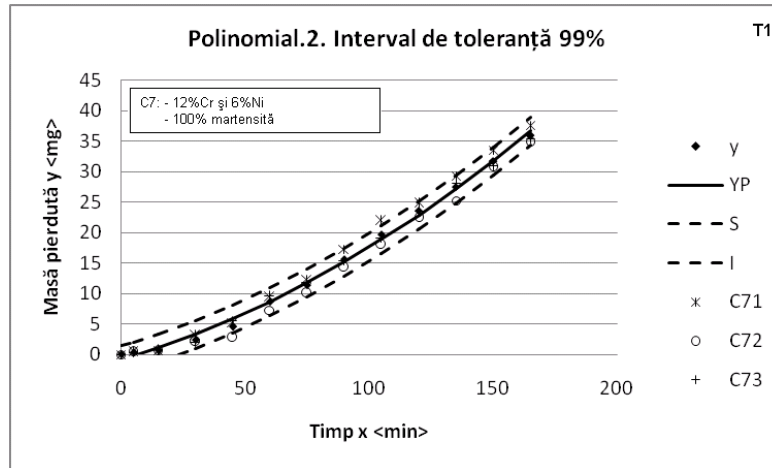


Fig. 2.74 Banda de dispersie pentru oțelul C7 testat pe T1

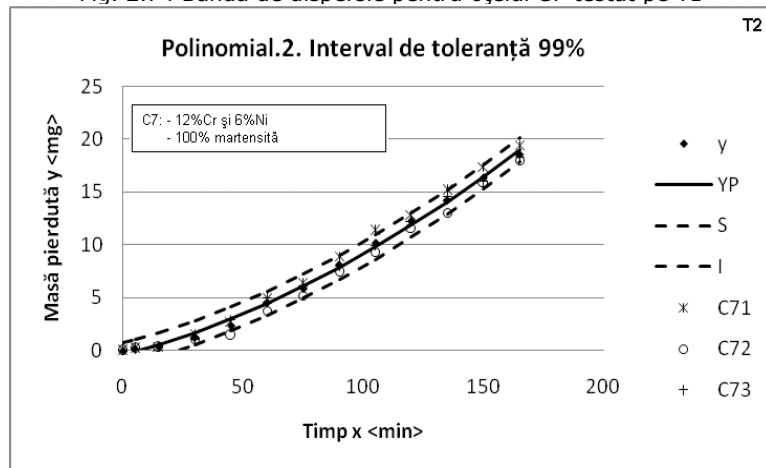


Fig. 2.75 Banda de dispersie pentru oțelul C7 testat pe T2

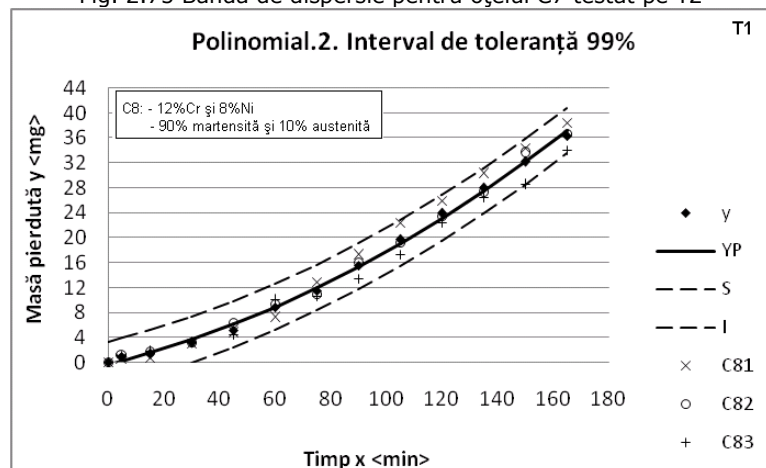


Fig. 2.76 Banda de dispersie pentru oțelul C8 testat pe T1

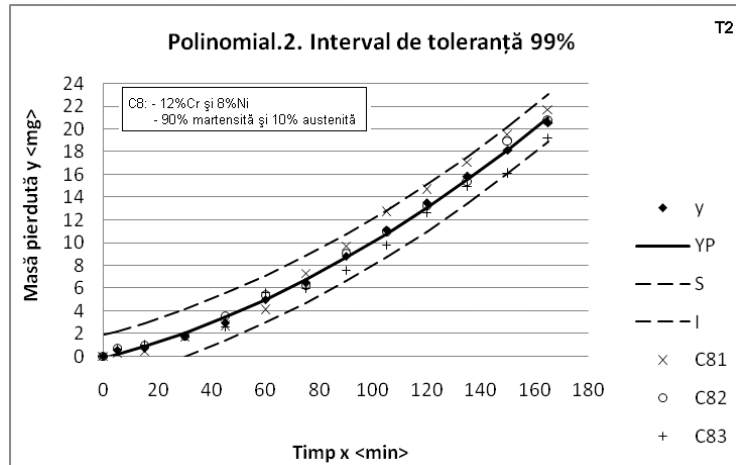


Fig. 2.77 Banda de dispersie pentru oțelul C8 testat pe T2

Prelucrarea datelor obținute în laborator prin statistică ne oferă o imagine mai exactă asupra modului de distrugere a materialului din suprafața expusă atacului cavitațional. Plaja benzii de dispersie ne oferă date cu privire la modul de distrugere al materialului și a gradului de omogenitate a acestuia. Cu cât banda de dispersie este mai îngustă cu atât distrugerea este mai uniformă, deci structura materialului este mai omogenă. Pentru o imagine mai clară, în tabelul 2.3 sunt afișate valorile abaterilor standard, a punctelor măsurate față de curba de aproximatie.

**Tabelul 2.3** Valorile abaterii standard

Oțelul	C1 (12/0,5)	C2 (12/2)	C3 (12/6)	C4 (12/10)	C5 (12/2)*	C6 (12/4)	C7 (12/6)*	C8 (12/8)
σ-T1	0,03	0,039	0,015	0,026	0,077	0,052	0,022	0,03
σ-T2	0,016	0,021	0,005	0,015	0,047	0,027	0,001	0,007

Dacă obținem curbe de regresie asemănătoare, a căror valori sunt apropiate (C5 și C6), ordonarea după rezistența la eroziunea cavitațională se face după valoarea erorii standard de estimare.

Din diagramele prezentate mai sus (fig.2.30-2.61), corelate cu cele de determinare a benzilor de dispersie (fig.2.62-2.77), se poate observa că nu întotdeauna materialul cu cea mai îngustă plajă a benzii de dispersie are și cea mai bună rezistență la eroziunea cavitațională (ex. C8 are o bandă de dispersie mai îngustă decât C4, dar prezintă o rezistență mai mică la eroziunea cavitațională).

### 2.3.5. Parametrii caracteristici evaluării rezistenței oțelurilor la eroziunea cavitației

În cele ce urmează se face o analiză pe baza parametrilor adâncime medie de pătrundere a eroziunii (MDE) și viteza adâncimii medii de pătrundere (MDER). La trasarea diagramelor au fost folosite valorile medii ale celor trei determinări.

În diagrama variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu timpul de atac al cavitației, media punctelor experimentale a fost notată cu MDE, iar curba teoretică este notată cu MDE1.

În diagramele ce dau variația vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației, punctele care reprezintă media celor trei măsurători a fost notată cu MDER, iar curba teoretică este notată cu MDER1.

Calculul celor doi parametri MDE și MDER, s-a făcut pe baza pierderilor masice, înregistrate după fiecare perioadă de testare, conform relațiilor:

$$MDE = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) \text{ [mm]} \quad (2.16)$$

$$MDER = \frac{4 \cdot \Delta m_i \cdot 60}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \Delta t_i} \text{ [mm/ore]}$$

unde :

$\Delta M_i$  - este pierderea de material în perioada  $i$ , în grame,

$\rho$  - densitatea oțelului, în grame/mm<sup>3</sup>,

$\Delta t_i$  - durata cavitației corespunzătoare perioade  $i$ ,

$i = 1, 2, 3 \dots 12$  - perioada de cavitație (pentru  $i = 1$ ,  $\Delta t = 5$  min, pentru  $i = 2$ ,  $\Delta t = 10$  minute și pentru  $i = 3 \dots 12$ ,  $\Delta t = 15$  minute pentru fiecare perioadă),

$d_p$  - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ( $d_p = 15,8$  mm).

În calcule s-a folosit dimensiunea precizată, deoarece, diferența între diametrul suprafeței erodate efective și cea a suprafeței atacate este foarte mică.

Pentru curbele de aproximație s-au folosit relații similare celor care au stabilit variațiile pierderilor masice  $m(t)$  și vitezelor pierderilor masice  $v(t)$  cu durata atacului, de forma:

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (2.17)$$

$$MDER(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (2.18)$$

$A$  este un parametru de scară stabilit experimental statistic pentru construirea curbei de aproximație, cu condiția ca abaterile punctelor experimentale față de această curbă să fie minime.

$B$  - este un parametru de formă

$$B = \frac{-\ln \left[ 1 - \frac{MDE}{A \cdot t_{fin}} \right]}{t_{fin}} \quad (2.19)$$

$t_{fin}$  - durata totală

$M_{fin}$  - masa erodată cumulată

În diagramele ce urmează sunt redată variațiile parametrilor MDE și MDER cu durata atacurilor cavitației.

Oțelurile testate pe aparatul vibrator magnetostriktiv T1:

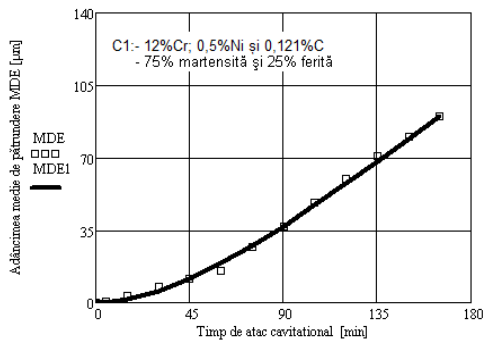


Fig. 2.78 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T1

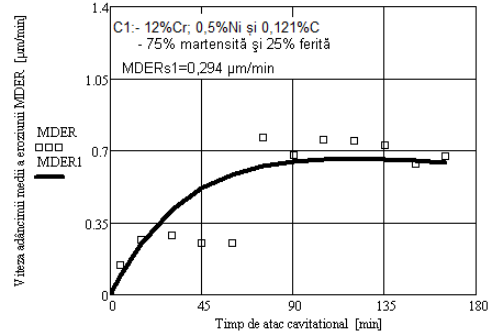


Fig.2.79 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T1

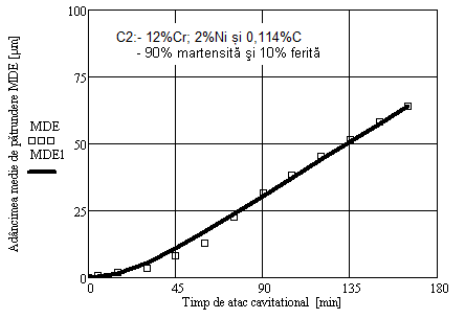


Fig. 2.80 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T1

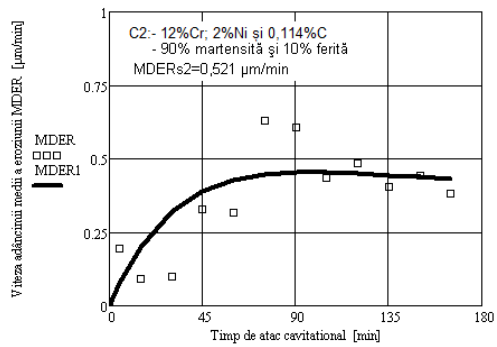


Fig.2.81 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T1

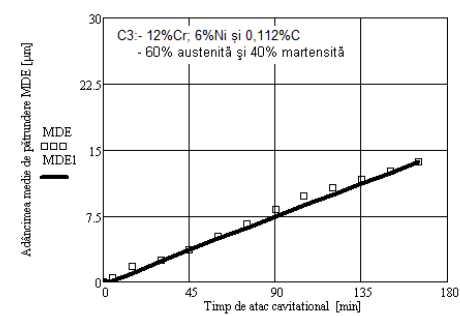


Fig. 2.82 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T1

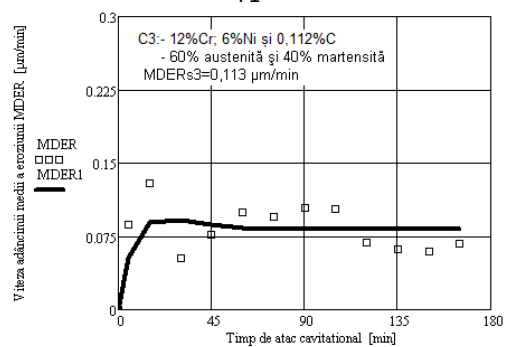


Fig.2.83 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T1



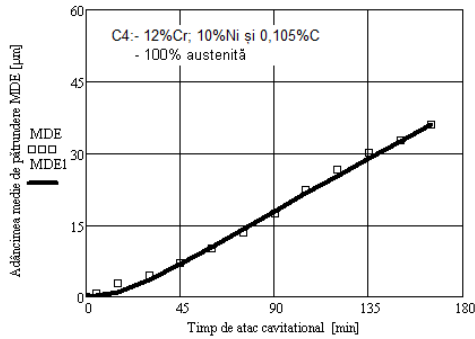


Fig. 2.84 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T1

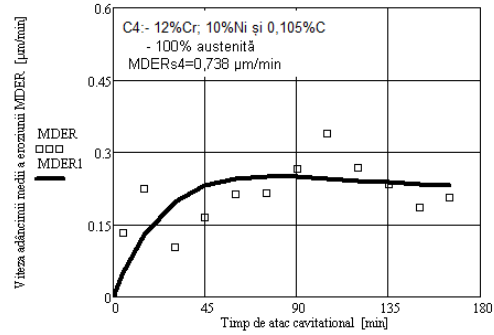


Fig.2.85 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T1

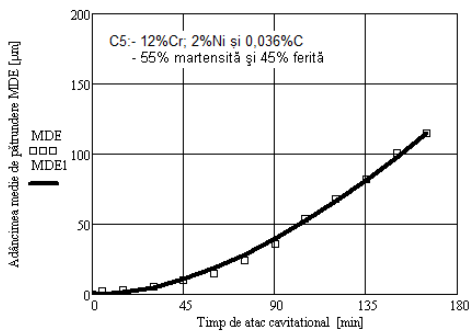


Fig. 2.86 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T1

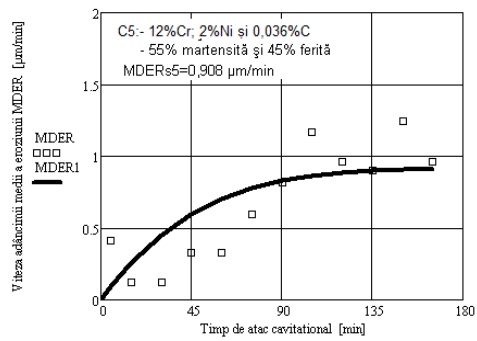


Fig.2.87 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5 testat pe aparatul T1

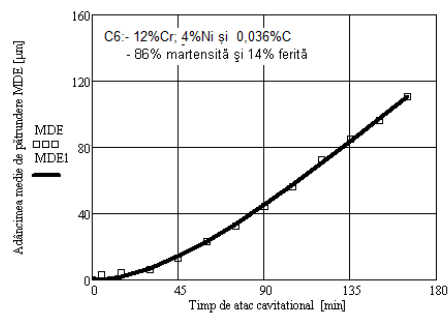


Fig. 2.88 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T1

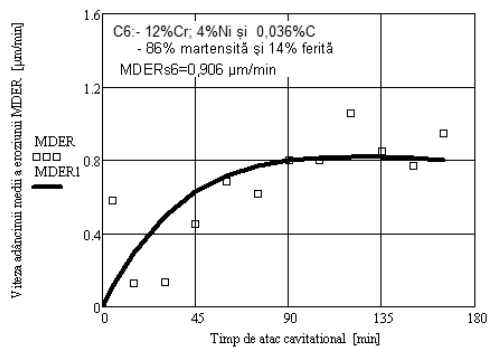


Fig.2.89 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T1

80 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație a unei game de oțeluri-2

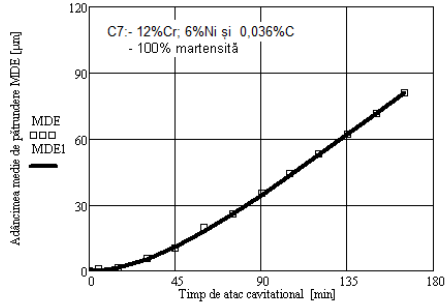


Fig. 2.90 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T1

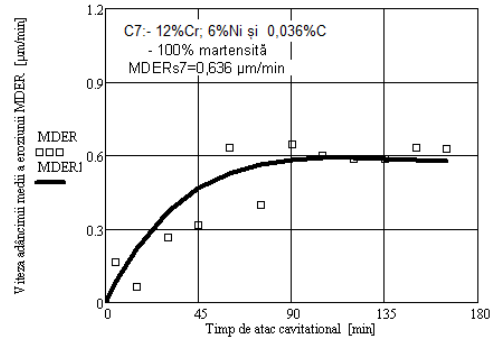


Fig.2.91 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7 testat pe aparatul T1

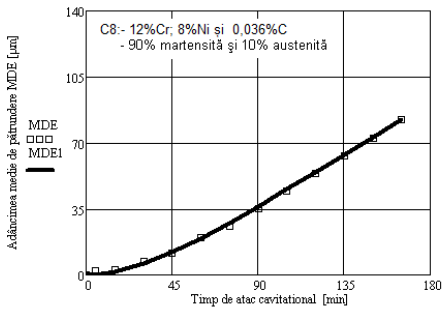


Fig.2.92 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T1

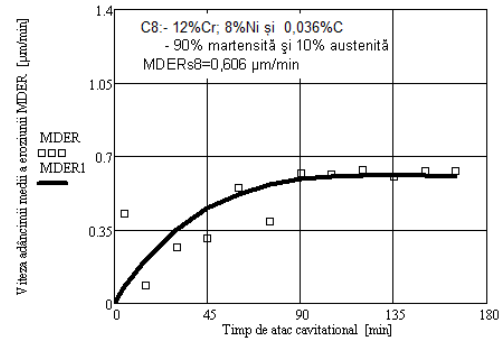


Fig.2.93 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T1

Oțelurile testate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2:

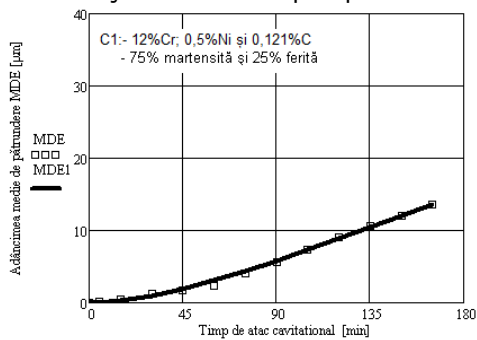


Fig. 2.94 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T2

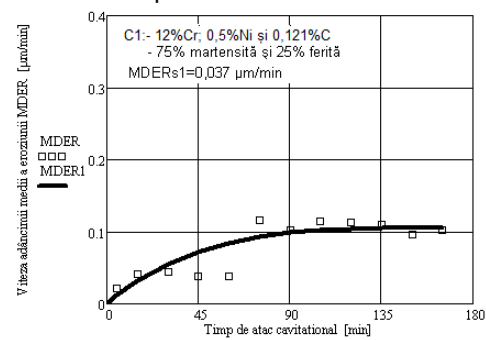


Fig.2.95 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C1 testat pe aparatul T2

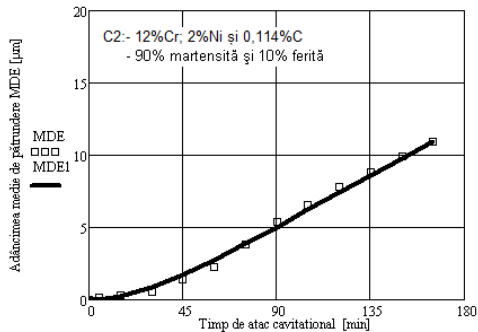


Fig. 2.96 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T2

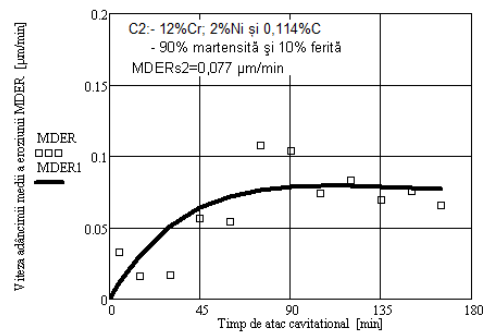


Fig.2.97 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C2 testat pe aparatul T2

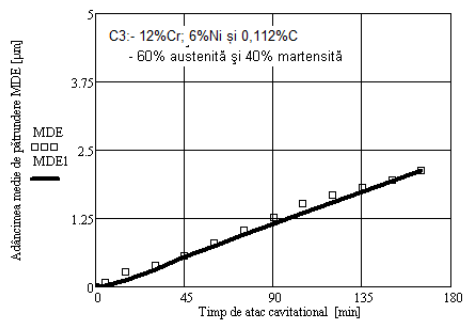


Fig. 2.98 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T2

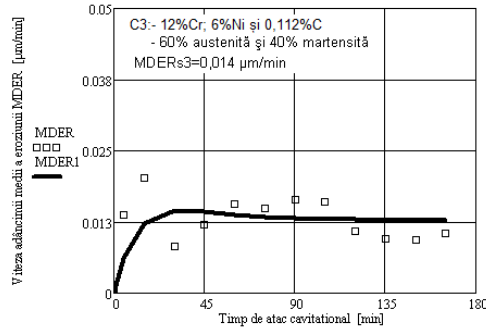


Fig.2.99 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C3 testat pe aparatul T2

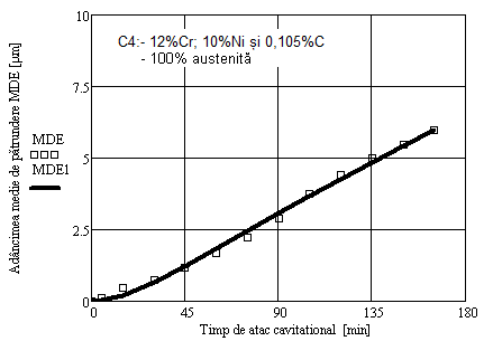


Fig. 2.100 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T2

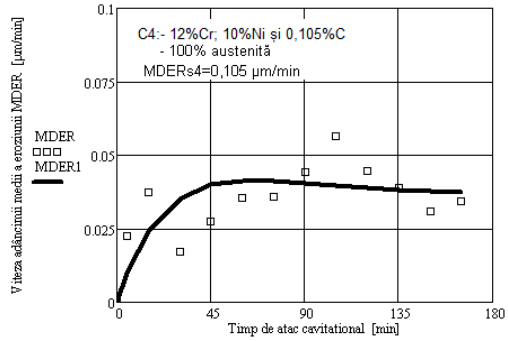


Fig.2.101 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C4 testat pe aparatul T2

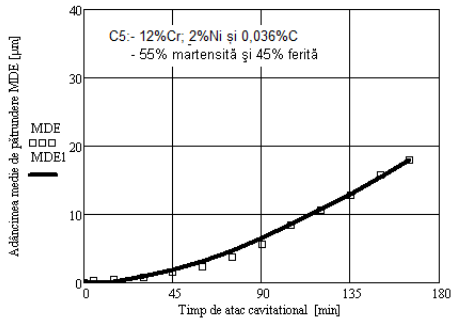


Fig. 2.102 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5\* testat pe aparatul T2

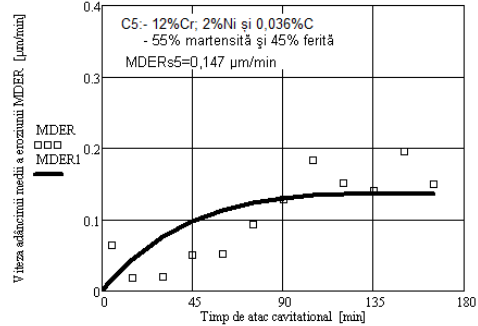


Fig.2.103 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C5\* testat pe aparatul T2

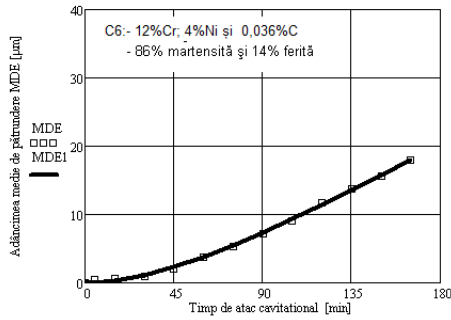


Fig. 2.104 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T2

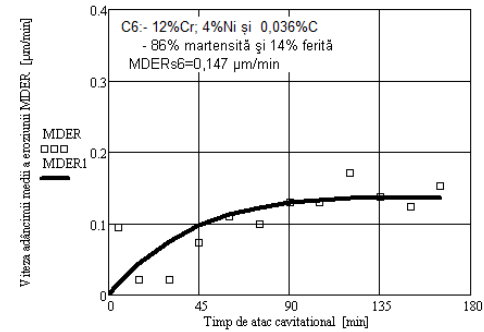


Fig.2.105 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C6 testat pe aparatul T2

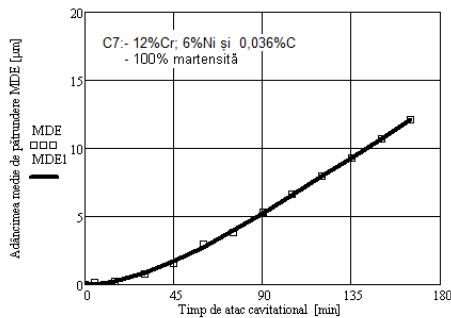


Fig. 2.106 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7\* testat pe aparatul T2

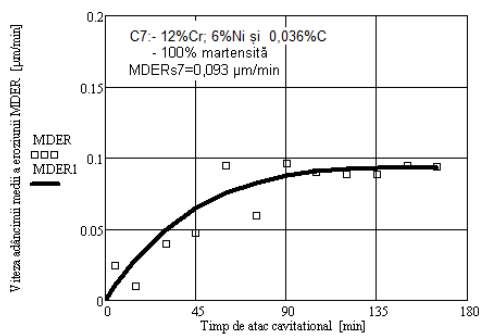


Fig.2.107 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavitației pentru oțelul inoxidabil C7\* testat pe aparatul T2

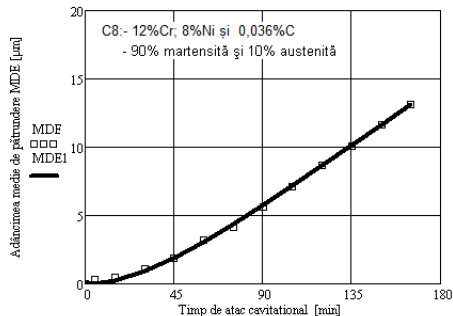


Fig. 2.108 Variația adâncimii medii de pătrundere cu timpul de atac al cavităției pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T2

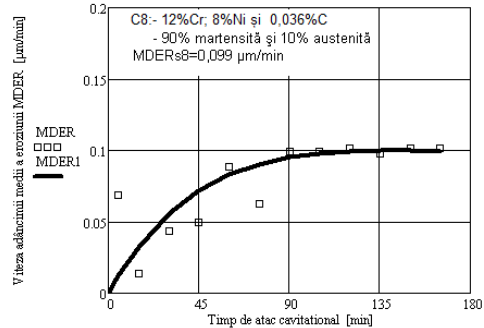


Fig.2.109 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu timpul de atac al cavităției pentru oțelul inoxidabil C8 testat pe aparatul T2

Analizând toate datele oferite de aceste diagrame, aferente cercetărilor efectuate atât pe aparatul vibrator magnetostrictiv T1 (fig. 2.78-2.93) cât și pe aparatul T2 (fig.2.94-2.109), cu privire la dispersia punctelor experimentale față de curbele de aproximație sunt asemănătoare cu cele descrise pe baza pierderilor masice și vitezelor de eroziune corespunzătoare, deoarece relațiile de determinare a valorilor acestor parametri se bazează tot pe pierderile masice măsurate.

### 2.3.6. Compararea rezultatelor experimentale

Pentru punerea în evidență a diferențelor de comportament, pe durata atacului cavităției, precum și a celor de rezistență la solicitările mecanice, specifice oboselii locale, generate de impactul suprafeței atacate cu undele de șoc și microjeturile, rezultate din implozia bulelor cavitotaționale, mai jos (fig. 110-113), se vor realiza analize și discuții pe baza comparării curbelor caracteristice și a valorilor parametrilor specifici, de referință, conform normelor ASTM G32-2010 [123]. Această comparare se va face între oțelurile cercetate, dar și cu oțelurile etalon 41Cr4 și OH12NDL.

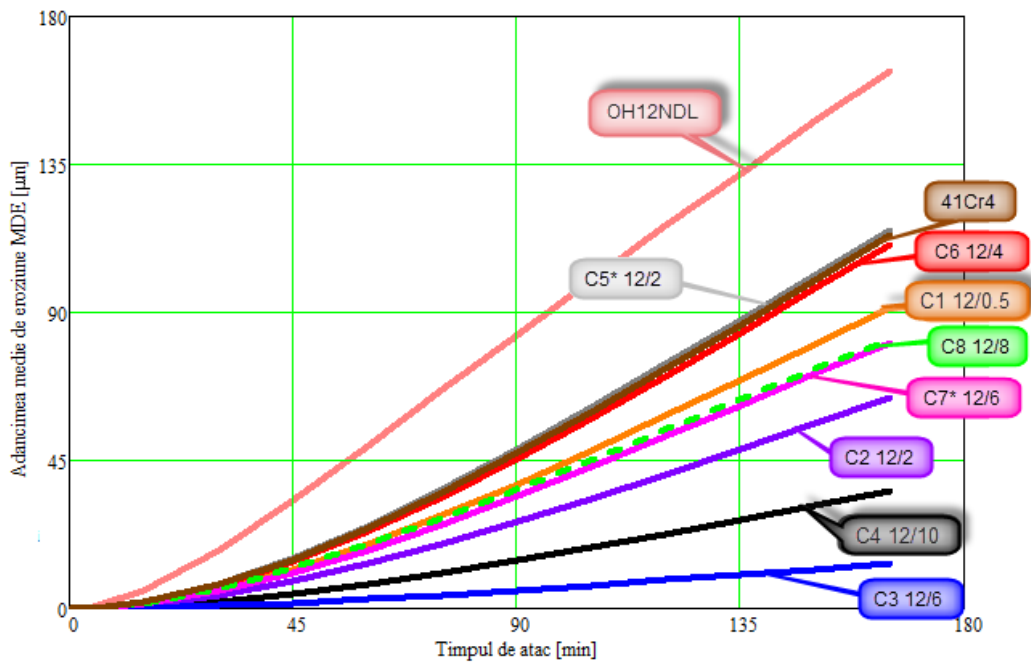


Fig. 2.110 Variația adâncimii de eroziune MDE cu timpul de atac pe aparatul T1

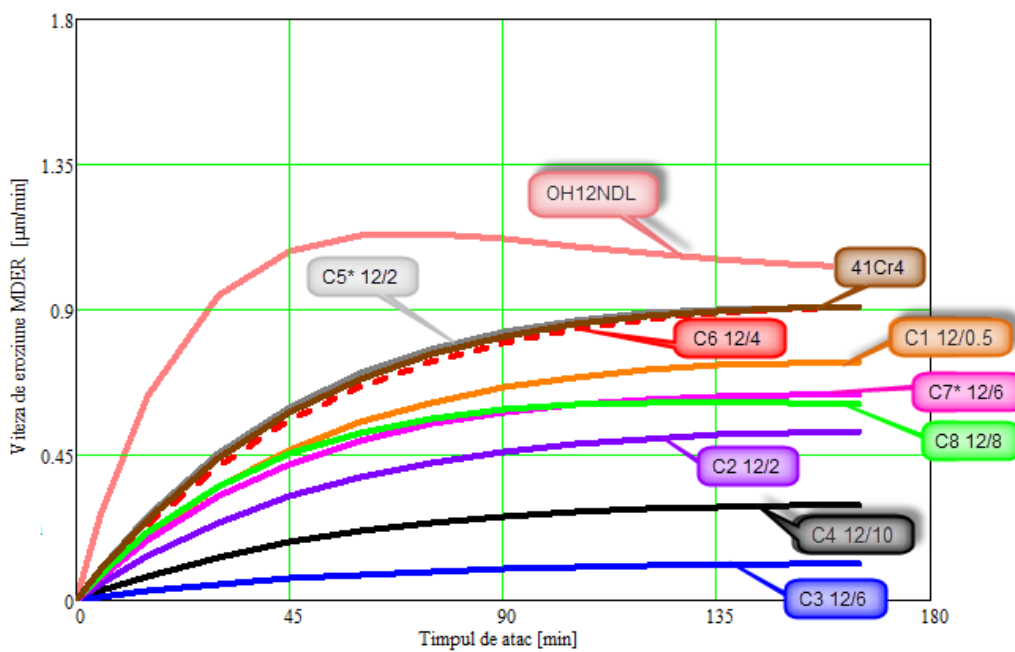
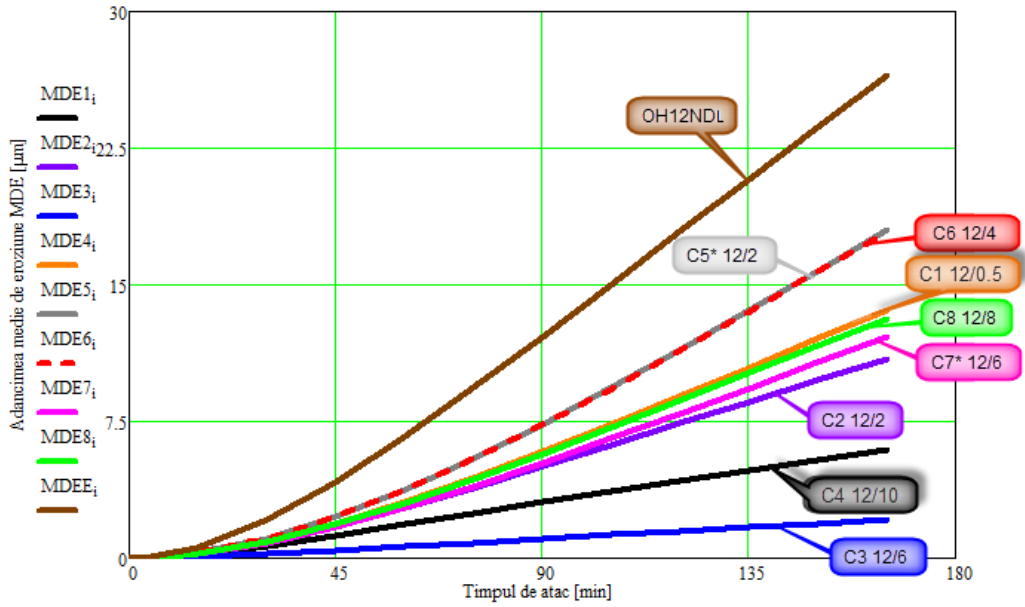


Fig. 2.111 Variația vitezei de eroziune MDER cu timpul de atac pe aparatul T1



2.112 Variația adâncimii de eroziune MDE cu timpul de atac pe aparatul T2

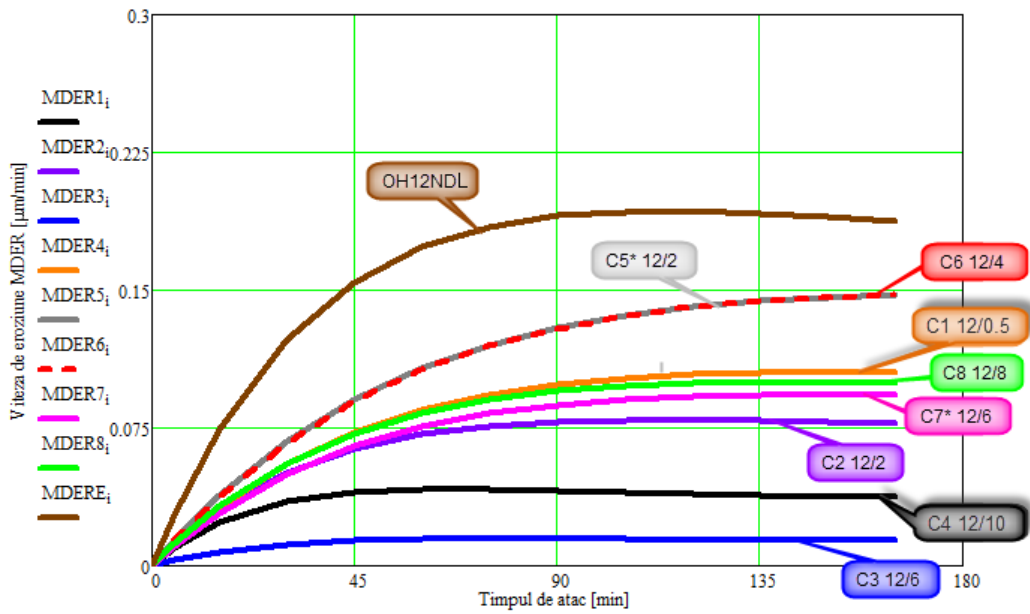


Fig. 2.113 Variația vitezei de eroziune MDER cu timpul de atac pe aparatul T2



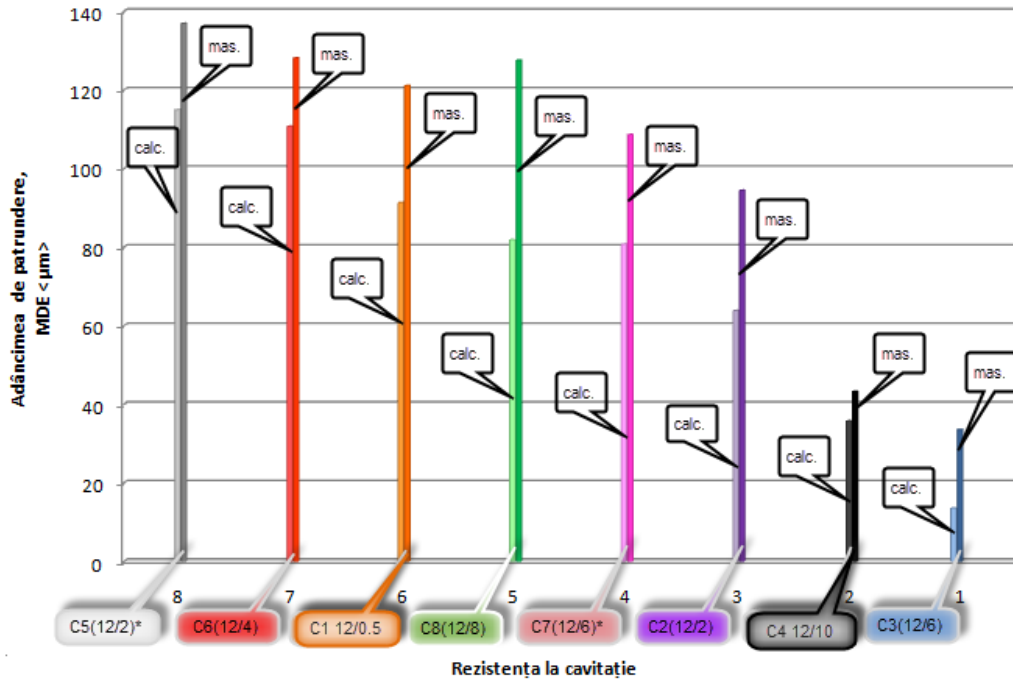


Fig. 2.114 Compararea adâncimilor medii de eroziune MDE (aparatur T1)

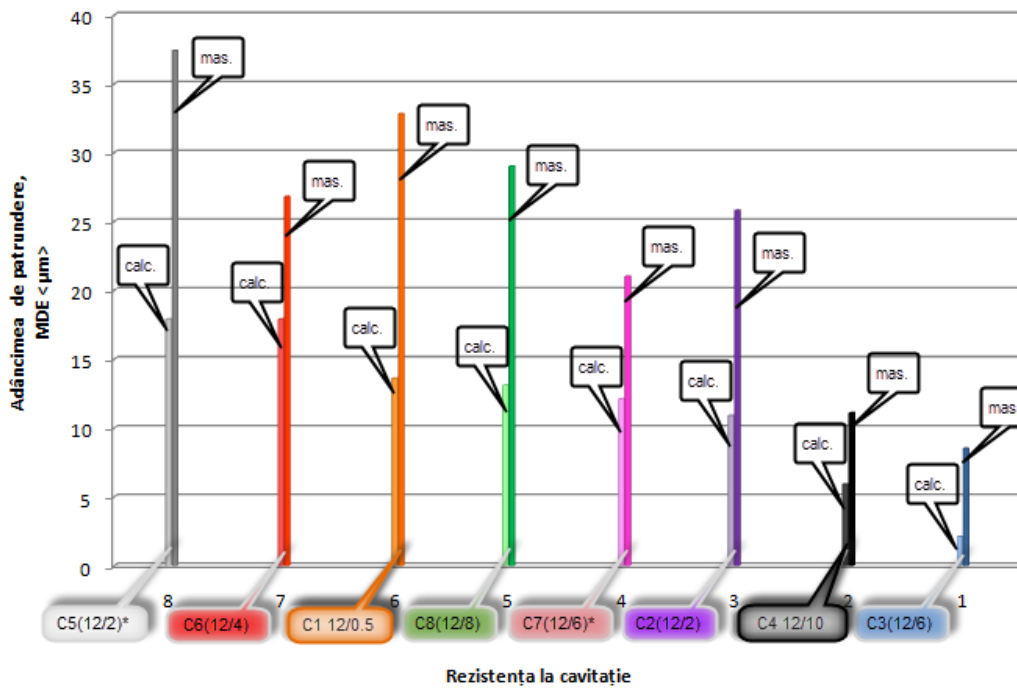


Fig. 2.115 Compararea adâncimilor medii de eroziune MDE (aparatur T2)

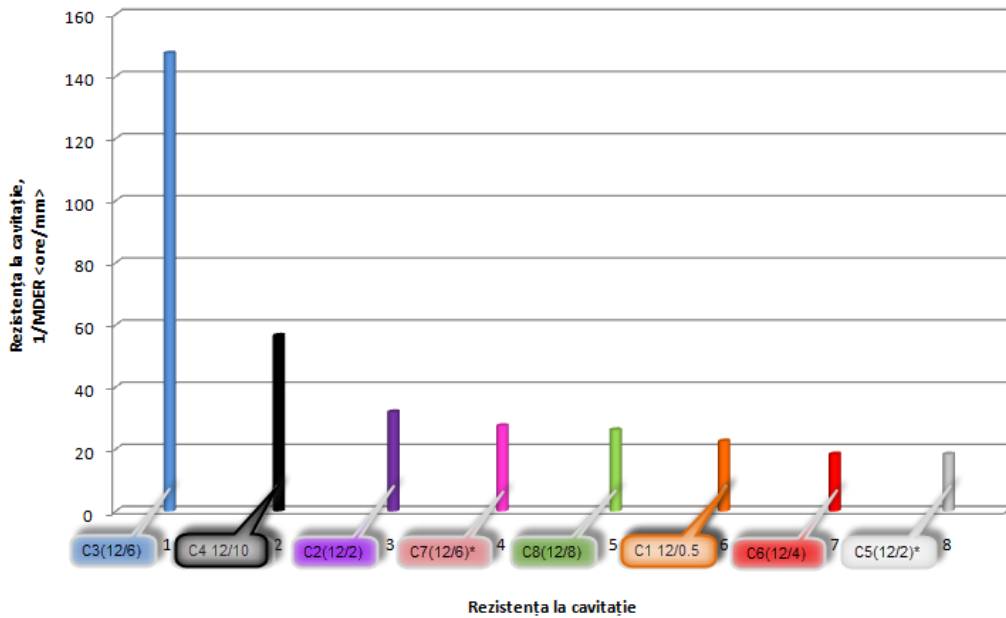


Fig. 2.116 Compararea rezistențelor la eroziunea prin cavitație (aparatur T1)

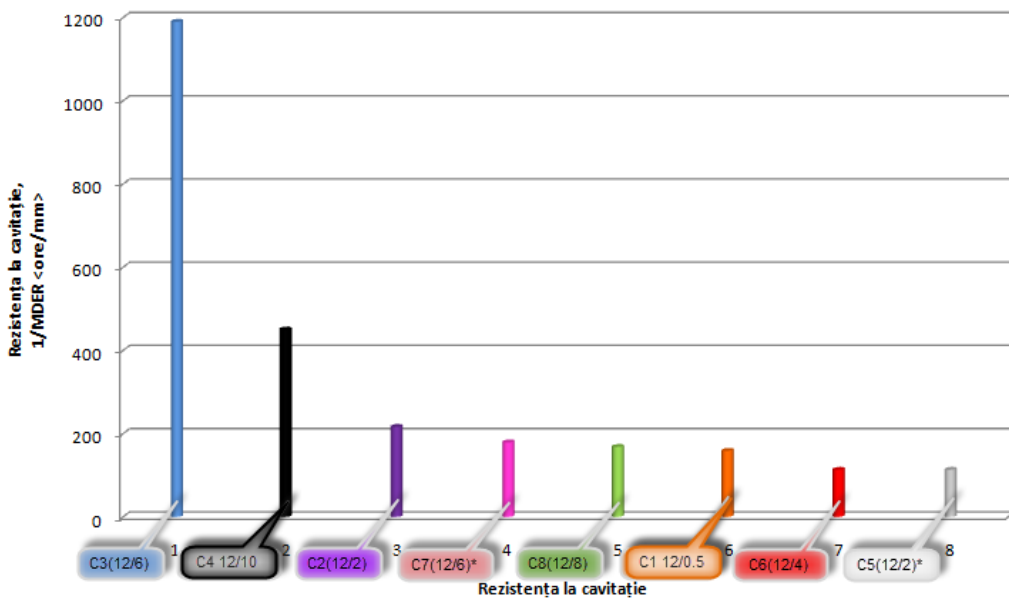


Fig. 2.117 Compararea rezistențelor la eroziunea prin cavitație (aparatur T2)

Curbele din figurile 2.110-2.113 sunt construite cu relațiile (2.9) și (2.10).

În histogramele din fig. 2.114 și 2.115 se compară adâncimile medii de eroziune, calculate la finalul celor 165 minute de atac, iar în fig. 2.116 și 2.117 sunt comparate rezistențele la cavitație, opuse de oțelurile cercetate în timpul atacului. Din aceste diagrame se desprind următoarele:

- indiferent de aparatul utilizat (T1 sau T2) în generarea cavitației vibratorii, evoluția în timp a curbelor MDE (t) și MDER (t), ca formă, pentru același material, este similară. Diferența se datorează parametrilor diferiți valoric ai aparatelor T1 și T2;
- vitezele de eroziune MDER tind să se stabilizeze la valoarea maximă. Acest mod de evoluție al comportamentului oțelurilor, în timpul atacului cavitației, conform cercetărilor anterioare, realizate în Laboratorul de Cavitație din cadrul UPT [74], [75], [18], [19], [63] este specific oțelurilor cu rezistență ridicată, sau care și-o sporesc prin durificarea stratului superficial atacat prin cavitație, așa cum se va observa în imaginile realizate pe structurile erodate, prezentate în subcapitolul 2.4;
- din comparația vitezelor adâncimilor medii de eroziune, fig. 2.111 și 2.113, respectiv a rezistențelor opuse atacului cavitației, fig. 2.116 și 2.117, se constată că cea mai scăzută rezistență la cavitație (caracterizată și prin cea mai mică pantă a curbei MDE (t), în zona liniară/finală), dintre oțelurile cercetate, o are oțelul C5 (12/2)\*, respectiv cea mai ridicată o prezintă oțelul C3 (12/6). Rezultatele fiind în concordanță și cu adâncimea medie de eroziune realizată la finalul celor 165 minute de atac;
- testele realizate în aparatul T2 arată că oțelurile C5 (12/2)\* și C6 (12/4), conform curbelor MDE (t), fig. 2.112 și MDER (t), fig. 2.113 se comportă și rezistă identic la cavitația vibratoare realizată în acest aparat. Testele realizate, pe aceste oțeluri, în aparatul T1, arată că rezistența și comportamentul lor, la cavitația produsă în acest aparat, practic, sunt identice cu ale oțelului etalon 41Cr4;
- deși, literatura [36], [114], [47], [48] recomandă oțelurile cu structuri martensitice ca fiind cu cea mai bună rezistență la cavitație, datele din histogramele prezentate în fig. 2.114 și 2.115, arată că se pot genera oțeluri cu structuri combinate, cum este cea a oțelului C3(12/6), cu 60 % austenită și 40 % martensită, care să aibă rezistență, la eroziunea prin cavitație, similară sau superioară celor cu structuri martensitice, folosite decenii la rând în fabricarea rotoarelor și paletelor pompelor și turbinelor hidraulice [6], [75]. Cum austenita se pretează foarte bine la tratamente termice, se poate aprecia, că în viitor trebuie cercetate oțeluri cu structuri diferite de cea martensitică, care să poată suporta operații de prelucrare mecanică și tratamente termice, prin care să se sporească proprietățile mecanice ce influențează rezistența și comportamentul în timpul atacurilor cavitației;
- din diagrama de viteză, se observă că pentru oțelurile C4 (12/10), C2 (12/2) și C3 (12/6), considerate ca fiind cu bună rezistență la eroziunea cavitației, din comparația cu oțelurile etalon 40Cr4 și OH12NDL, vitezele de eroziune tind să se stabilizeze începând cu minutul 90, fig. 2.111. De asemenea, aceste oțeluri tind să reziste mai bine la cavitație, pe măsură ce atacul se accentuează; viteza de eroziune tinde, ușor, să scadă, deși structurile sunt formate din proporții diferite ale celor trei constituenți (martensită, ferită, austenită). Prin urmare se dovedește că se poate obține spor de rezistență nu numai prin proprietăți mecanice superioare (avute de acestea, tabelul 2.1) dar și printr-o structură adecvată.

Pentru a avea o imagine asupra gradului de rezistență și efectului parametrilor aparatului vibrator utilizat în producerea cavitației, în tabelul 2.4 sunt comparate rapoartele dintre vitezele adâncimilor medii de eroziune (din zona de stabilizare) realizate pe cele 8 oțeluri cercetate.

**Tabel 2.4** Raportul dintre vitezele medii de eroziune


Raportul	Oțel							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
$\frac{MDER_{ST1}}{MDER_{ST2}}$	7,945	6,766	8,071	7,028	6,176	6,163	6,516	6,424

Din acest tabel rezultă că distrugerea cavitațională, respectiv comportarea la cavitație a oțelurilor inoxidabile cercetate, este dependentă de parametrii funcționali ai aparatului vibrator utilizat și de compoziția chimică și caracteristicile structurale și mecanice ale oțelurilor. Această diferență se constată la oțelurile C2 și C5, respectiv C3 și C7, cu proporții aproximative de nichel și crom, dar cu diferențe între celelalte elemente chimice de aliere, importante.


Se observă, de asemenea, că acest raport nu este unul constant. Pentru oțelurile cu rezistență ridicată (cum este C3) intensitatea de distrugere a aparatului T2, vis a vis de cea a aparatului T1, este mai mică decât în cazul celorlalte oțeluri. Intensitatea sa crește cu scăderea rezistenței la cavitație a oțelului (oțelurile C5 și C6). Aceste constatări conduc la concluzia că și structura constitutivă a oțelului influențează intensitatea evoluției distrugerii prin cavitație. Totodată, acest aspect arată complexitatea fenomenului mecanic al distrugerii prin cavitație și dificultatea realizării unei relații de efect de scară, care să permită transpunerea rezultatelor între aparate vibratorii cu parametrii funcționali diferiți.

În tabelul 2.5 se prezintă o ierarhizare a celor 8 oțeluri testate, după rezistența la cavitație, folosind ca parametri de referință vitezele de stabilizare a pierderilor masice  $v_s$ , rezistența normalizată la cavitație  $R_{ns} = v_s/v_{sOH12NDL}$ .

**Tabelul 2.5 a** Clasificarea după rezistența normalizată la cavitație (oțelul etalon 40Cr4)

Oțelul cercetat	Aparatul T1		Rezistența la cavitație
	Parametrul eroziunii		
	$v_s$ [mm <sup>3</sup> /min]	$R_{ns}$ 41Cr4	
41Cr4	0,047	1	bună  superrezistentă
C5(12/2)*	0,054	1,157	
C6(12/4)	0,054	1,144	
C1(12/0,5)	0,043	0,92	
C8(12/8)	0,036	0,762	
C7(12/6)*	0,036	0,755	
C4(12/10)	0,012	0,72	
C2(12/2)	0,022	0,462	
C3(12/6)	0,0038	0,081	

**Tabelul 2.5b** Clasificarea după rezistența normalizată la cavitație (oțelul etalon OH12NDL)

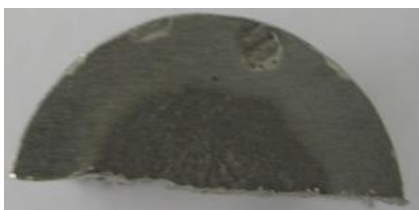
Oțelul cercetat	Aparatul T2		Rezistența la cavitație
	Parametrul eroziunii		
	vs [mm <sup>3</sup> /min]	Rns OH12NDL	
OH12NDL	0,03	1	bună  superrezistentă
C5(12/2)*	0,029	1,02	
C6(12/4)	0,03	1,01	
C1(12/0,5)	0,02	0,81	
C8(12/8)	0,02	0,67	
C7(12/6)*	0,018	0,66	
C4(12/10)	0,0068	0,44	
C2(12/2)	0,013	0,4	
C3(12/6)	0,002	0,07	

Din tabelul 2.5 remarcăm tendința de creștere a rezistenței la cavitație pentru oțelurile cu conținuturi apropiate de 6 % nichel, respectiv cu structuri combinate de martensită și austenită.

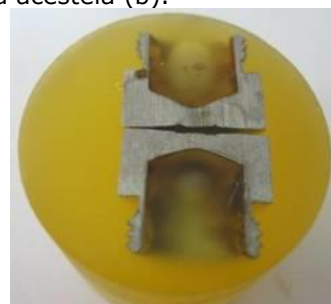
O discuție mai substanțială, cu privire la clasificarea oțelurilor cercetate, după rezistența la cavitație este realizată în capitolul 3.

## 2.4. Investigații metalografice

Probele testate cavitațional timp de 165min, au fost supuse examinărilor metalografice în vederea aprofundării mecanismului de degradare a stratului de suprafață. Conform Fig. 2.118 a fost cercetată atât suprafața aflată sub impactul bulelor cavitaționale (a), cât și o secțiune transversală a acestuia (b).



- a -



- b -

Fig. 2.118 Taierea probelor și înglobarea în rășină

Atacul metalografic al probelor secționare s-a făcut cu apă regală (1/4 HNO<sub>3</sub> acid azotic – 3/4 HCl acid clorhidric și 1-2 picături de glicerină) și un compus format din 1/10 HNO<sub>3</sub> acid azotic.

Din cele două imagini se observă degradarea prin expulzare a grăunților și forma neregulată a cavernelor produse la impactul cu microjeturile și undele de șoc generate prin implozia bulelor cavitaționale.

## **2.5. Aspecte ale microstructurii erodate. Fenomenologia degradărilor prin cavitație**

Analizând datele din imaginile probelor testate pe aparatul magnetostrictiv T1, se desprind concluzii similare și pentru cele testate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, deoarece ele provin din aceleași șarje, diferența fiind legată doar de parametrii funcționali (amplitudine, ferență vibrații și diametru probe), restul condițiilor de testare (mediul lichid și temperatura, pregătire probe, etc.) fiind aceleași.

Datorită intensității mai mari de distrugere a aparatului T1, suprafața erodată pe acest aparat prezintă cavități și adâncimi de pătrundere mai mari, decât cele testate pe T2.

### **Oțelul inoxidabil C1 (12%Cr/0,5%Ni)**

În figurile ce urmează vor fi prezentate diagrama EDAX și imagini ale structurii obținute prin microscopie optică și electronică.

Compoziția chimică determinată cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM:

SiK, 1.79, 3.47, 0.0069, 1.1081, 0.3448, 1.0019  
V K, 1.71, 1.82, 0.0187, 0.9762, 0.9708, 1.1537  
CrK, 12.09, 12.62, 0.1445, 0.9954, 0.9848, 1.2190  
MnK, 2.37, 2.34, 0.0229, 0.9789, 0.9893, 1.0000  
FeK, 82.04, 79.75, 0.7907, 0.9990, 0.9648, 1.0000  
Total, 100.000, 100.000

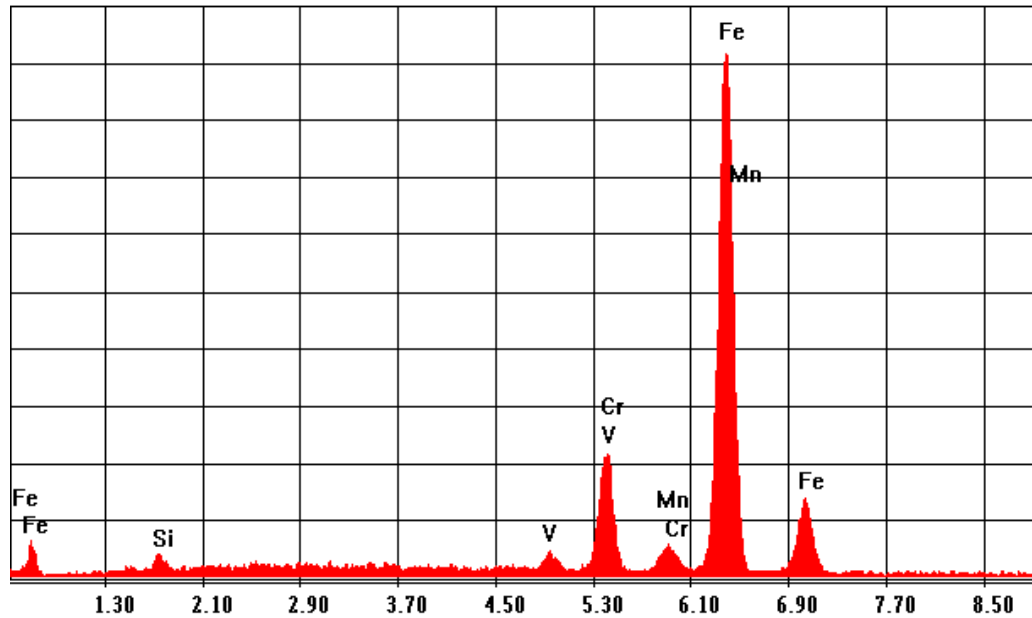


Fig. 2.119 Diagrama EDAX pentru proba C1 (12/0,5)

Mai jos, în fig. 2.120 și fig. 2.121 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

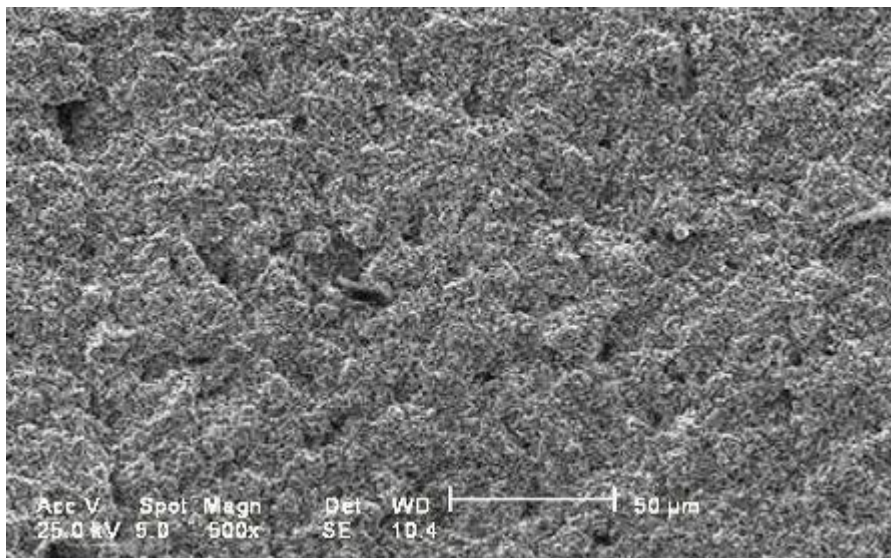


Fig. 2.120 Analiza structurala a probei C1(12/0,5) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)



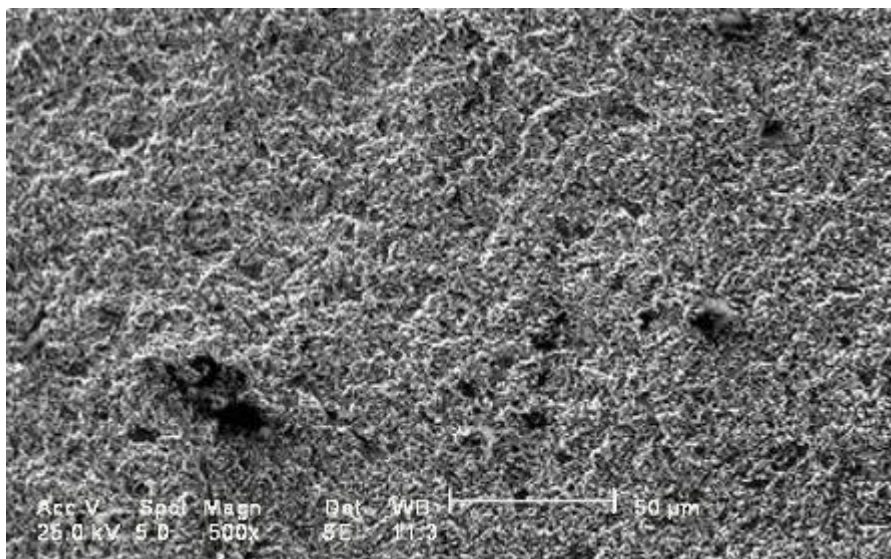


Fig. 2.121 Analiza structurala a probei C1(12/0,5) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafețele atacate prezintă o rupere fragilă și cavități fine. Propagarea ruperii a avut loc prin fisuri intergranulare și linii de alunecare.

În fig. 2.122 și fig. 2.123 sunt redată aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C1(12/0), cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.

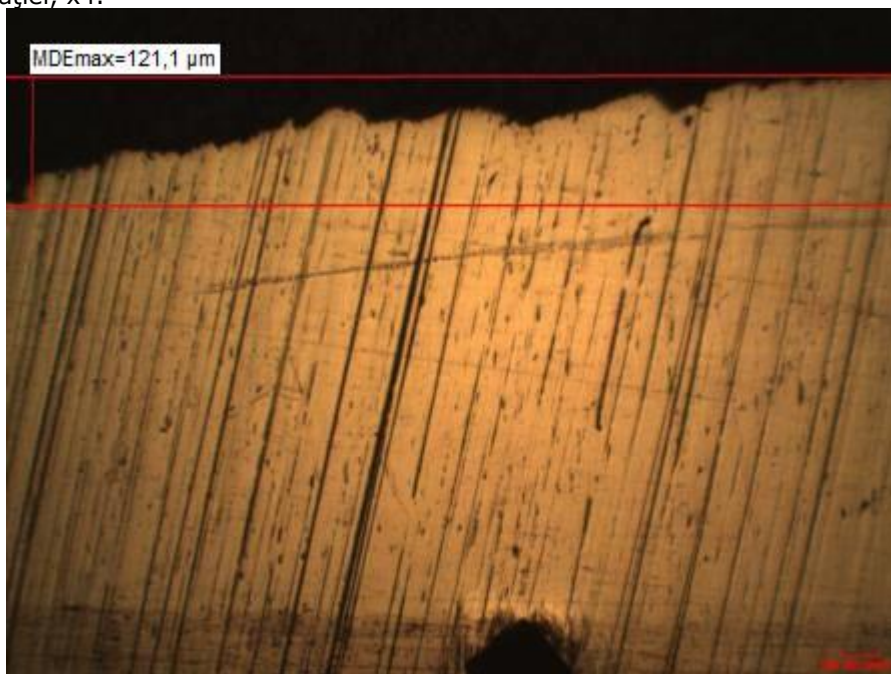


Fig. 2.122 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C1(12/0,5) testată pe T1, stare neatcată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

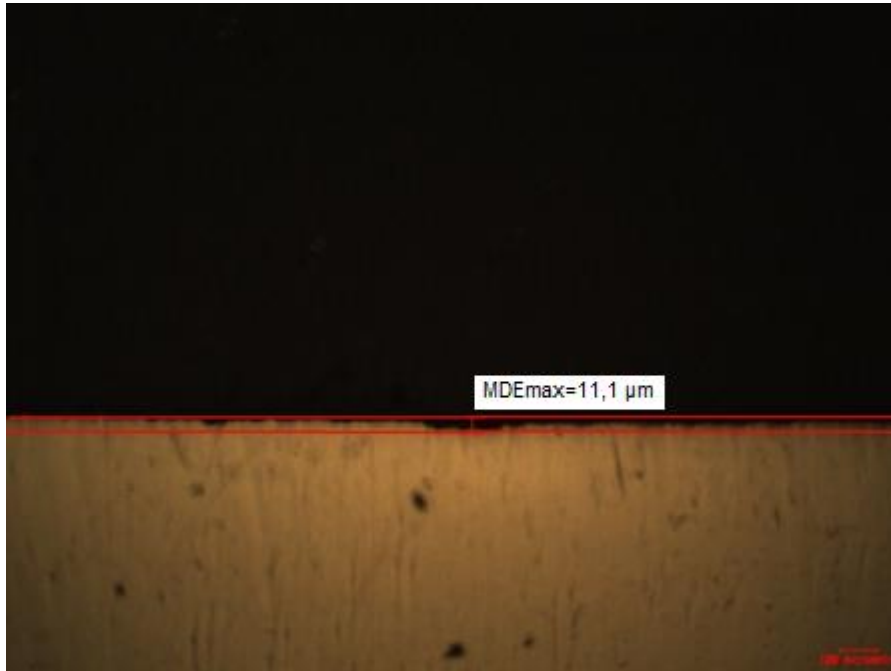


Fig. 2.123 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C1(12/0,5) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

Din imaginile de mai sus putem observa că oțelul C1 prezintă o suprafață cu o distrugere destul de uniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest lucru se datorează omogenității structurale a materialului.

### **Oțelul inoxidabil C2 (12%Cr/2%Ni)**

În figurile ce urmează vor fi prezentate diagrama EDAX și imagini ale structurii obținute prin microscopie optică și eoelectronică.

Compoziția chimică determinată cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM:

SiK,	1.63,	3.16,	0.0062,	1.1074,	0.3416,	1.0019
CrK,	13.14,	13.77,	0.1568,	0.9948,	0.9842,	1.2182
MnK,	2.13,	2.11,	0.0208,	0.9783,	0.9939,	1.0022
FeK,	80.92,	78.94,	0.7825,	0.9984,	0.9657,	1.0029
NiK,	2.17,	2.02,	0.0184,	1.0173,	0.8314,	1.0000
Total,	100.000,	100.000				

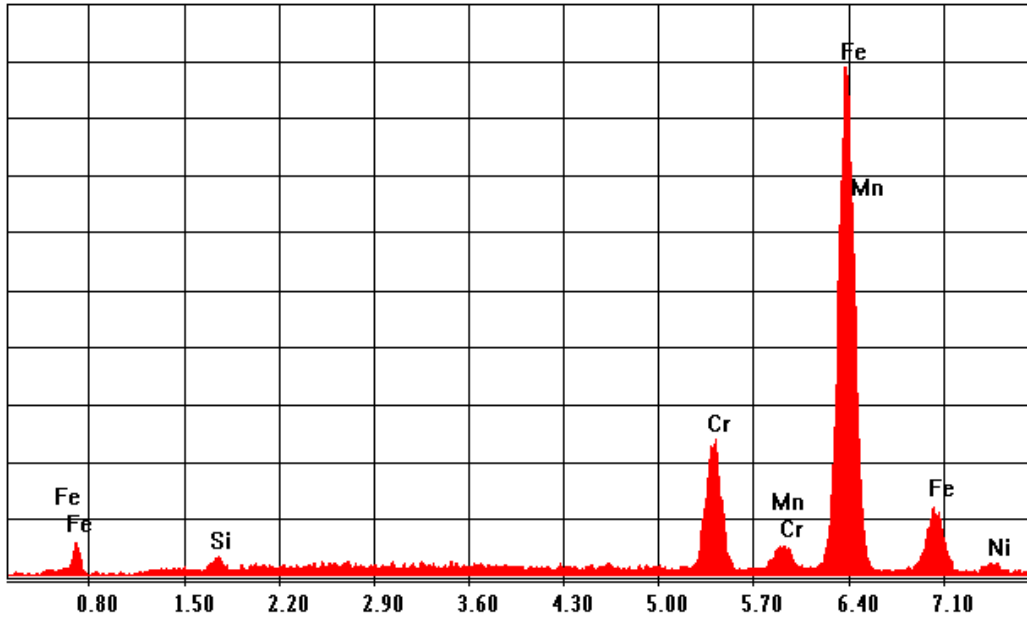


Fig. 2.124 Diagrama EDAX pentru proba C2 (12/2)

Mai jos în fig. 2.125 și fig. 2.126 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

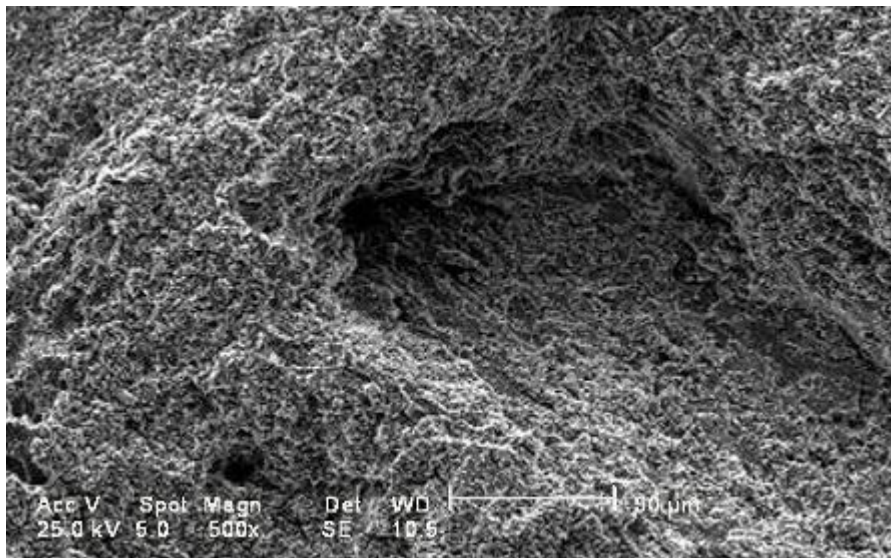


Fig. 2.125 Analiza structurală a probei C2(12/2) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

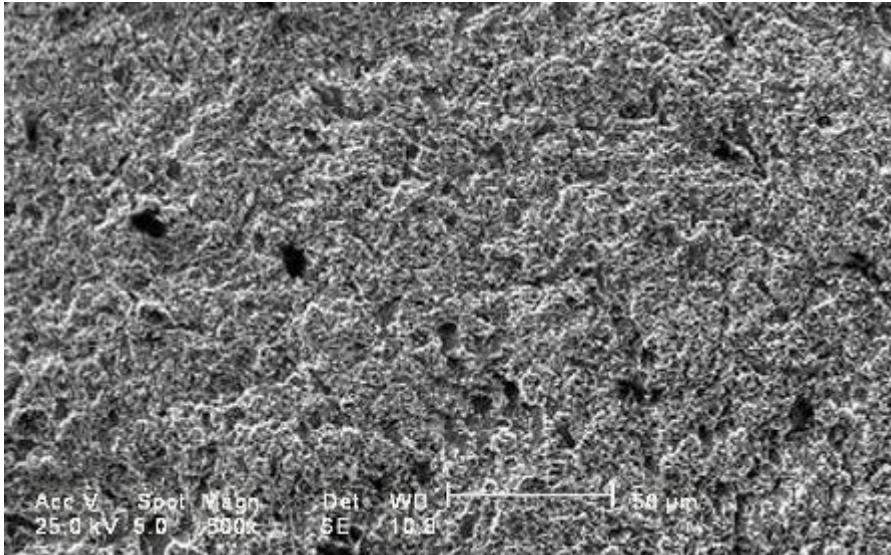


Fig. 2.126 Analiza structurala a probei C2(12/2) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

La oțelul C2 suprafețele atacate prezintă o rupere prin cavitație cu aspect intergranular, fragil și clivaj.

În fig. 2.127 și fig. 2.128 de mai jos sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C2(12/2), cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.

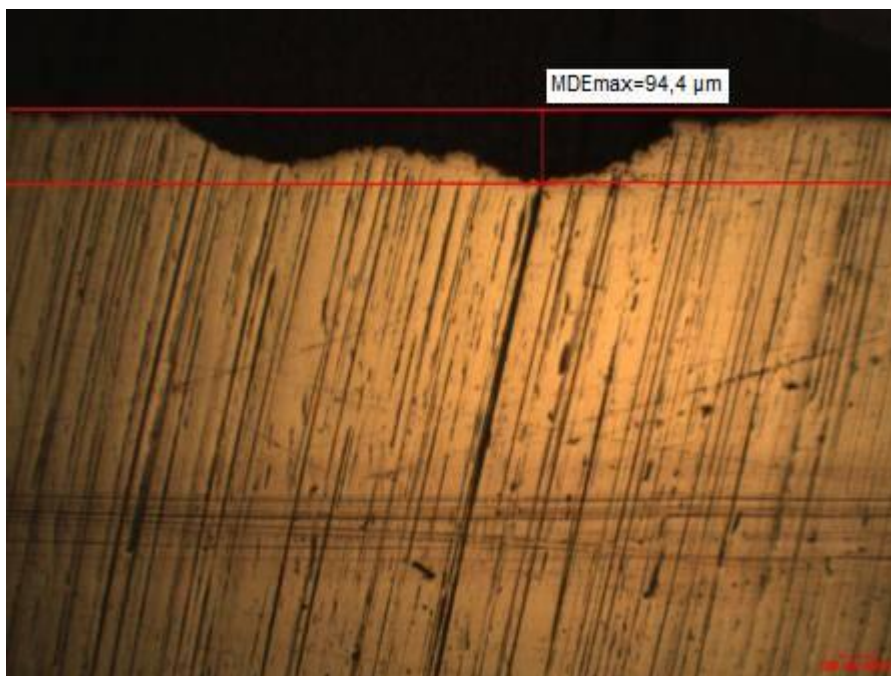




Fig. 2.127 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C2(12/2) testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

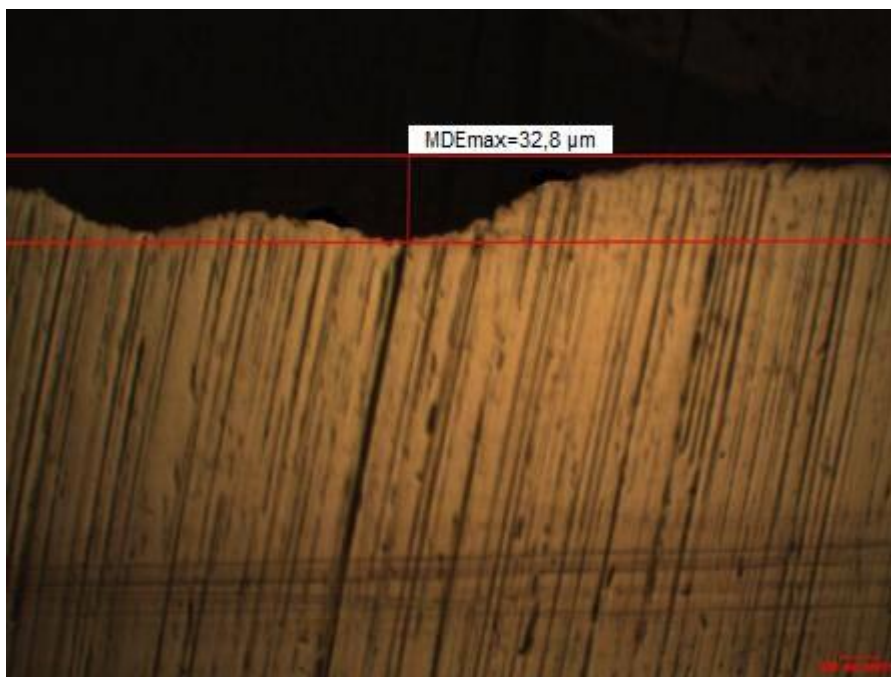


Fig. 2.128 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C2(12/2) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

Din imaginile de mai sus putem observa că oțelul C2 prezintă o suprafață cu o distrugere neuniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest lucru se datorează insulelor de ferită (constituent cu rezistență scăzută la cavitație) prezente în matricea martensitică (constituent cu rezistență mare la cavitație), fapt care a făcut ca distrugerea să fie neuniformă în ultima parte a atacului.

### **Oțelul inoxidabil C3 (12%Cr/6%Ni)**

În figurile ce urmează vor fi prezentate diagrama EDAX și imagini ale structurii obținute prin microscopie optică și electronică.

Compoziția chimică determinată cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM:

AlK, 1.35, 2.67, 0.0036, 1.0727, 0.2465, 1.0014  
SiK, 2.40, 4.57, 0.0090, 1.1042, 0.3390, 1.0018  
CrK, 12.67, 13.03, 0.1488, 0.9918, 0.9824, 1.2048  
MnK, 2.24, 2.18, 0.0218, 0.9754, 0.9925, 1.0066  
FeK, 75.16, 71.93, 0.7289, 0.9953, 0.9660, 1.0087  
NiK, 6.18, 5.63, 0.0527, 1.0142, 0.8412, 1.0000  
Total, 100.000, 100.000

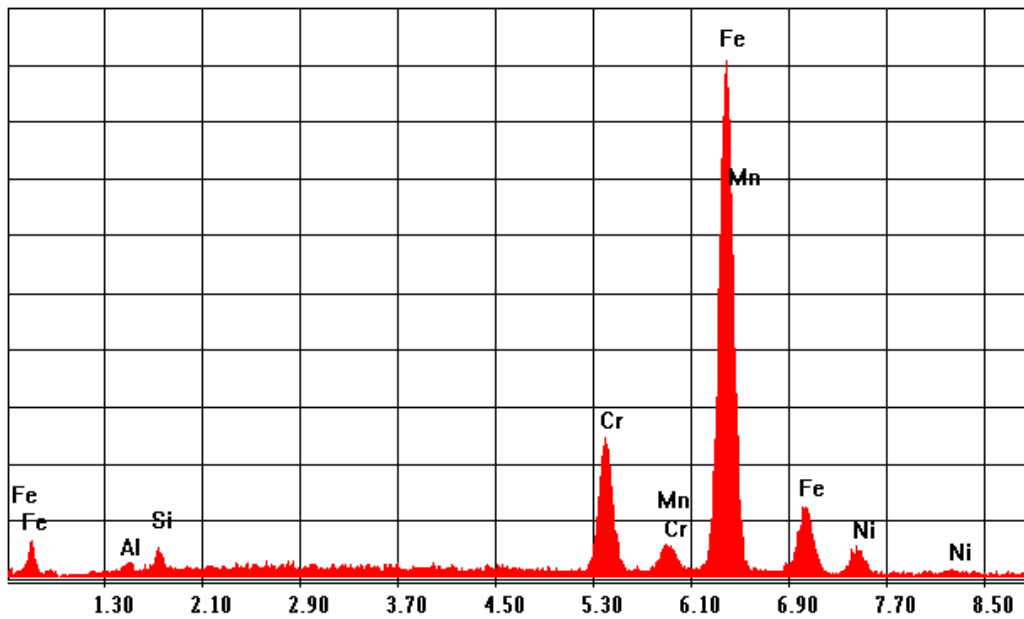


Fig. 2.129 Diagrama EDAX pentru proba C3 (12/6)

Mai jos în fig. 2.130 și fig. 2.131 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

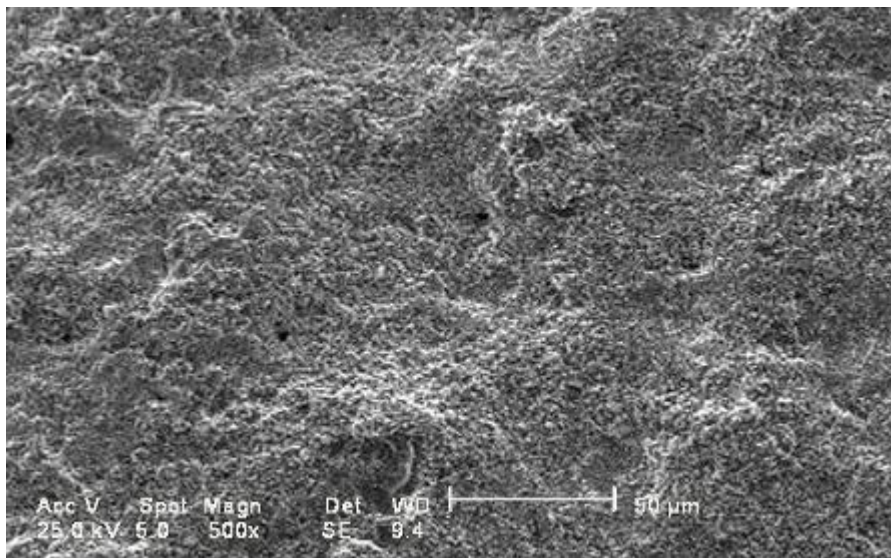


Fig. 2.130 Analiza structurală a probei C3(12/6) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

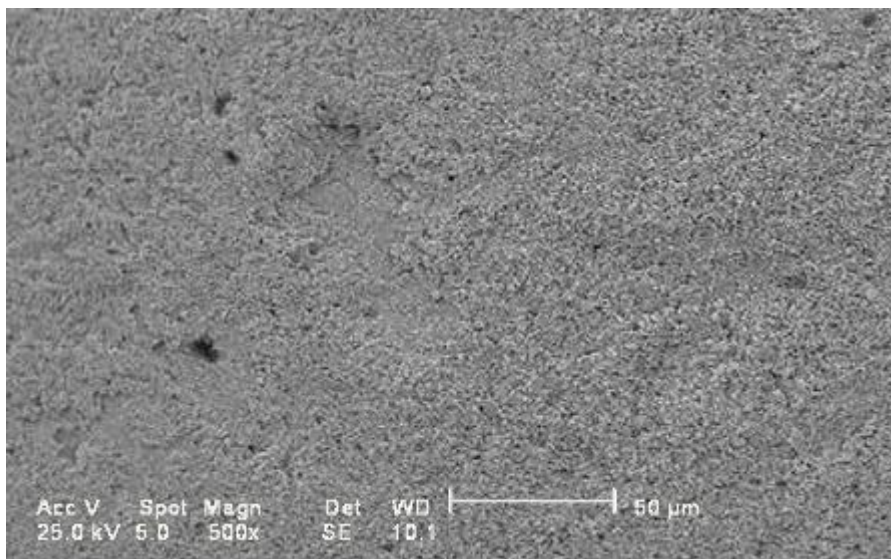


Fig. 2.131 Analiza structurală a probei C3(12/6) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafețele probelor din oțelul C3 prezintă ruperea prin cavitație cu aspect fragil și fisuri intergranulare.

În fig. 2.132 și fig. 2.133 de mai jos sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C3(12/6), cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.

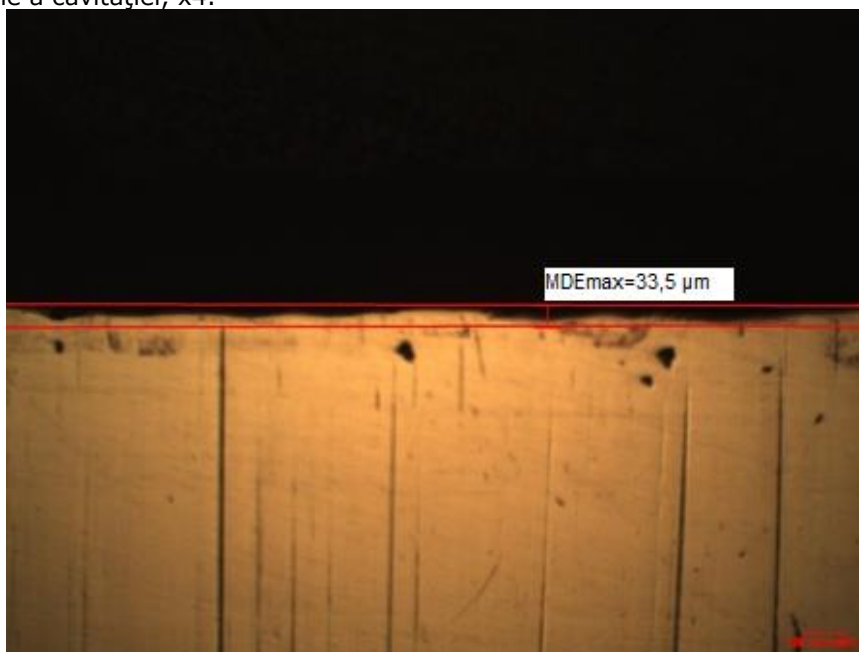


Fig. 2.132 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C3(12/6) testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4



Fig. 2.133 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C3(12/6) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

Din imaginile de mai sus putem observa că oțelul C3 prezintă o suprafață cu o distrugere uniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest lucru se datorează faptului că atât martensita cât și austenita cu o cantitate mică de carburi de crom prezente în microstructură asigură o rezistență mare la eroziunea cavitațională.

#### **Oțelul inoxidabil C4 (12%Cr/10%Ni)**

În figurile ce urmează vor fi prezentate diagrama EDAX și imagini ale structurii obținute prin microscopie optică și electronică.

Compoziția chimică determinată cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM:

AlK,	1.34,	2.67,	0.0035,	1.0719,	0.2438,	1.0013
SiK,	2.34,	4.47,	0.0087,	1.1034,	0.3354,	1.0017
CrK,	12.37,	11.73,	0.1327,	0.9912,	0.9814,	1.1996
MnK,	3.36,	3.28,	0.0329,	0.9747,	0.9917,	1.0121
FeK,	70.63,	67.84,	0.6916,	0.9947,	0.9688,	1.0160
NiK,	10.95,	10.01,	0.0943,	1.0136,	0.8491,	1.0000
Total,	100.000,	100.000				



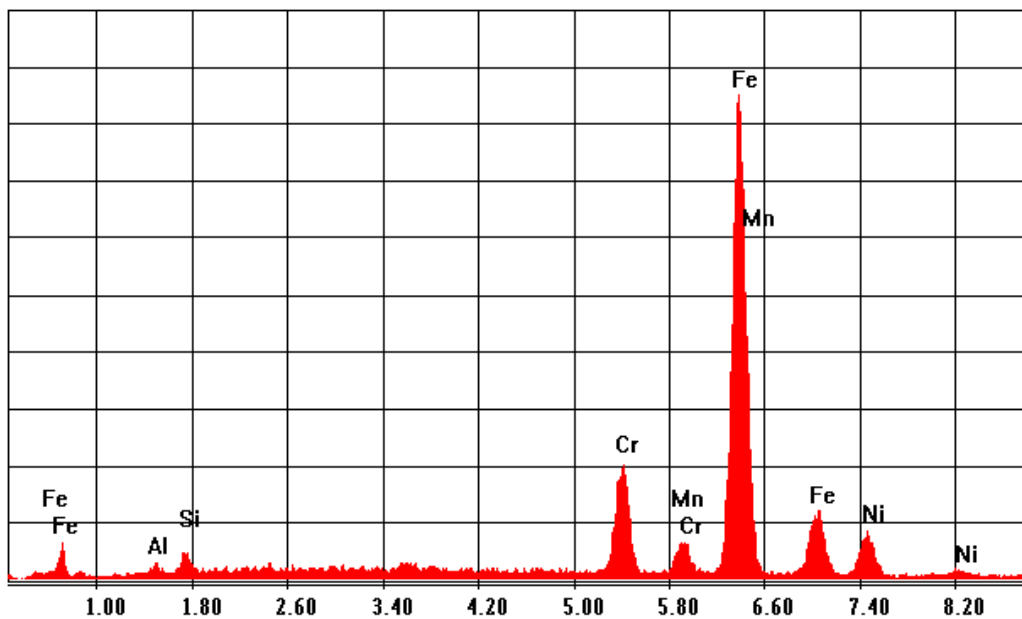


Fig. 2.134 Diagrama EDAX pentru proba C4 (12/10)

Mai jos, în fig. 2.135 și fig. 2.136 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

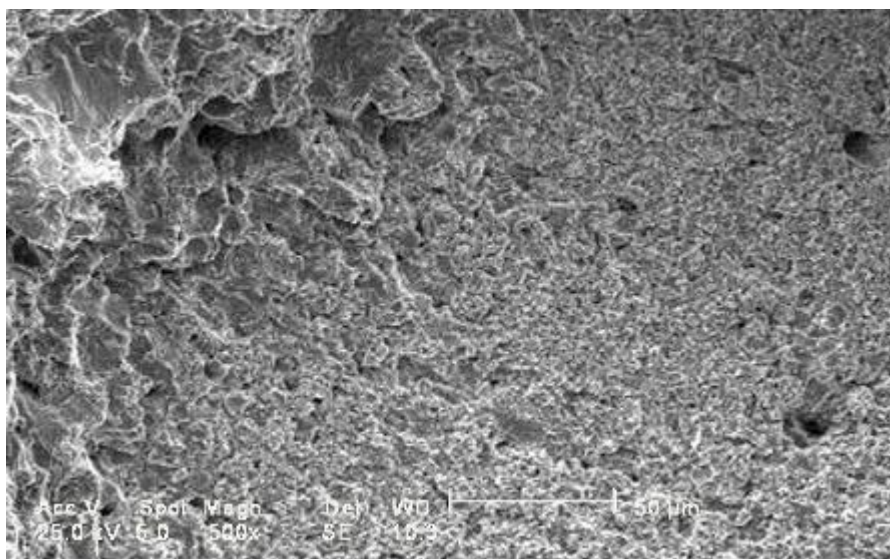


Fig. 2.135 Analiza structurală a probei C4(12/10) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

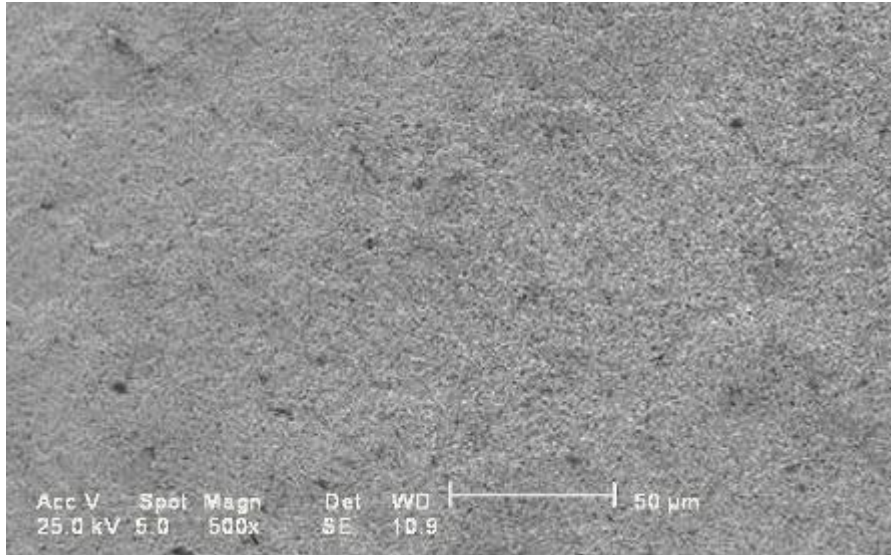


Fig. 2.136 Analiza structurală a probei C4(12/10) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Ruperea materialului de pe suprafețele probelor din oțel C4, are un aspect fragil cu propagare intergranulară și transcristalină.

În fig. 2.137 și fig. 2.138 de mai jos sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C4(12/10), cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.

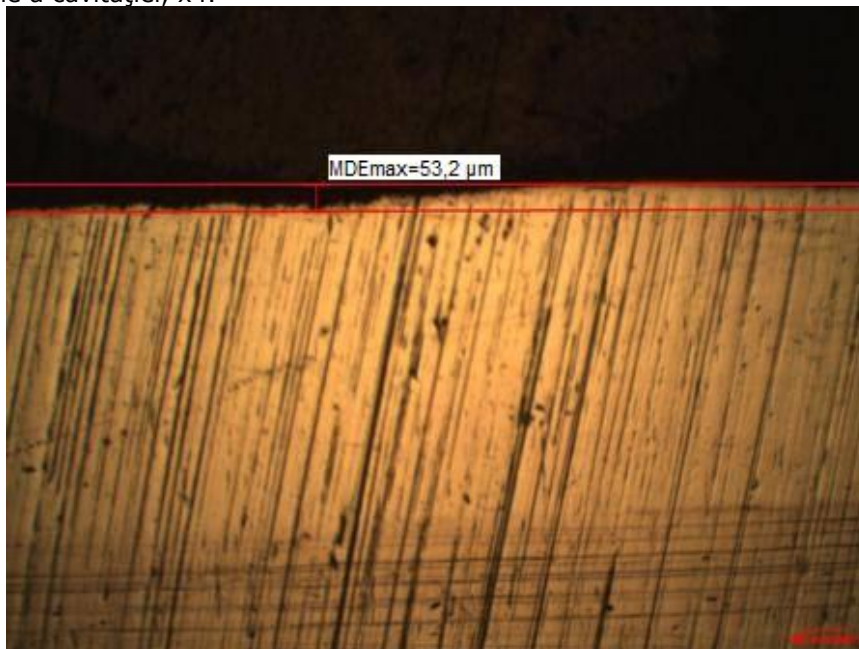


Fig. 2.137 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C4(12/10) testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

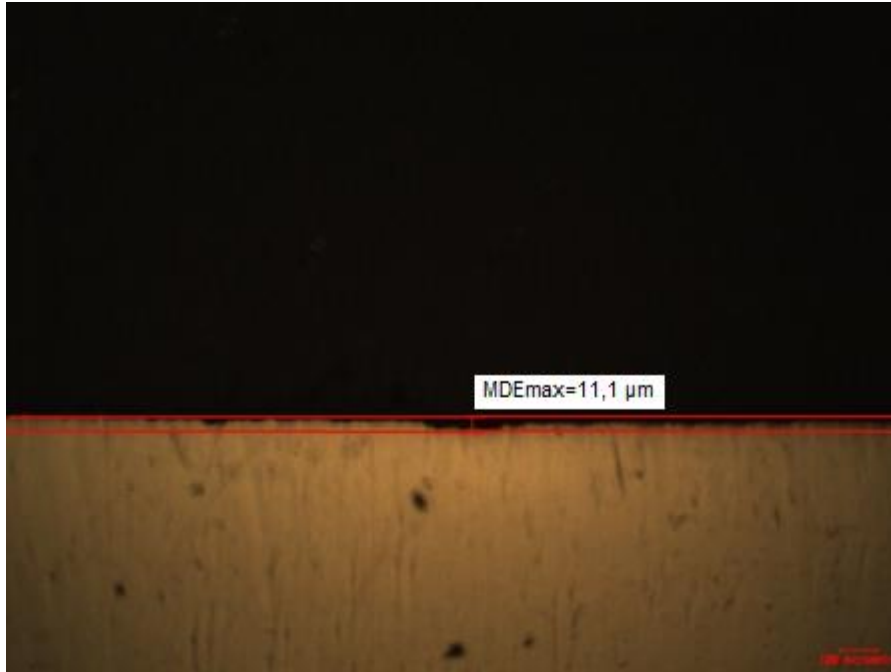


Fig. 2.138 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C4(12/10) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

Din imaginile de mai sus putem observa că oțelul C4 prezintă o suprafață cu o distrugere neuniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest comportament se datorează unei microstructuri alcătuită din austenită + o cantitate mică de carburi de crom, cu o duritate relativ mică, de cca. 25 HRC.

#### **Oțelul inoxidabil C5 (12%Cr/2%Ni)\***

Mai jos, în fig. 2.139 și fig. 2.140 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

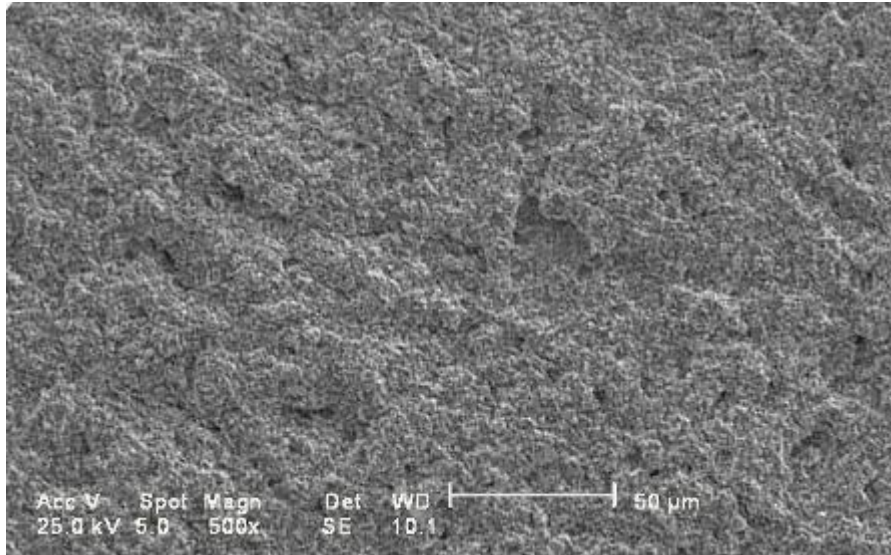


Fig. 2.139 Analiza structurală a probei C5(12/2)\* testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

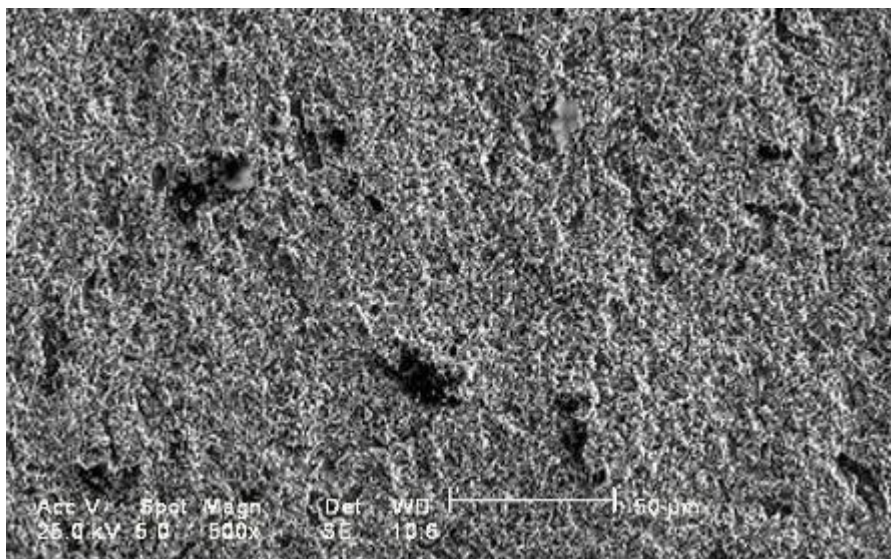


Fig. 2.140 Analiza structurală a probei C5(12/2)\* testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafețele probelor din oțel C5 prezintă cavitații fine (2-8 $\mu$ m) și grobe. Ruperea materialului prin cavitație are un aspect intergranular, fragil.

În fig. 2.141 și fig. 2.142 de mai jos sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C5(12/2)\*, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.



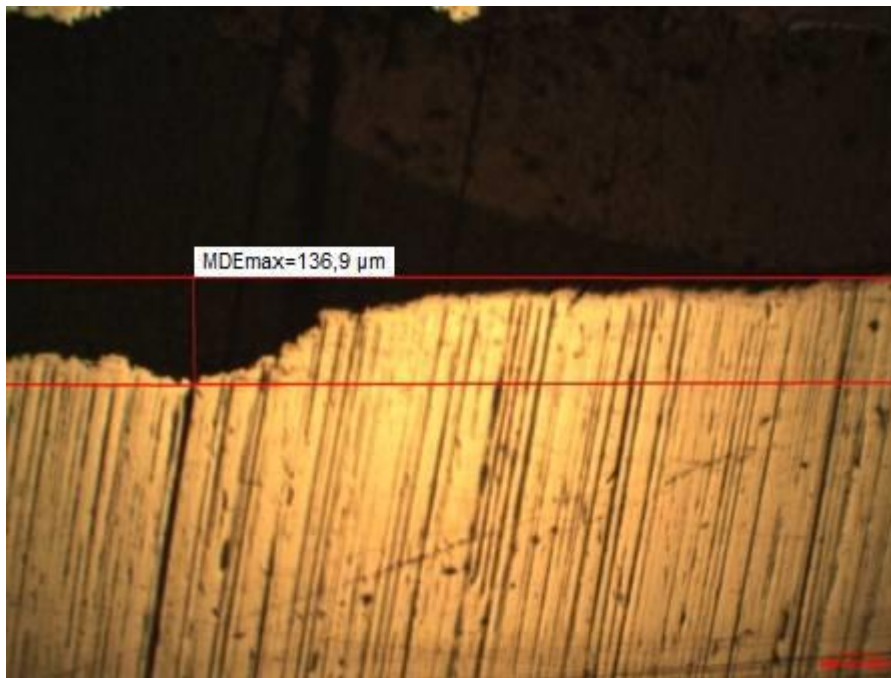


Fig. 2.141 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C5(12/2)\* testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

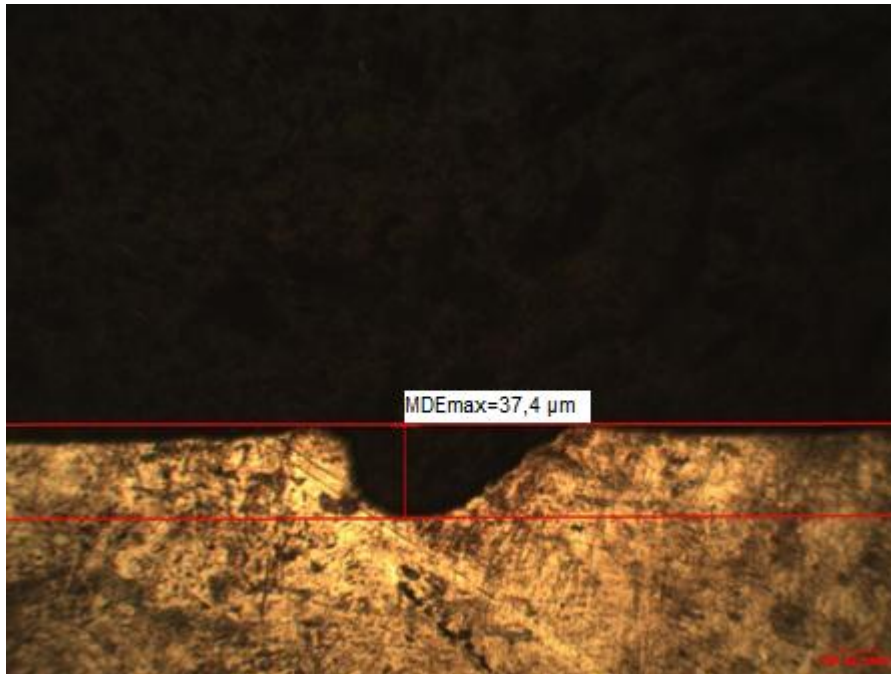


Fig. 2.142 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C5(12/2)\* testată pe T2, stare neatacat, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

Din imaginile de mai sus se poate observa că oțelul C5 prezintă o suprafață cu o distrugere neuniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2.

În fig.2.143 de mai jos sunt date aspectele metalografice a secțiunii transversale pentru o probă din oțel C5(12/2)\*, cu evidențierea stratului de suprafață durificat în urma atacului cavitațional.

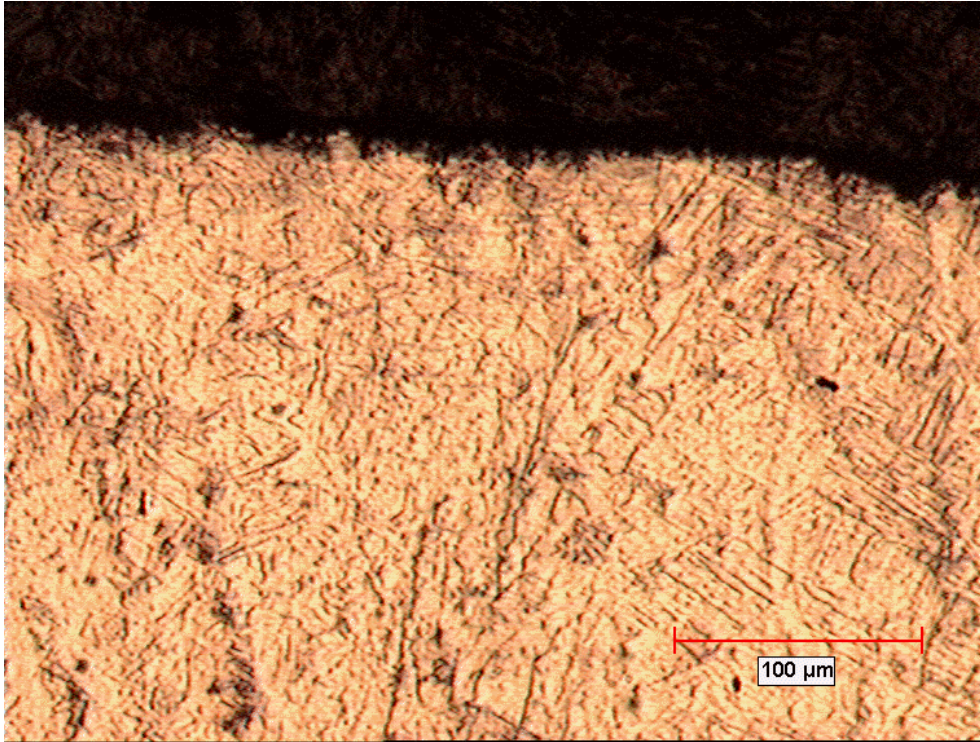


Fig. 2.143 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C5\*(12/2), cu evidențierea durificării stratului atacat

Din figura de mai sus se poate observa că suprafața probei se durifică în urma atacului cavitațional. Această durificare a suprafeței este și motivul pentru care, după minutul 105-135 de atac cavitațional, viteza de eroziune tinde să se stabilizeze, conform evoluției curbelor acestora prezentate anterior.

### **Oțelul inoxidabil C6 (12%Cr/4%Ni)**

Mai jos, în fig. 2.144 și fig. 2.145 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.



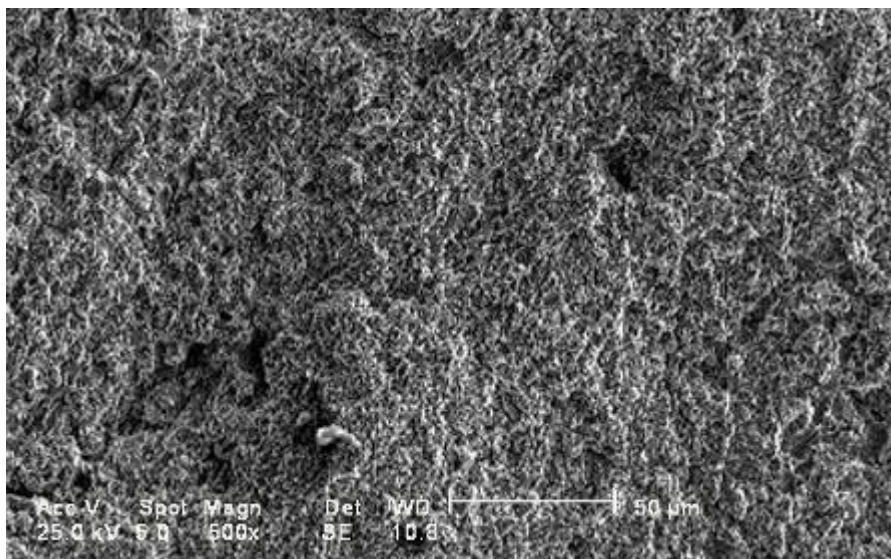


Fig. 2.144 Analiza structurală a probei C6(12/4) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

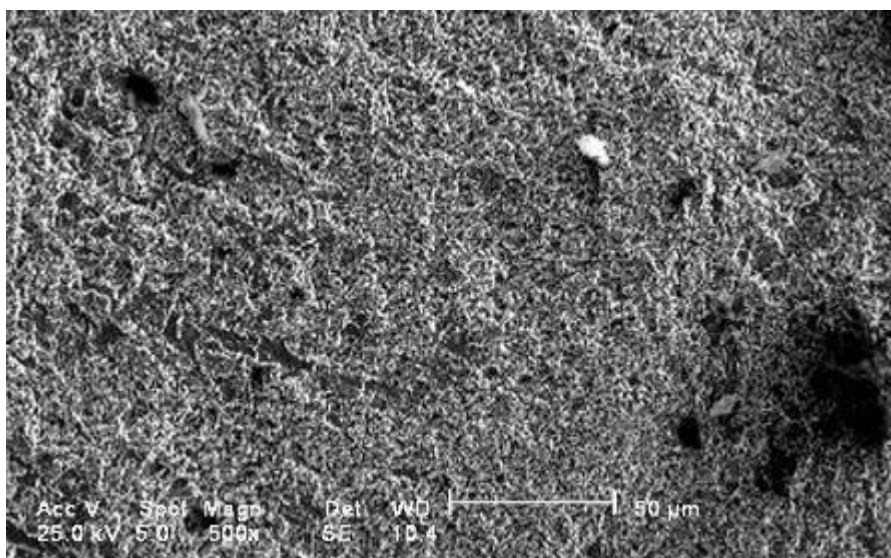


Fig. 2.145 Analiza structurală a probei C6(12/4) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafețele deteriorate ale probelor din oțel C6 prezintă o rupere prin clivaj cu aspect fragil, cu propagare intergranulară și cavități (10-15 $\mu$ m) cu aspect punctiform.

În fig. 2.146 și fig. 2.147 sunt redată aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C6(12/4), cu evidențierea adâncimii maxime a cavității, x4.

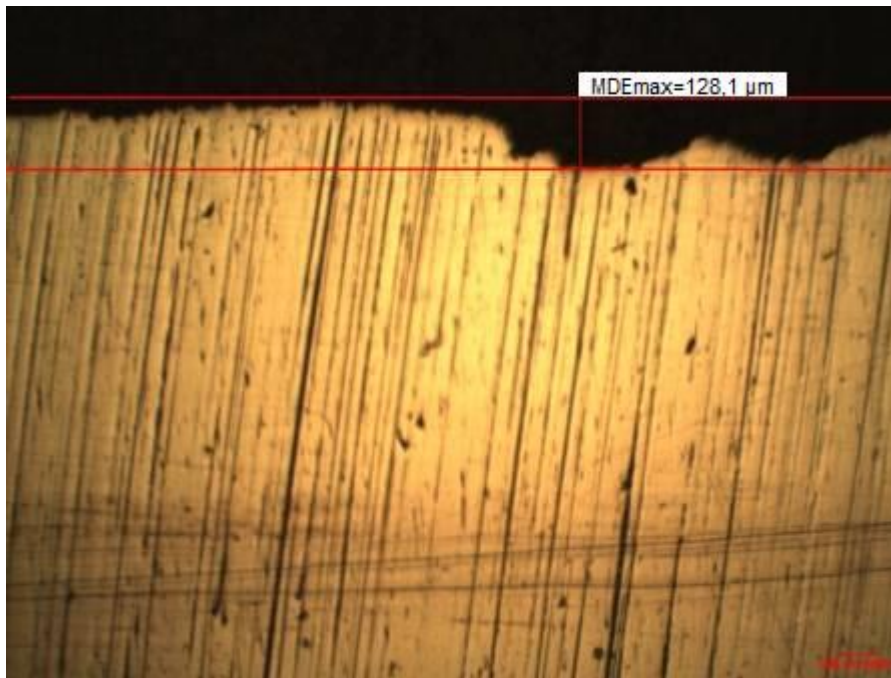


Fig. 2.146 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C6(12/4) testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

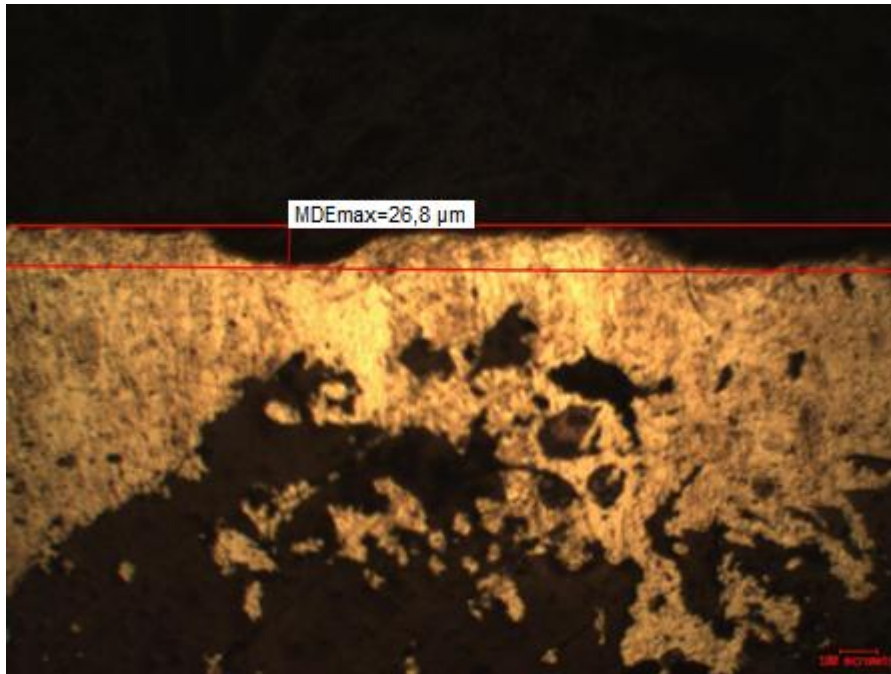


Fig. 2.147 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C6(12/4) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4



## 2.5. Aspecte ale microstructurii erodate. Fenomenologia degradărilor prin cavitație – 109

Din aceste imagini se poate observa că oțelul C6 prezintă o suprafață cu o distrugere neuniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest comportament este dat de duritatea relativ mică (30 HRC) a unei structuri martensitice „moi” determinată de conținutul redus în carbon.

În fig.2.148 de mai jos sunt date aspectele metalografice a secțiuni transversale pentru o probă din oțel C6(12/6), cu evidențierea stratului de suprafață durificat în urma atacului cavitațional.

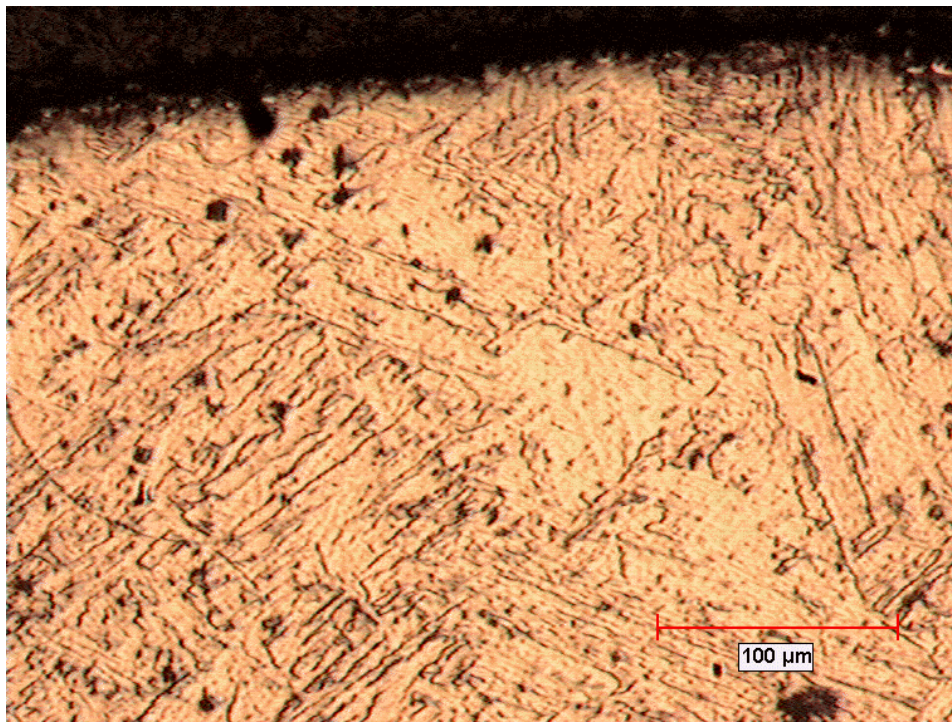


Fig. 2.148 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C6(12/4), cu evidențierea durificării stratului atacat

Și această imagine arată că suprafața probei se durifică în timpul atacului cavitațional.

**Oțelul inoxidabil C7 (12%Cr/6%Ni)\***

Mai jos, în fig. 2.149 și fig. 2.150 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

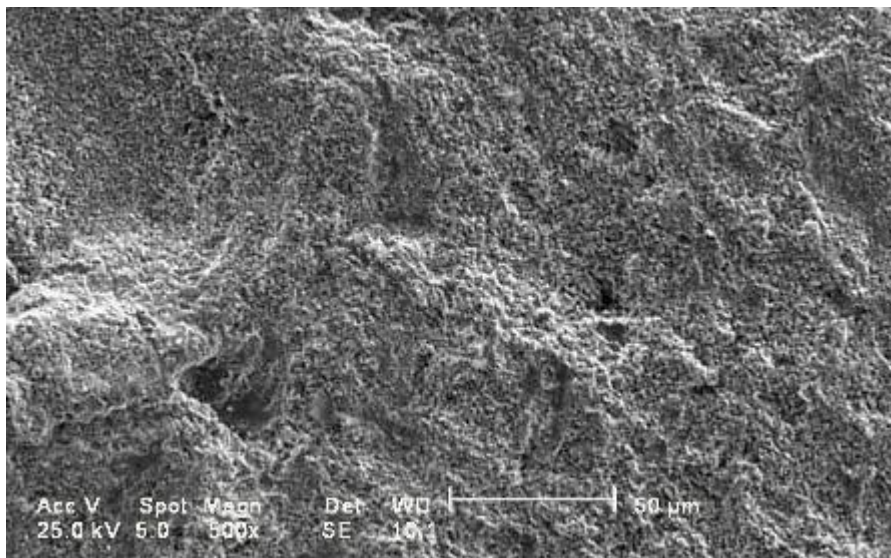


Fig. 2.149 Analiza structurală a probei C7(12/6)\* testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

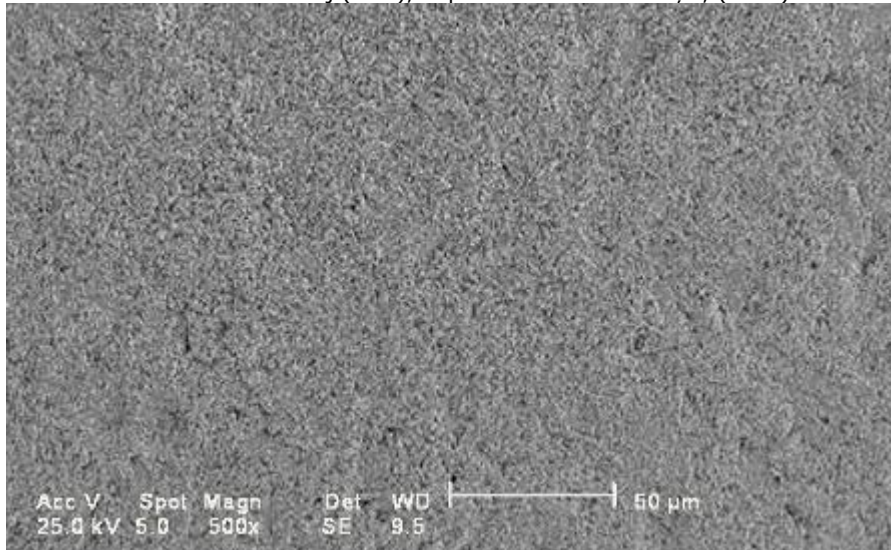


Fig. 2.150 Analiza structurală a probei C7(12/6)\* testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafața atacată are un aspect mixt al cavitațiilor (fine 1-5 $\mu$ m) și suprafețe cu clivaj cu evidențierea fisurilor intergranulare.

2.5. Aspecte ale microstructurii erodate. Fenomenologia degradărilor prin cavitație – 111

În fig. 2.151 și fig. 2.152 sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C7(12/6)\*, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4.

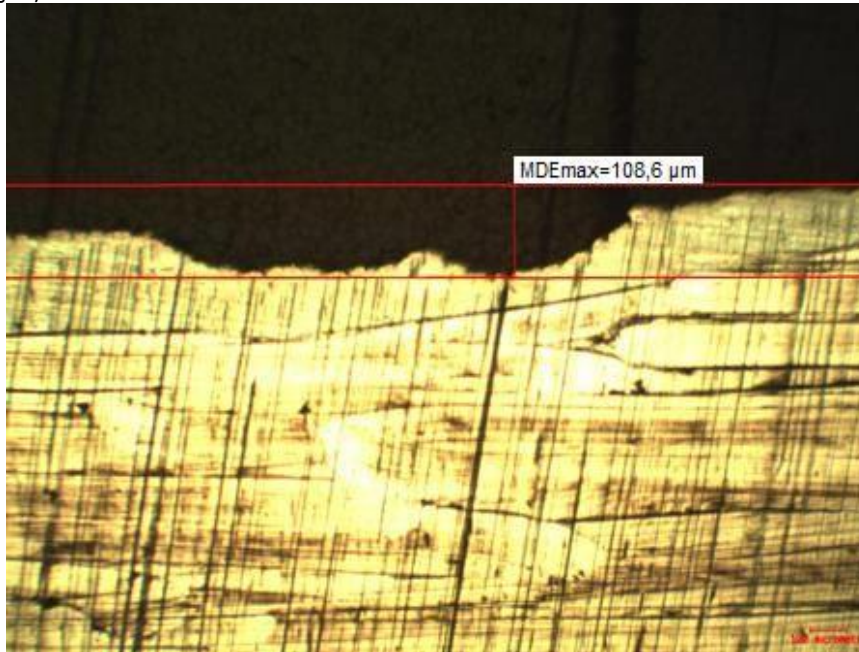


Fig. 2.151 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C7(12/6)\* testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

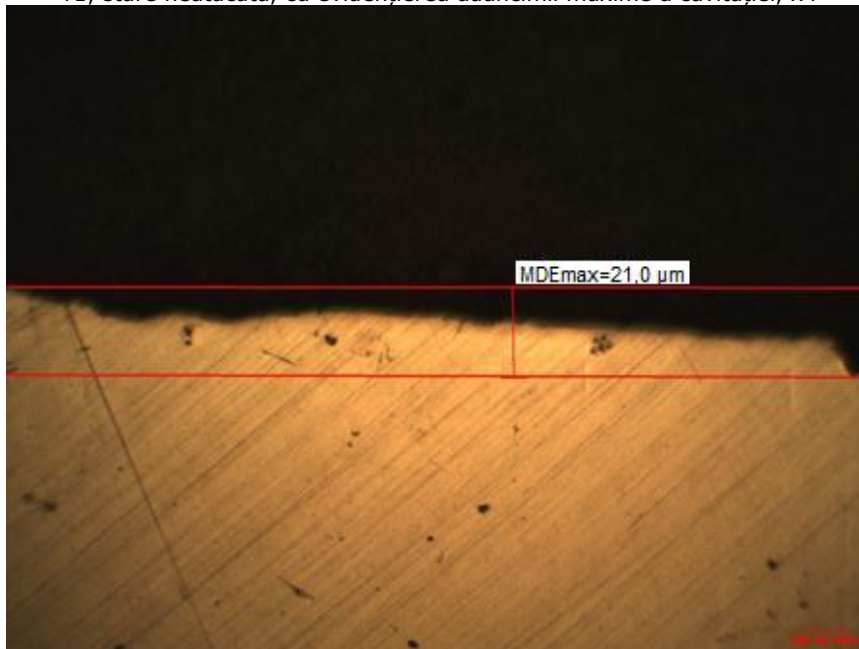


Fig. 2.152 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C7(12/6)\* testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4



Din aceste imagini se poate observa că oțelul C7 prezintă o suprafață cu o distrugere neuniformă cu cratere mari, atât pe aparatul T1 cât și pe T2.

În fig.2.153 de mai jos sunt date aspectele metalografice a secțiunii transversale pentru o probă din oțel C7(12/6)\*, cu evidențierea stratului de suprafață durificat în urma atacului cavitațional.

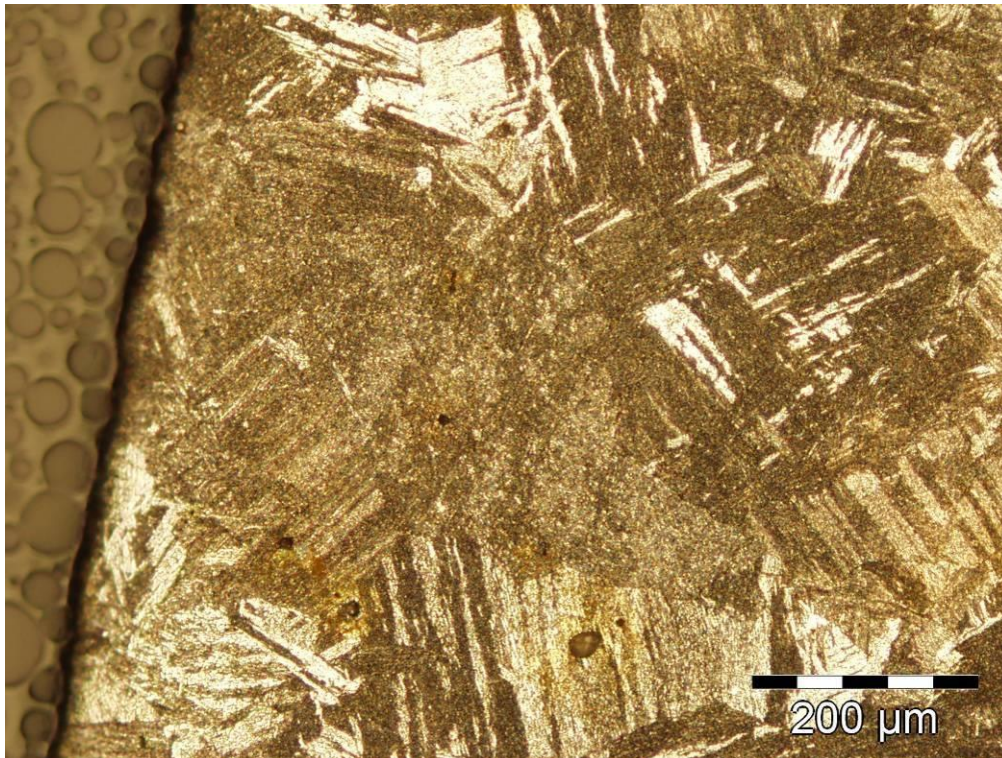


Fig. 2.153 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C7(12/6)\*, cu evidențierea durificării stratului atacat

Durificarea stratului superficial, sub impactul microjeturilor și undelor de șoc, produse în timpul cavitației, corelat cu evoluția curbelor de pierdere cumulată și a vitezelor de eroziune, se realizează după minutul 90 de atac.

#### **Oțelul inoxidabil C8 (12%Cr/8%Ni)**

Mai jos, în fig. 2.154 și fig. 2.155 sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, SEM.

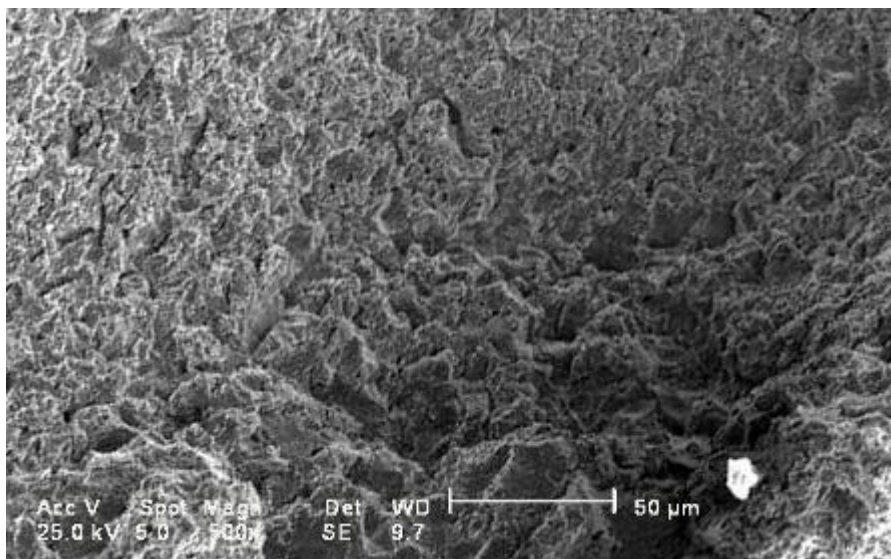


Fig. 2.154 Analiza structurală a probei C8(12/8) testată pe T1 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

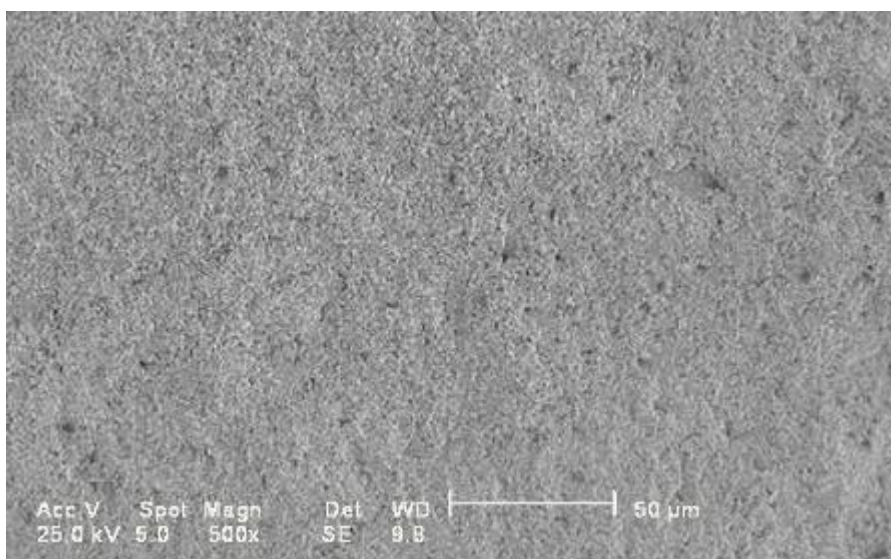


Fig. 2.155 Analiza structurală a probei C8(12/8) testată pe T2 la microscopul electronic cu baleiaj (SEM), după solicitare la cavitație, (x500)

Suprafețele probelor din oțel C8 au cavități fine cu evidențierea incluziunilor nemetalice. Se remarcă aspectul mixt al cavităților și suprafețele cu clivaj alături de fisuri fine intergranulare.

În fig. 2.156 și fig. 2.157 sunt date aspectele metalografice ale secțiunilor transversale ale probelor din oțel C8(12/8), cu evidențierea adâncimii maxime a cavității, x4.

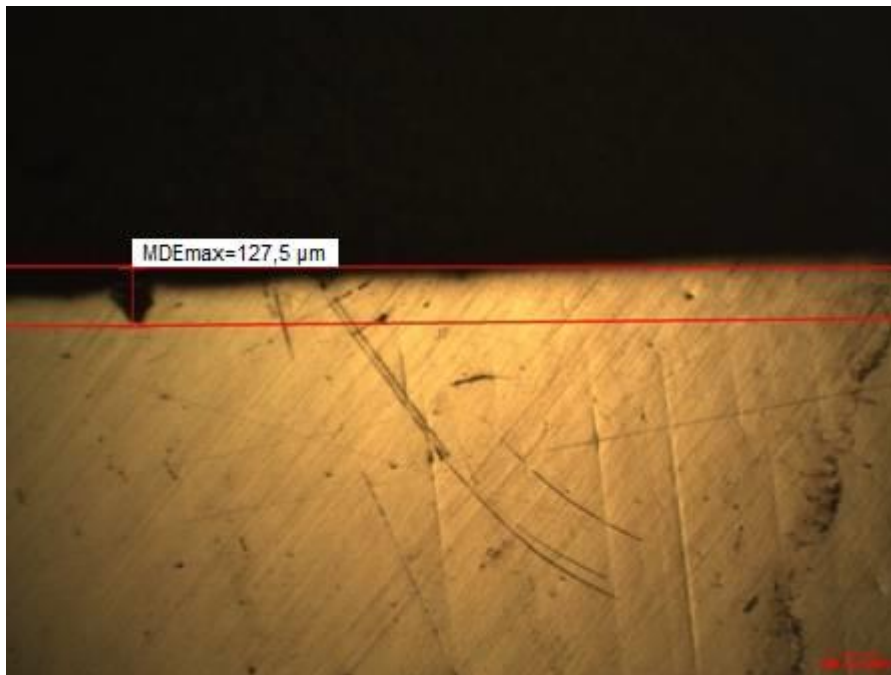


Fig. 2.156 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C8(12/8) testată pe T1, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4

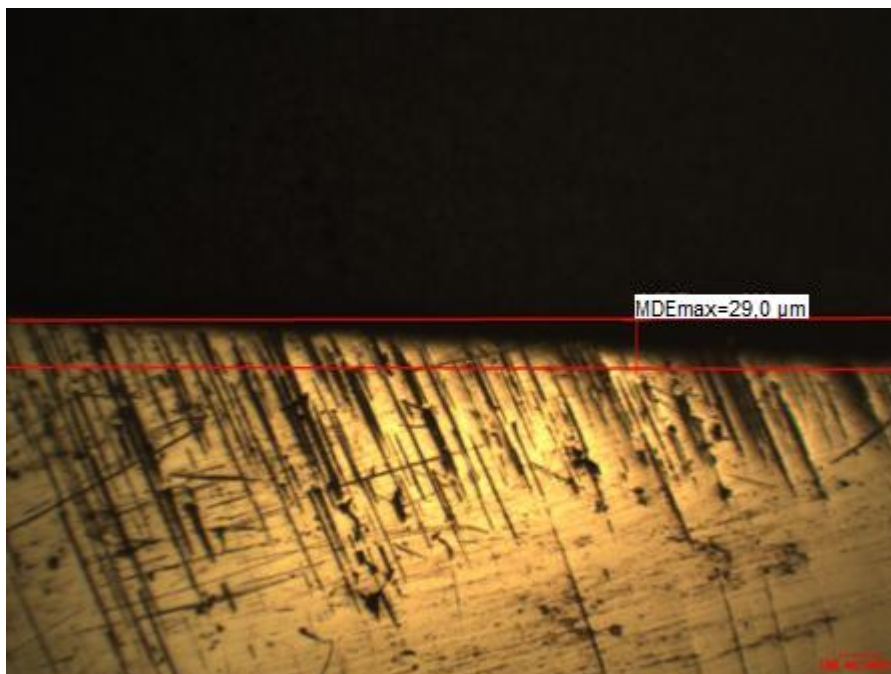


Fig. 2.157 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C8(12/8) testată pe T2, stare neatacată, cu evidențierea adâncimii maxime a cavitației, x4



## 2.5. Aspecte ale microstructurii erodate. Fenomenologia degradărilor prin cavitație – 115

Din aceste imagini se poate observa că oțelul C8 prezintă o suprafață cu o distrugere destul de uniformă, atât pe aparatul T1 cât și pe T2. Acest lucru se justifică prin prezența unei microstructuri martensitice „moi” dispusă în plăci, care este caracteristică oțelurilor înalt aliate cu Cr-Ni și având un conținut scăzut în carbon.

În fig.2.158 de mai jos este prezentată secțiunea transversală pentru o probă din oțel C8(12/8), cu evidențierea stratului de suprafață durificat în urma atacului cavitațional.

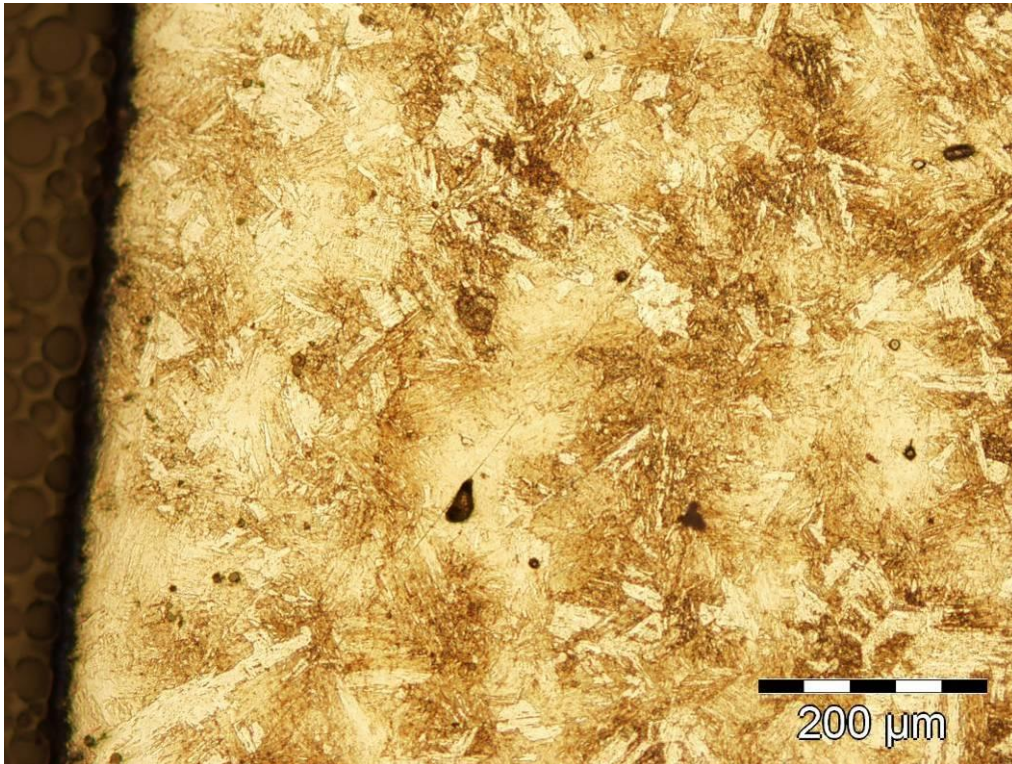


Fig. 2.158 Aspectul metalografic în secțiune transversală a probei din oțel C8(12/8), cu evidențierea durificării stratului atacat

Și această imagine, ca cele prezentate anterior evidențiază durificarea stratului superficial, sub impactul microjeturilor și undelor de șoc, produse în timpul cavitației, care, corelat cu evoluția curbelor de pierdere cumulată și a vitezelor de eroziune, se realizează începând minutul 90 al atacului.

## 2.6. Analiza rezultatelor experimentale pe baza constituției chimice, structurale și a proprietăților mecanice

### 2.6.1. Influența compoziției chimice asupra rezistenței la cavitație

Cercetările privind comportarea și rezistența materialelor la eroziunea prin cavitație, realizate în marile laboratoare din lume (Michigan, Legi din Grenoble, Gdansk, Wuxi din China, etc), de o serie de specialiști [1], [2], [120], [17], [81], [32], [84], [117], [95], [107] de-a lungul a peste 70 de ani de cercetare arată clar influența pe care o are compoziția chimică, prin modificările structurale și de proprietăți ale oțelurilor, indiferent de intensitatea atacului cavitației. Din acest motiv, în proiectarea oțelurilor destinate fabricării pieselor intens solicitate la cavitație, o atenție aparte este acordată stabilirii constituției structurale a materialului.

În cadrul acestui paragraf sunt prezentate digramele de corelare a parametrilor eroziunii cavitației, fig.2.159-2.164, cu nichelul care permite determinarea, aproximativă, a constituției structurale a oțelului, prin diagrama Schöffler.

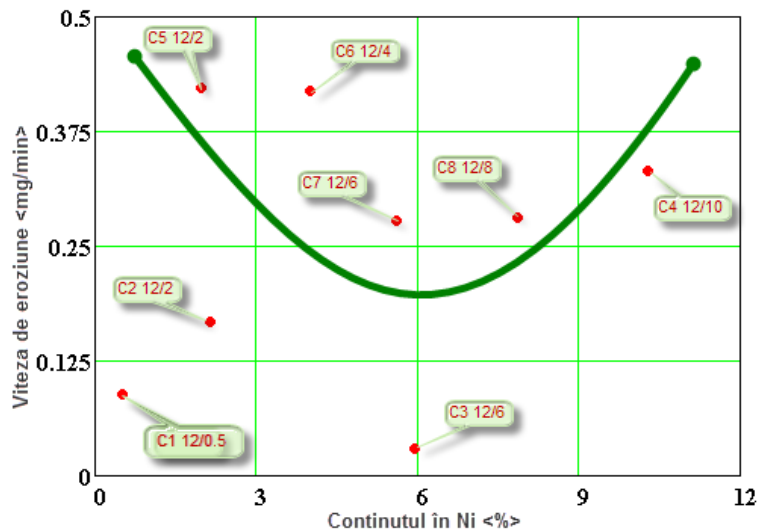


Fig.2.159 Variația vitezei de eroziune, cu conținutul de nichel, pe aparatul T1



2.6. Analiza rezultatelor experimentale pe baza constituției chimice, structurale – 117

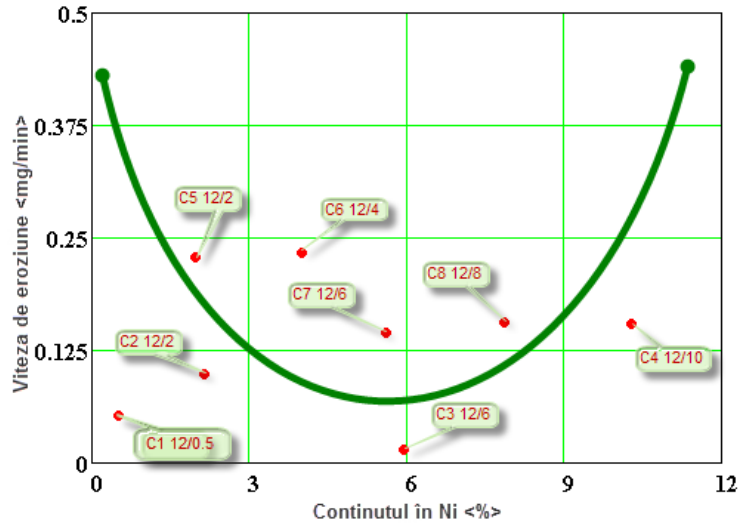


Fig.2.160 Variația vitezei de eroziune, cu conținutul de nichel, pe aparatul T2

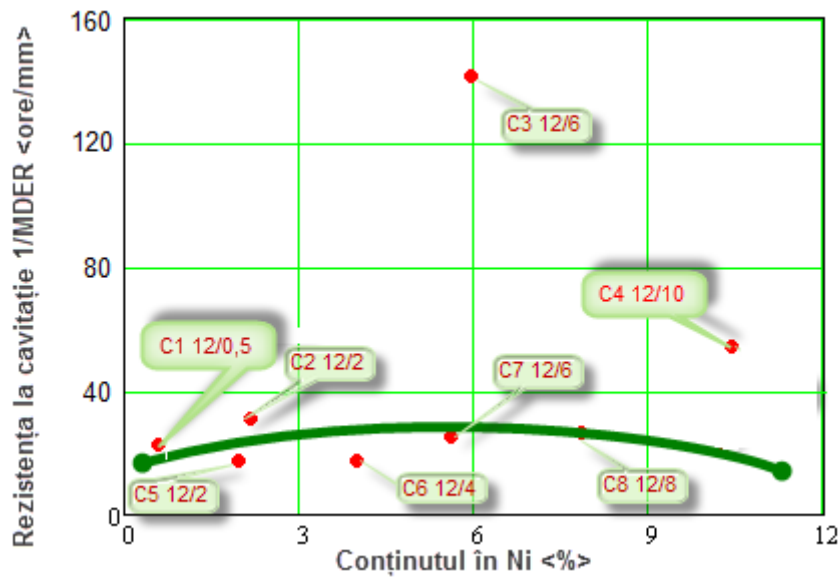


Fig. 2.161 Variația rezistenței la eroziunea cavitației, cu conținutul de nichel, pe aparatul T1

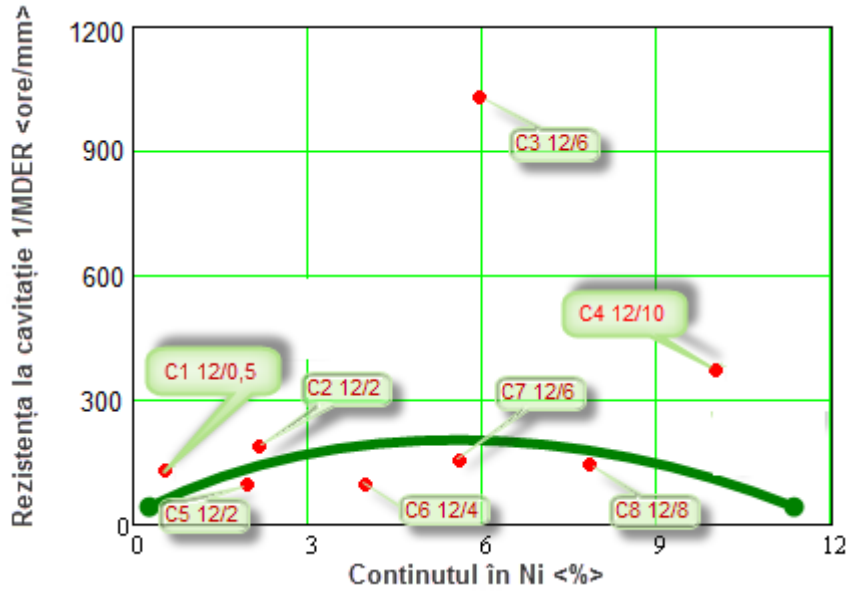


Fig. 2.162 Variația rezistenței la eroziunea cavitației, cu conținutul de nichel, pe aparatul T2

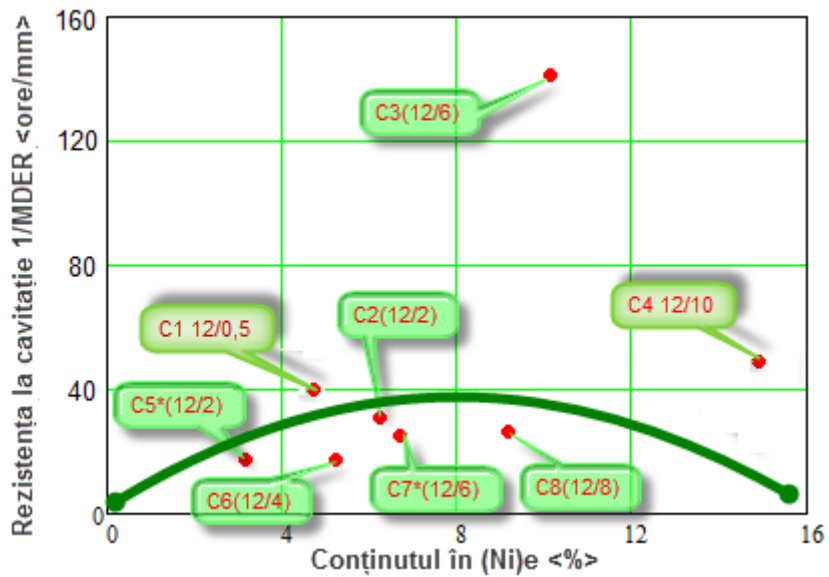


Fig. 2.163 Variația rezistenței la eroziunea cavitației, cu conținutul de nichel echivalent, pe aparatul T1

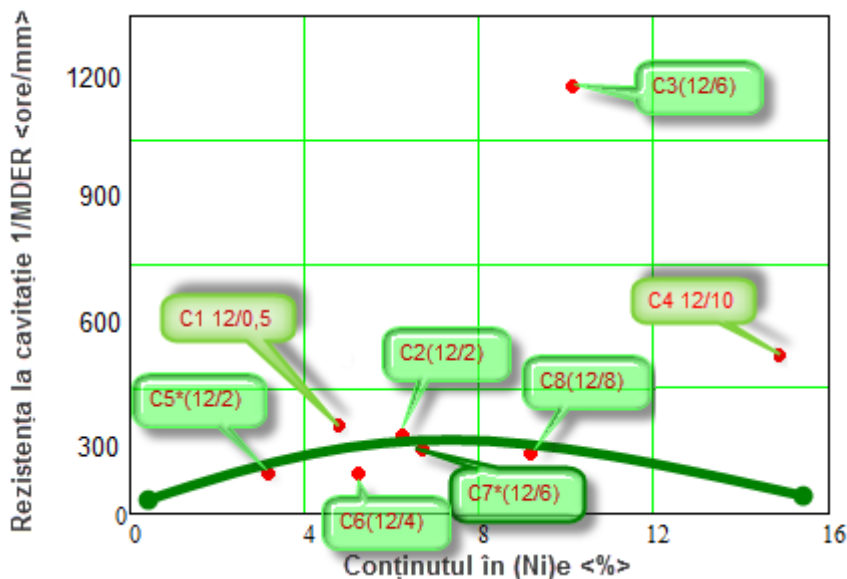


Fig. 2.164 Variația rezistenței la eroziunea cavitației, cu conținutul de nichel echivalent, pe aparatul T2

Ca parametrii de referință au fost aleși rezistența la cavitație, exprimată prin parametrul 1/MDER și valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza de eroziune.

Din aceste diagrame, indiferent de aparatul folosit în producerea cavitației (T1 sau T2), rezultă că pentru obținerea unei rezistențe sporite la cavitație, tendința este de a crea oțeluri în care conținutul de nichel să fie de circa 4-8 %. Din punct de vedere al valorii echivalente,  $(Ni)_{ech}$ , necesară stabilirii naturii constituțiilor structurale, conform diagramei Schöffler, tendința este spre aproximativ 6-10 %. Diferența de la Ni la  $(Ni)_{ech}$  este dată de celelalte elemente chimice (C, Mn și Co). Cum noile tendințe, în fabricarea oțelurilor folosite la turnarea paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice (unde hidrodinamica cavitației este foarte intensă, cu distrugerii rapide și pe suprafețe mari [10], [1], [2], [95]), este de reducere a carbonului sub 0,1 % din motive de reparare prin sudare, rezultă ca necesitate creșterea conținutului de Mn și Co. Însă, de asemenea, este cunoscut faptul că manganul conduce la creșterea dimensiunilor grăunților și a durității [9], [94], [64], [65], care, peste anumite valori, accentuează evoluția eroziunii prin creșterea dimensiunilor cavernelor. Așadar este necesară o cercetare a efectului cobaltului și o cunoaștere a valorii până la care se poate merge cu procentul de mangan pentru a obține oțeluri cu calități cavitaționale foarte bune.

Totodată, diagramele de mai sus arată că oțeluri cu cantități apropiate de crom și nichel ( $C_2(12/2)$  și  $C_5(12/2)^*$ , respectiv  $C_3(12/6)$  și  $C_7(12/6)^*$ ), datorită diferenței de procente cu care participă principalele elemente de aliere (Mn, Co, V, Mo, Ta, Nb, W, Al), tabel.2.2, au condus nu numai la cantități diferite de constituții structurale (martensită, austenită și ferită - vezi digrama Schöffler), dar și la comportări, respectiv diferențe de rezistență la cavitație; cum s-a mai precizat la subcapitolul 2.4.

Evoluțiile curbelor din figurile de mai sus sugerează, de asemenea, că un rol important în stabilirea constituției microstructurale și a caracteristicilor mecanice și

de rezistență la eroziune îl are și carbonul (se poate observa că oțelurile cu  $\approx 0,1\%$  carbon au o rezistență mai sporită decât cele cu  $0,036\%$ ) [76], [66], [67],.

Pentru a avea o imagine cu privire la influența celorlalte elemente principale de aliere, în Fig. 2.165, procentului cu care acestea participă la constituția chimică, sunt reprezentate tendințele de influență asupra rezistenței la cavitație, exprimată prin parametrul  $1/MDER$ . Valorile cuprinse în această diagramă, pe lângă ale oțelurilor cercetate în acest proiect, au fost luate încă o grupă de 12 oțeluri inoxidabile, testate în laboratorul de Cavitație al UP Timișoara, cu concentrații de carbon între  $0,08$  și  $1,25\%$  [9], [98], [84].

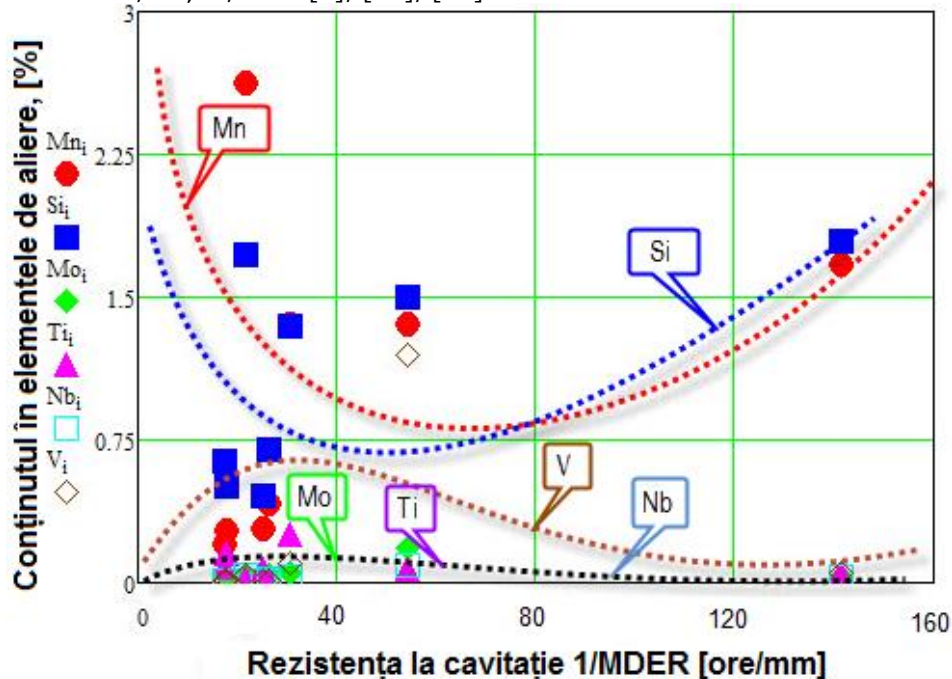


Fig. 2.165 Tendința de influență a unor elemente de aliere asupra rezistenței la cavitație (aparatură T1)

Din fig. 2.165 rezultă că atât siliciu cât și manganul pot crește sau scădea rezistența la cavitație. Tendința de scădere, este însă foarte mare, dacă cele două elemente de aliere depășesc  $2\%$ , fiecare.

Molibdenul, titanul și niobiul, au influență mult redusă față de mangan și nichel, cu tendință de ușoară creștere sau scădere, probabil, dependentă de efectul global pe care îl au. Practic influența lor este, în acest caz, aceeași, datorită cantităților procentuale reduse în care participă. Însă, conținutul de vanadiu, poate crește sau scade rezistența la cavitație. Procentul de delimitare a efectului de îmbunătățire, sau reducere, situându-se în jurul a  $1-1,3\%$ .

## 2.6.2. Influența constituenților microstructurali asupra rezistenței la cavitație a oțelurilor cercetate

Toate studiile, privind distrugerea prin eroziunea cavitației realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara, în cadrul unor programe de cercetare [44], [45] precum și informațiile obținute din parcurgerea

publicațiilor în domeniu [9], [32], [43], [72], [62], arată că rezistența materialului la atacul distructiv al cavitației, depinde foarte mult de constituția structurală, respectiv natura și raportul constituenților structurali. Din acest motiv, în proiectarea oțelurilor destinate fabricării pieselor intens sollicitate la cavitație, o atenție aparte este acordată stabilirii constituției structurale a materialului.

Pentru a pune în evidență efectul structurilor oțelurilor cercetate (definite pe baza diagramei Schöffler), asupra rezistenței la cavitație, în histogramele din fig. 2.166 și 2.167 s-a realizat ordonarea acestora după rezistența opusă atacului distructiv. Această ordonare arată că, indiferent de aparatul utilizat, cea mai mare rezistență o are oțelul cu 60 % austenită și 40 % martensită, iar cea mai scăzută prezintă oțelul cu 55 % martensită și 45 % ferită. Diferența între ele, funcție de aparatul folosit, fiind de circa 12 x (în cazul aparatului T2), respectiv 8 x (în cazul aparatului T1). Această diferență poate fi pusă pe seama feritei, care reprezintă componenta cu cea mai scăzută rezistență la cavitație [9], [77], [27], [4].

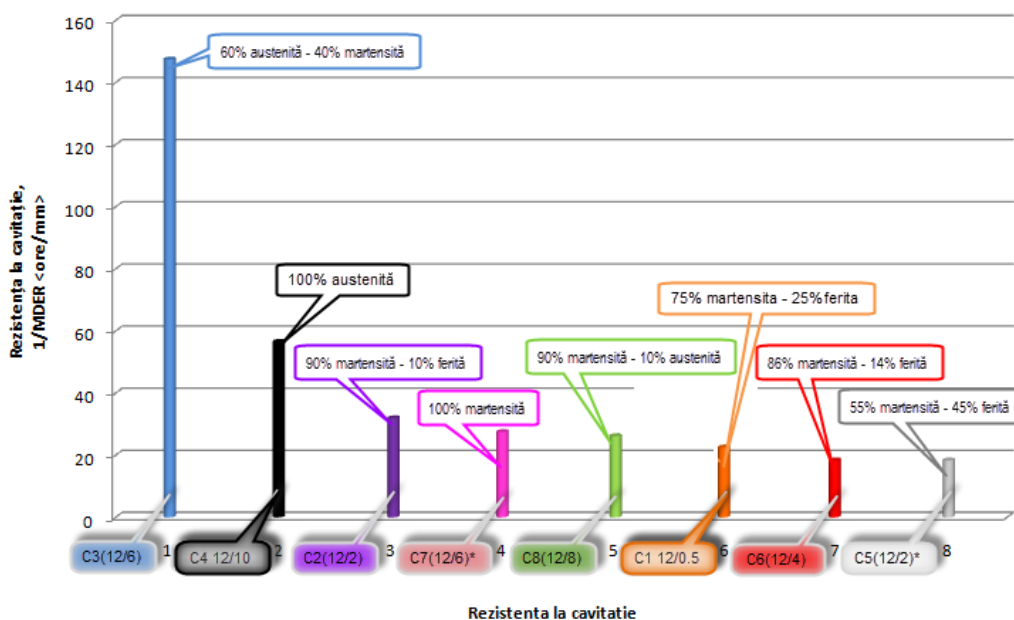


Fig. 2.166 Compararea rezistenței la cavitație după microstructura oțelului (aparatur T1)

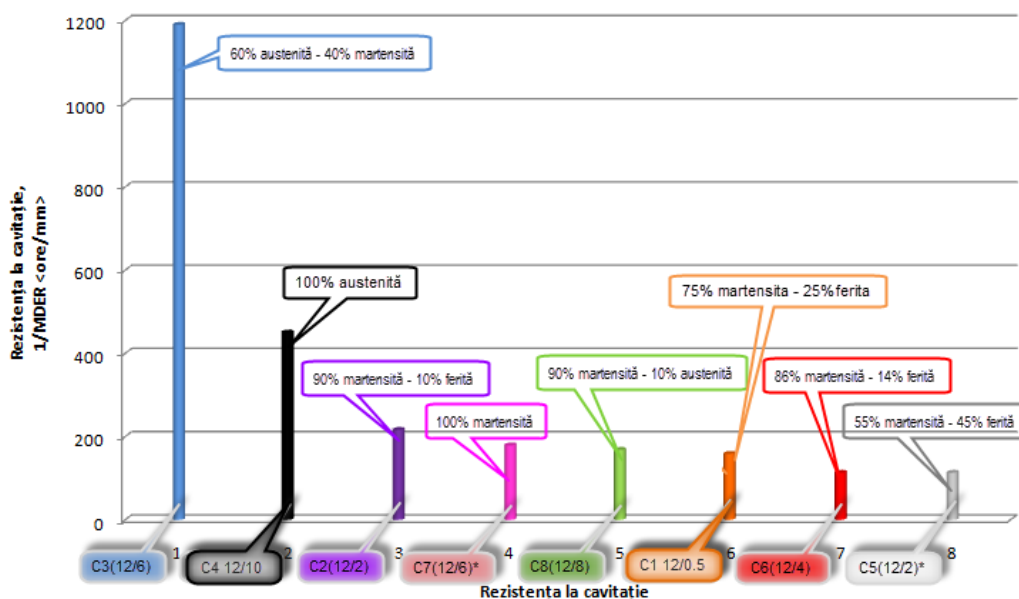


Fig. 2.167 Compararea rezistenței la cavitație după microstructura oțelului (aparatur T2)

În același timp o creștere importantă a ponderii martensitei (componenta cu cea mai mare rezistență la cavitație [9], [10], [95], [98], [71], [20], [68], în structura oțelului, poate duce la creșterea rezistenței, chiar dacă în structură se află și ferită (cazul oțelului cu 90 % martensită și 10 % ferită). Surprinzătoare sunt rezistențele scăzute ale oțelurilor cu procente ridicate de martensită (100 %, 90 % și 86 %). Apreciez că această scădere este determinată, pe de o parte de dimensiunile acelor de martensită, iar pe de altă parte de nivelul proprietăților mecanice ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  și duritatea – tabelul 2.2), inferioare celor pe care le au proprietățile oțelului C3 (6/12-cu 60 % austenită și 40 % martensită).

Totodată se observă că oțelurile cu 100 % austenită (C7(12/6)\* și 90 % martensită, C2(12/2) și C8(12/8)) au rezistențe la cavitație foarte apropiate. Dacă apropierea dintre oțelurile C7(12/6)\* și C8(12/8) poate fi explicată prin faptul că în timpul solicitărilor mecanice, generate prin impactul cu undele de șoc și microjeturile, austenita poate fi transformată în martensită [10] rezistența oțelului C2(12/2), cu 10 % ferită și 90 % martensită, chiar ceva mai ridicată decât a celorlalte două, poate fi pusă doar pe seama faptului că, în anumite situații, ferita aliată poate contribui la sporirea rezistenței la cavitație. Însă, acest spor, conform studiilor publicate în literatura de specialitate [102], depinde de un anumit prag al elementelor de aliere alfa-gene.

Ca o concluzie se poate spune că printr-o tehnologie adecvată se pot crea oțeluri inoxidabile, cu structuri combinate de martensită, ferită și austenită care, funcție de intensitatea hidrodinamică curgerii lichidului, să asigure rezistența cavitațională dorită, în detrimentul oțelurilor inoxidabile cu structuri 100 % martensitice, așa cum s-a crezut mult timp de constructorii de mașini hidraulice [1], [2], [95]. Noile structuri, diferite de cea cu 100 % martensită, sunt necesare și datorită operațiilor de reparare, prin sudare, a zonelor erodate prin cavitație, ce au loc la anumite perioade programate.

### 2.6.3. Influența proprietăților mecanice asupra comportării la cavitație

Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței materialelor la atacurile cavitaționale depinde foarte mult de nivelul acestora, dar și de modul cum sunt corelate cu structurile. În cadrul acestui paragraf vom analiza efectul proprietăților mecanice ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  și duritatea HRC) asupra distrugerilor produse prin cavitație, la cele opt oțeluri inoxidabile cercetate. Pentru aceasta se utilizează digramele din fig. 2.168-2.171, în care sunt corelate aceste proprietăți cu rezistența la cavitație, exprimată prin parametrul  $1/MDER$ .

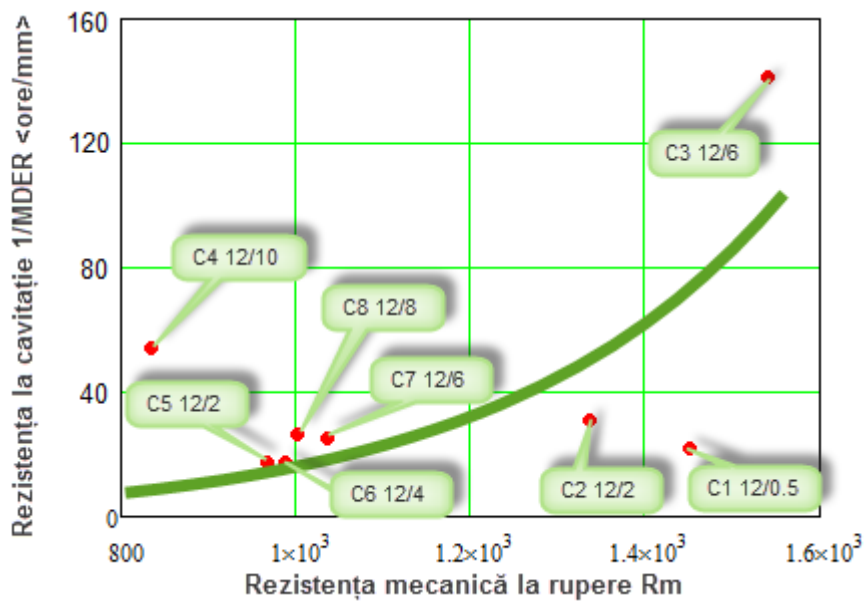


Fig. 2.168 Variația rezistenței la cavitație cu rezistența mecanică la rupere  $R_m$  (aparatur T1)

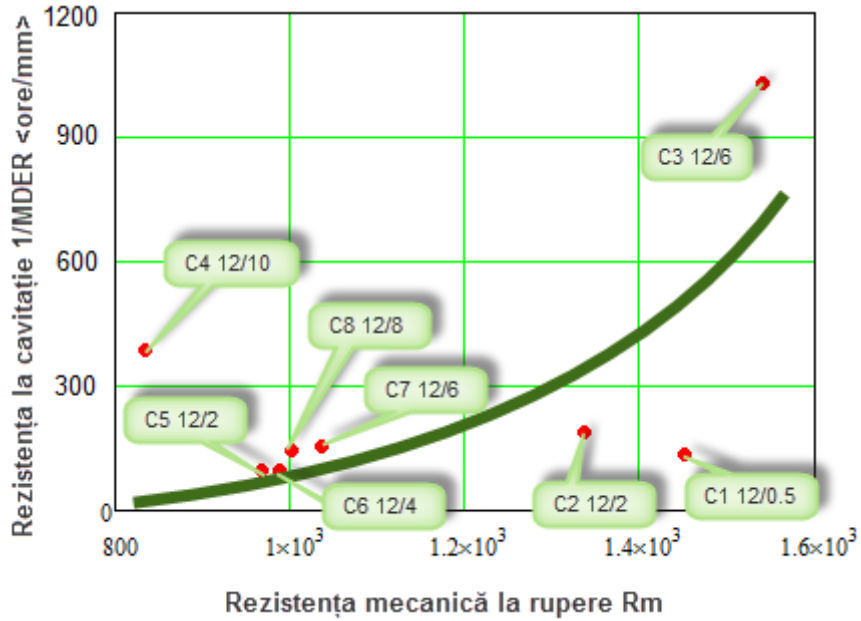


Fig. 2.169 Variația rezistenței la cavitație cu rezistența mecanică la rupere  $R_m$  (aparatur T2)

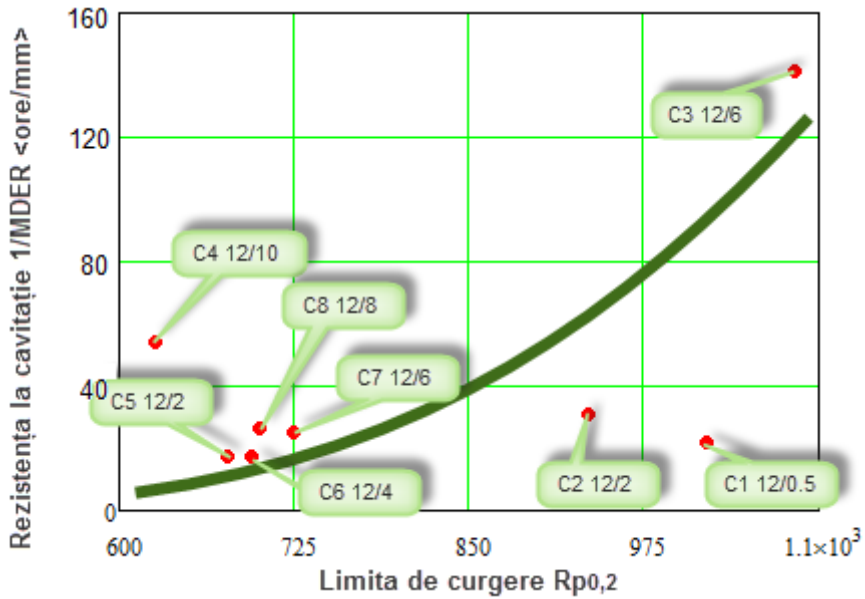
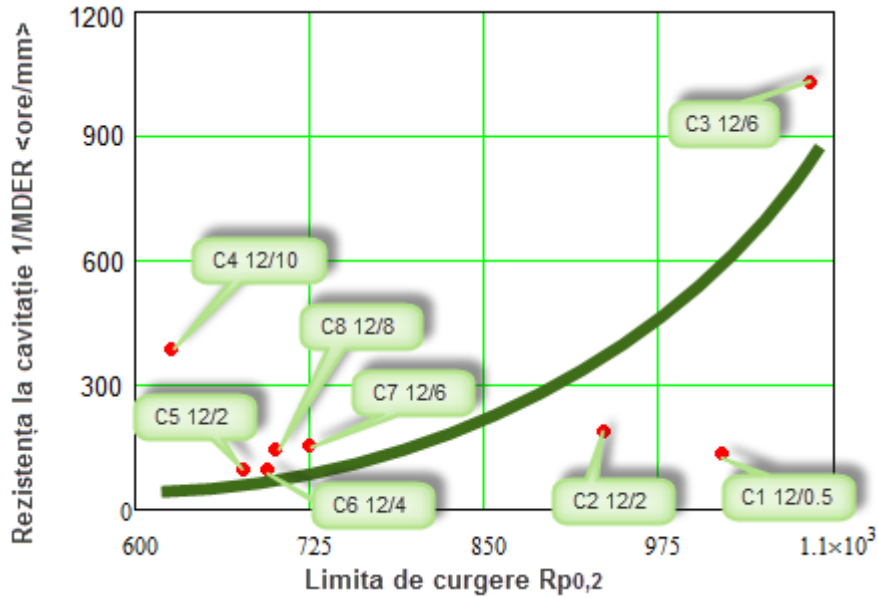


Fig. 2.170 Variația rezistenței la cavitație cu limita de curgere  $R_{p0,2}$  (aparatur T1)



Fig. 2.171 Variația rezistenței la cavitație cu limita de curgere  $R_{p0,2}$  (aparatur T2)

Din fig.2.168-2171 rezultă că prin creșterea rezistenței mecanice la rupere  $R_m$  și a limitei de curgere  $R_{p0,2}$ , rezistența la cavitație tinde să se îmbunătățească substanțial. Evoluția este una exponențială, în concordanță cu cercetările realizate de Garcia și Hammitt [37], pe cele mai diverse materiale, folosind ca mediu cavițional diverse lichide. Această tendință este cauzată de faptul că cele două proprietăți mecanice influențează perioada de incubație [86], [21], [69], modul de deformare și rupere a materialului de pe suprafața atacată cavițional [94], [22].

După cum au arătat și analizele anterioare, efectuate pe baza curbelor și parametrilor caracteristici, oțelul C3 (12/6) cu structură 60 % austenită și 40 % martensită are cea mai mare rezistență la cavitație, iar oțelurile C5 și C6 (cu structuri de martensită și ferită), cea mai scăzută, probabil datorită componentei de ferită.

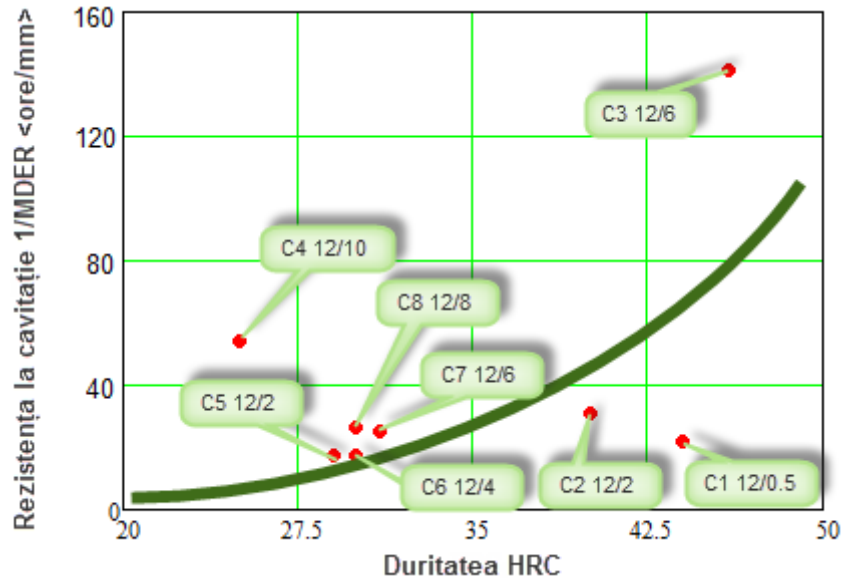


Fig. 2.172 Variația rezistenței la cavitație cu duritatea suprafeței atacate pe aparatul T1

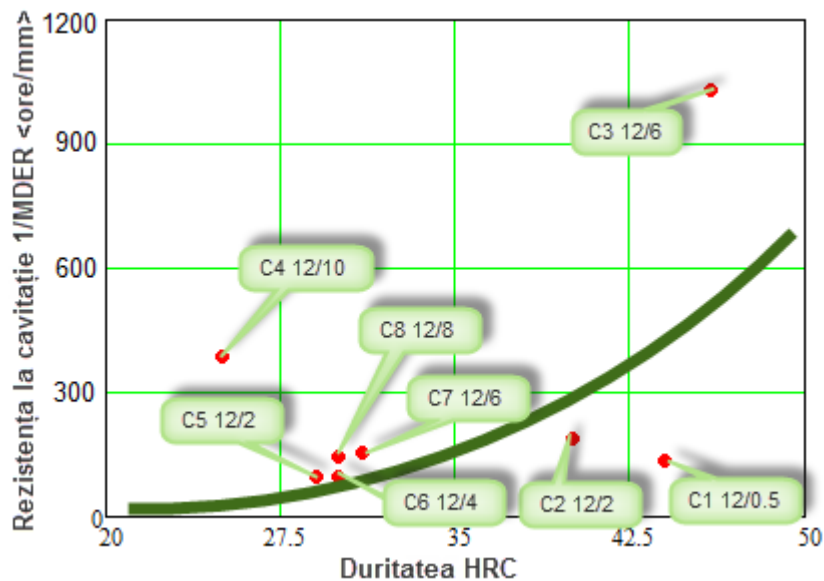


Fig. 2.173 Variația rezistenței la cavitație cu duritatea suprafeței atacate pe aparatul T2

Din diagramele prezentate în fig. 2.172-2.173 rezultă, de asemenea, că rezistența la cavitație, tinde să crească exponențial cu duritatea suprafeței expuse atacului cavitației. Această tendință a fost pusă în evidență, prin relații de corelare de forma  $MDER = C(HB)^n$  de Hammitt și Garcia [37], [50], [51]. Și din aceste diagrame rezultă că oțelul C3 (12/6), având cea mai mare valoare pentru duritate (46 HRC), rezistă și cel mai bine la eroziunea cavitației. Problema care se pune este că duritatea, deși este o proprietate importantă, cu efect asupra rezistenței

## 2.6. Analiza rezultatelor experimentale pe baza constituției chimice, structurale – 127

materialului la cavitație, este benefică pentru comportarea materialului pe parcursul atacului dacă valoarea sa nu crește astfel încât materialul să devină fragil.

Având în vedere datele din tabelul 2.1 și corelările din diagramele prezentate mai sus se constată că rezistența mecanică la rupere, limita de curgere și duritatea au cea mai mare influență asupra rezistenței la cavitație a oțelului. Această constatare poate fi considerată ca o tendință, pentru că o creștere exagerată a acestora, în detrimentul caracteristicilor de plasticitate (alungirea și gătuirea) poate duce la scăderea rezistenței, mai ales în perioada de incipiență a cavitației.

Deoarece deformabilitatea oțelurilor este caracterizată prin alungirea  $A_5$  și gătuirea  $Z$ , în histogramele din fig. 2.174 și 2.177 sunt date evoluțiile rezistențelor la cavitație cu aceste proprietăți mecanice.

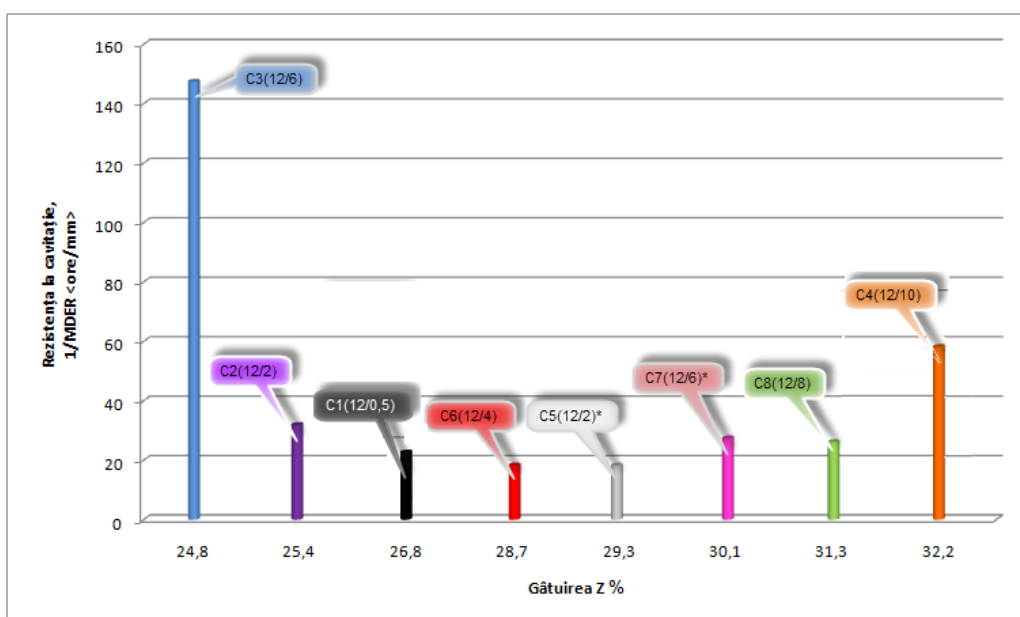


Fig. 2.174 Comparația rezistenței la cavitație după gătuirea Z (aparatur) T1

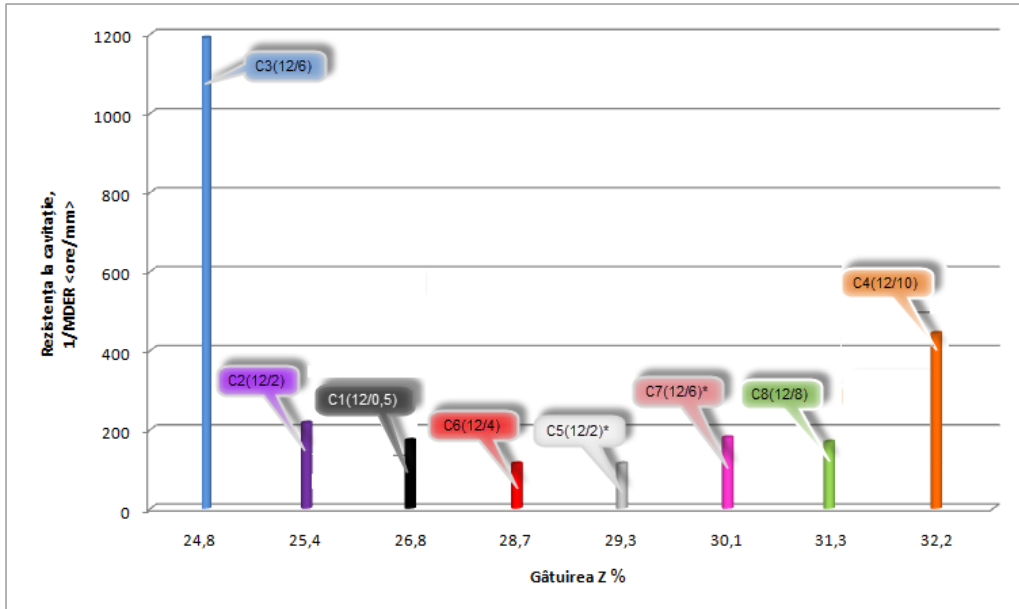


Fig. 2.175 Comparația rezistenței la cavitație după gătuirea Z (aparatur) T2

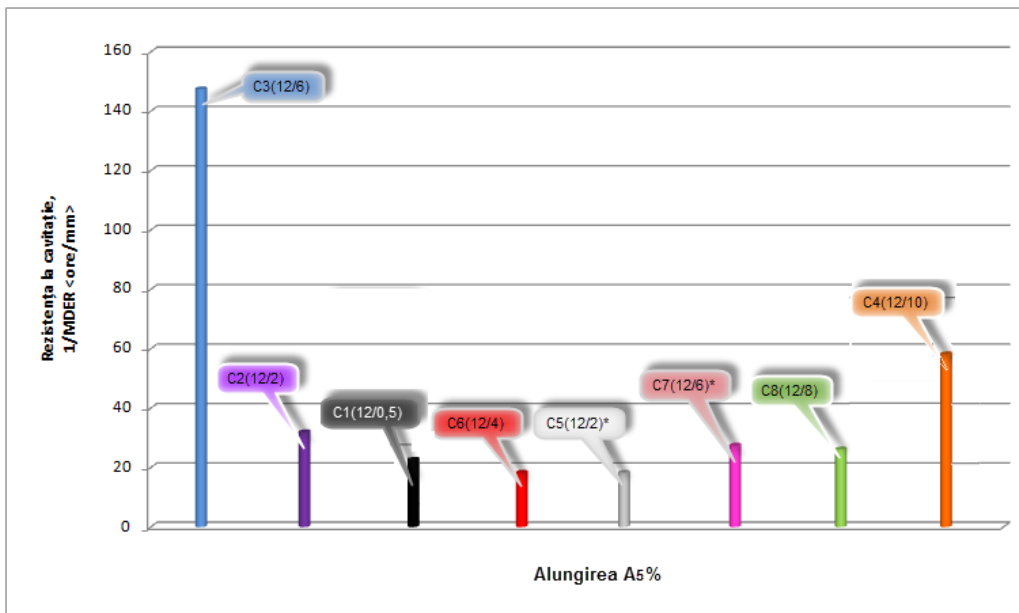


Fig. 2.176 Comparația rezistenței la cavitație după alungirea la rupere A<sub>5</sub> (aparatur) T1

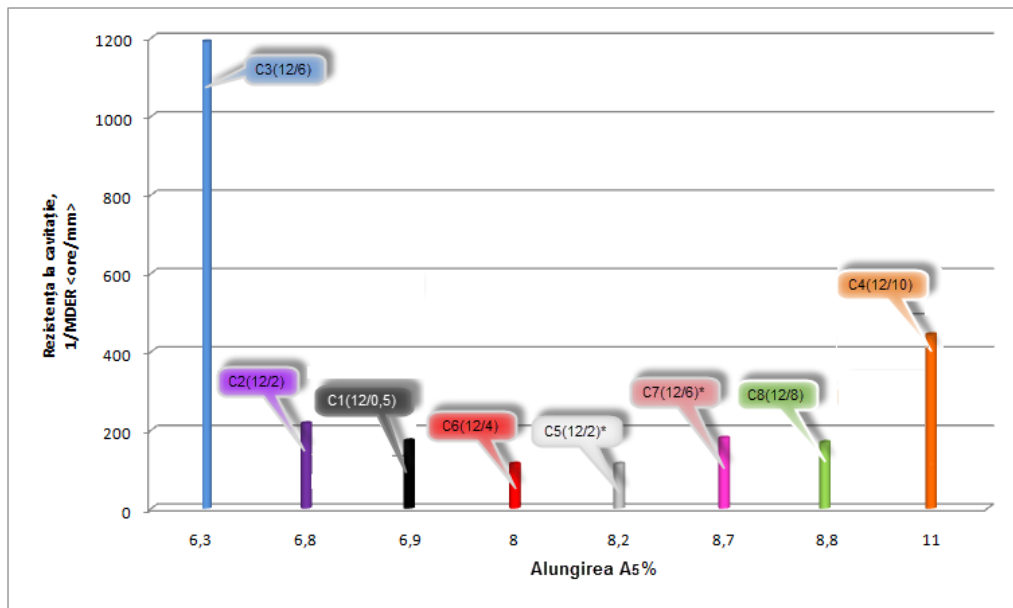


Fig. 2.177 Comparația rezistenței la cavitație după alungirea la rupere A<sub>5</sub> (aparatur) T2

Din aceste histograme, rezultă că este dificil a forma o opinie clară cu privire la influența acestor două proprietăți (Z și A<sub>5</sub>) asupra comportamentului, respectiv rezistenței în timpul atacului cavitației. Prin urmare, analiza influenței acestor proprietăți va trebui să constituie obiectul unei analize separate, mai ales că de valoarea lor depinde comportarea oțelului în perioada de incubație a cavitației.

## 2.7. Concluzii

1. Rezultatele cercetărilor prezentate arată că, pentru oțelurile cu conținuturi de  $\approx 12$  % Cr, tendința de creștere a rezistenței la cavitație este pentru cele la care procentajul de nichel este situat în intervalul de 4-6%. Carbonul are, de asemenea, un rol important în stabilirea constituției microstructurale și a caracteristicilor mecanice și de rezistență la eroziune (oțelurile cu  $\approx 0,1$ % carbon se comportă mai bine decât cele cu 0,036 % carbon).
2. Procentajul de nichel joacă un rol important în stabilirea rapoartelor dintre constituenții microstructurali ai oțelurilor inoxidabili și implicit asupra caracteristicilor mecanice și de rezistență la cavitație.
3. În urma testelor efectuate atât pe aparatul T1 cât și pe aparatul T2, rezultă că oțelul C3 cu 12% crom, 6 % nichel, 0,1% carbon și o structură de 60% austenită și 40% martensită are rezistența cea mai bună la eroziunea cavitațională, iar oțelul C5 cu 12% crom, 2 % nichel, 0,036% carbon și o structură de 55% martensită și 45% ferită are rezistența cea mai scăzută la eroziune.
4. În anumite situații ferita aliată, în combinație cu martensita (C2), oferă oțelului o rezistență, la atacul cavitației, superioară celui cu structură pur martensitică (C7) sau de martensită și austenită (C8).

5. Prelucrarea statistică a datelor obținute în laborator ne oferă o imagine mai exactă asupra modului de distrugere a materialului prin eroziune cavitațională (controlul parametrilor aparatelor folosite la încercare și măsurare).
6. Ordonarea materialelor după rezistența la eroziunea cavitațională este, practic, aceeași pentru ambele aparate utilizate în producerea cavitației.
7. Adâncimea maximă de eroziune măsurată nu poate fi folosită ca parametru de referință pentru stabilirea rezistenței la eroziunea cavitațională, deoarece acest parametru este influențat în principal de repartiția constituenților microstructurali, de dimensiunile grăunților și de locul, din suprafața deteriorată, în care s-a realizat secțiunea. Pentru comparație se poate folosi doar adâncimea medie calculată pe baza pierderilor masice, realizate în timpul atacului cavitației. Adâncimea maximă măsurată, este recomandată a fi utilizată în estimarea volumului de electrozi necesar eventualelor reparații ale paletelor și rotoarelor mașinilor hidraulice.
8. creștere a valorilor principalelor proprietăți mecanice ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$ , duritatea) tinde să sporească rezistența la cavitație.
9. Influența caracteristicilor de deformare plastică (alungirea și gătuirea), asupra comportării și rezistenței oțelurilor la eroziunea prin cavitație, este dificil de pus în evidență chiar și ca tendință. Apreciez, totuși, că ele joacă un rol hotărâtor în perioada de incubație a cavitației, când au loc deformările plastice, simultan cu ruperea vârfurilor asperităților.



### **3. Propunere de model de ierarhizare a oțelurilor inoxidabile după rezistența normalizată la cavitație**

#### **3.1. Introducere**

O cantitate mare de lucrări a fost realizată în domeniul cavitației ca un întreg și în particular, pentru cavitatea de eroziune ???. Deși, numeroase lucrări au fost publicate cu descoperiri importante în înțelegerea mecanismelor erozive ale cavitației, suntem încă departe de a estima cu acuratețe intensitatea erozivă a cavitației, respectiv de a estima rezistența materialelor la atacurile cavitației. De vreme ce este o combinație a problemelor hidrodinamicii și ale Științei materialelor, ar trebui să definim întâi intensitatea de eroziune a cavitației.

Din punct de vedere al materialului, este bine acceptat, pe baza lucrărilor de pionierat ale lui Knapp [82], faptul ca această intensitate poate fi exprimată prin numărarea cavernelor (Standhammer [111]), a pierderilor în greutate sau prin creșterea porozității suprafeței în timp. Kato [70], utilizând tehnica așa numitei suprafețe moi, a permis estimarea cantitativă a intensității erozive. Simoneau și al. [110], a utilizat o tehnică electrochimică în detectarea eliminării de material. Belahadji, Franc și alții [33], Dorey [28], au utilizat tehnica de numărare a cavernelor având ca și avantaj de partea lor tehnicile moderne de măsurare, care au dus la informații prețioase asupra gropilor produse de cavitație pe suprafețele materialelor șlefuite.

În esență, scopul cercetărilor este de a construi modele prin care să se anticipeze rezistența la atacul cavitațional al materialului, funcție de materialul cercetat, pe de o parte și funcție de intensitatea atacului cavitațional, pe de altă parte [6], [107], [20].

#### **3.2. Modele și metode semnificative de evaluare și ierarhizare după rezistența la eroziunea cavitației**

În cele ce urmează se vor prezenta cele mai folosite metode în evaluarea rezistenței materialelor la eroziunea cavitațională, care stau la baza fundamentării noii metode construită în cadrul tezei și destinată ierarhizării oțelurilor inoxidabile utilizate și recomandate pentru fabricarea paletelor și rotoarelor de pompe și turbine hidraulice.

### 3.2.1. Modelul Heymann

Heymann [52], stabilește următoarea relație de legătură între „rezistența normalizată de eroziune  $N_e$ ” și duritatea HV (notată  $H_{ref}$ ) pentru **oțelul inoxidabil austenitic de referință 18Cr-8Ni** (170 HV):

$$(N_e)_{ref} = \left( \frac{H_{ref}}{170} \right)^2 \quad (3.1)$$

și încă o relație pentru „rezistența normalizată de eroziune” a unui **material arbitrar X**:

$$(N_e)_X = \left( \frac{H_{ref}}{170} \right)^2 \left( \frac{MDER_{max\ of\ ref}}{MDER_{max\ of\ X}} \right) \quad (3.2)$$

De aceea relația dintre HV și „rezistența normalizată de eroziune” pentru un oțel carbon oarecare consideră că cel mai adecvat model este:

$$(N_e)_X = 2.1E-06 \times HV^{2.4} \quad (3.3)$$

Coeficientul de corelare dintre HV și  $N_e$  este de 0,92.

La baza stabilirii relațiilor de mai sus Heymann a construit, mai întâi, dependențele grafice din figurile de mai jos (3.1-3.3.).

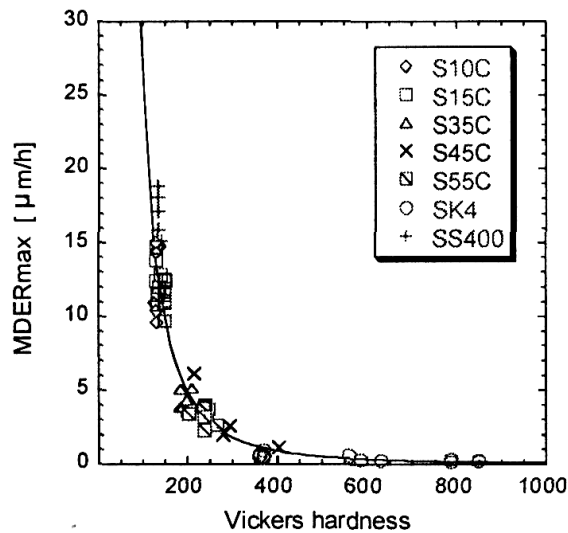


Fig.3.1 Relația dintre duritate și MDERmax (viteza adâncimii maxime de eroziune) [52]

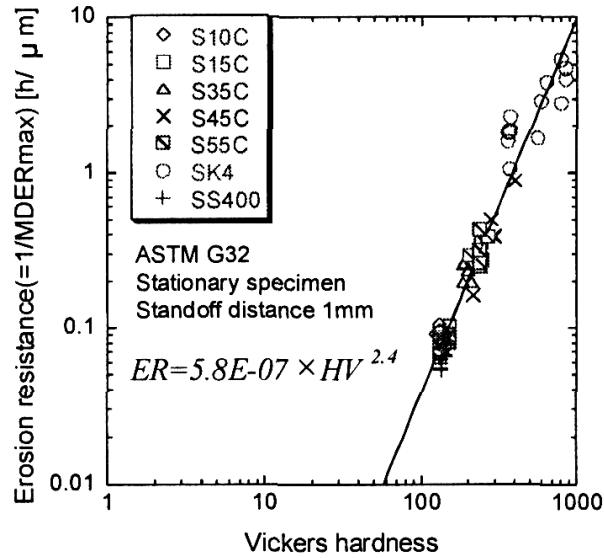


Fig.3.2 Relația dintre duritate și rezistența la eroziune (1/MDERmax) [52]

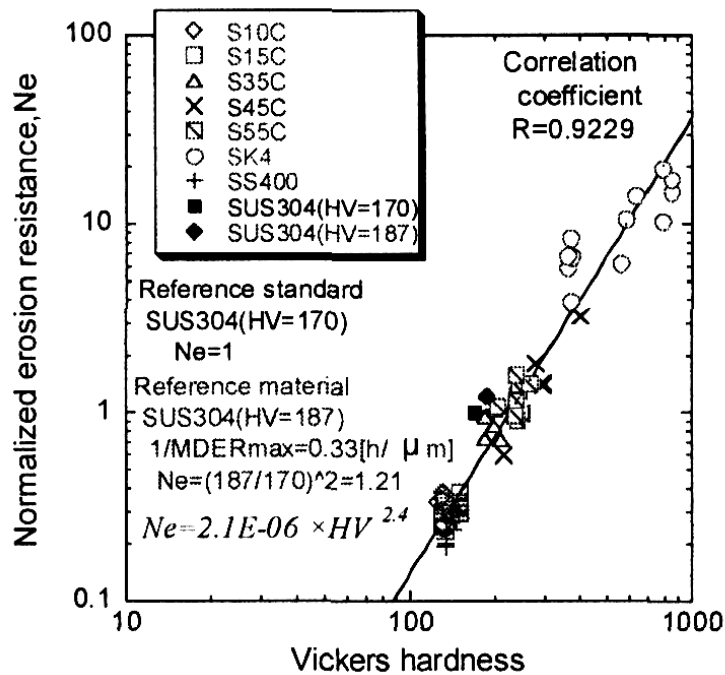


Fig.3.3 Relația dintre duritate și rezistența normalizată la eroziune[52]

Modelul Heymann, la momentul respectiv, a fost criticat prin faptul că pune prea puțin în evidență aspectul fizic al distrugerii prin cavitație și are un caracter statistico-matematic. Ulterior însă, după multiplele schimbări/actualizări în ASTM

G32, unde evaluarea rezistenței la cavitație constituie un paragraf separat, modelul Heymann este considerat ca unul de pornire ce poate fi îmbunătățit.

### 3.2.2. Modelul Berchiche

N. Berchiche, în lucrarea scrisă cu J.P Franc și J.M. Michel în 2002 și publicată în *Journals of Fluids Engineering* [3], prezintă un model interesant de folosire a energiei ca parametru de evaluare a eroziunii materialelor prin cavitație, pentru materialele ductile. Originalitatea acestei descrieri constă în faptul că modelele propuse sunt predictibile și nu implică parametrii de ajustare pe baza datelor experimentale. Ea se bazează pe lucrarea originală a lui Karimi și Leo (1987 [78]). Contrar lui Karimi și Leo în care fiecare spațiu este tratat ca o groapă (cavernă), aplicația de față este mai locală. O suprafață comună cu caracteristici de ordin al mărimii de câțiva micrometri, este definită pe suprafața materialului, în așa fel încât fiecare groapă este descrisă printr-un număr semnificativ de celule. Această tehnică a permis calculul cu o rezoluție spațială care poate fi rafinată atât cât este necesar pentru câmpul de forță de pe suprafața materialului și din interiorul său, de la care, apoi se poate deduce rata eroziunii. Principala ipoteză este distribuția la suprafață a încărcăturilor de impact, care este determinată prin teste de producere a gropilor. Baza modelului o constituie cazul simplificat al unui impact perfect reproductibil (Fig.3.4).

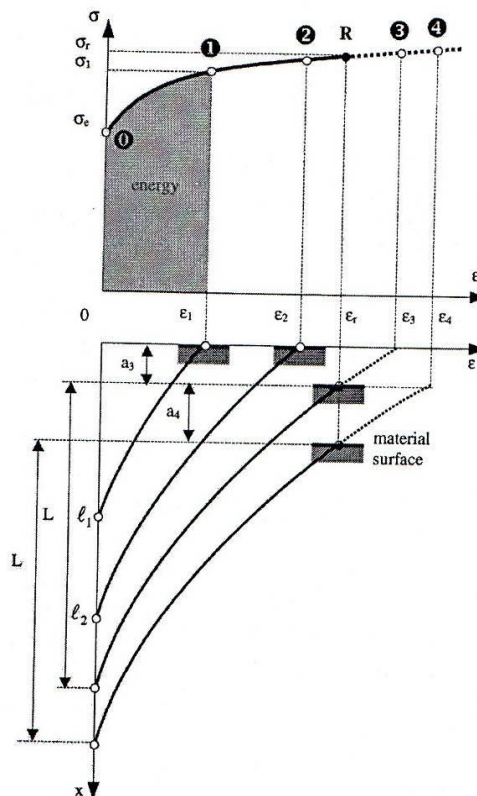


Fig.3.4 Modelul simplificat (după Berchiche, Franc și Michel) [3]

Distribuția forței în interiorul materialului se presupune a fi dată, pentru  $x \leq l$ , de către următoarea relație empirică (Fig.3.4):

$$\varepsilon(x) = \varepsilon_S \left(1 - \frac{x}{l}\right)^\theta \quad (3.4)$$

Unde  $\varepsilon_s$  este forța exercitată asupra suprafeței la punctul de impact,  $l$  este adâncimea stratului durificat,  $\theta$  este factorul formei profilului erodat și  $\varepsilon(x)$ , forța la distanța  $x$  față de suprafață. După primul impact, avem  $\varepsilon_s = \varepsilon_1$  și  $l=l_1$ . Energia absorbită de către material este aria umbrită.

Grosimea stratului erodat este dată de:

$$a = L \left[ \left( \frac{\varepsilon_S}{\varepsilon_r} \right)^{1/\theta} - 1 \right] \quad (3.5)$$

$\varepsilon_s$  fiind forța virtuală ce se exercită asupra suprafeței (mai mare decât  $\varepsilon_r$ ) și  $L$  grosimea maximă a stratului durificat, corespunzător forței de rupere  $\varepsilon_r$ .

O analiză atentă arată că metoda este bazată pe principiul conservării energiei. Energia absorbită de material per unitatea de suprafață între o stare inițială virgină și o stare caracterizată prin profilul de forță dată de relația lui  $\varepsilon$ , poate fi calculată astfel:

$$W = \frac{\sigma_e \varepsilon l}{\theta + 1} + \frac{K \varepsilon_l^{n+1} l}{(n+1)(n\theta + \theta + 1)} \quad (3.6)$$

Cantitățile  $\sigma_e$ ,  $K$  și  $n$  sunt caracteristice relației tensiune-forță și sunt definite de:

$$\Sigma = \sigma_e + K \varepsilon^n \quad (3.7)$$

Din cauza valorii mari a forței de rupere, pentru materialele ductile, partea elastică a curbei poate fi considerată ca fiind aproape verticală și energia elastică poate fi neglijată. În cazul oțelului inoxidabil 316L, Brechiche și colaboratorii au obținut:  $\sigma_e = 400$  Mpa,  $\sigma_r = 1020$  Mpa,  $n = 0.5$  și  $K = 900$  Mpa, forța de rupere  $\varepsilon_r = 47\%$ .

De asemenea, prin integrarea profilului de forță autorii au obținut următoarea relație între adâncimea cavernei și forța de suprafață  $\varepsilon_s$ :

$$h_{max} = \frac{l \varepsilon}{\theta + 1} \quad (3.8)$$

Autorii apreciază că măsurarea adâncimii gropii permite determinarea forței de suprafață și ca rezultat al acesteia, tensiunea  $\sigma_{max}$ , prin utilizarea relației dintre tensiune și forță.

### 3.2.3. Modelul Rao

Rao este considerat ca fiind printre primii cercetători care simte legătura dintre comportarea materialului la cavitație și proprietățile sale mecanice [105]. Astfel, pe baza rezultatelor obținute propune corelarea parametrului 1/MDER cu caracteristicile mecanice UR (reziliența finală) și BH (duritatea Brinell) sub forma:

$$1/MDER = C_1(UR)(BH) \quad (3.9)$$

Plecând de la ideile lui Rao și de această relație foarte multi cercetători, precum Hammitt, Garcia, Franc și alții au dezvoltat modele care corelează parametrii rezistenței la cavitație și cu alte proprietăți mecanice, dar cele mai importante rămânând UDR și BH.

De asemenea, o altă relație interesantă este oferită de Rao [105], [106] în baza datelor obținute pentru diferite materiale pe aparate cu discuri rotitoare. Acestea sunt oferite de 7 laboratoare, în care s-a cercetat relația dintre diferite proprietăți mecanice și perioada de incubație ( $=t_c$ ) determinată de curba de pierdere volumică. Relația propusă de Rao are forma:

$$t_p = 160 \cdot t_c^{0.44} \quad (3.10)$$

și servește la estimarea timpului necesar pentru străpungerea mostrei metalice într-un dispozitiv cu disc rotitor. De asemenea, pentru a găsi legătura între cele 7 aparate și distrugerile provocate prin eroziunea cavitației, a construit curba din figura 3.5 și corelează rezistența normalizată la cavitație cu duritatea Vickers, sub formă grafică.

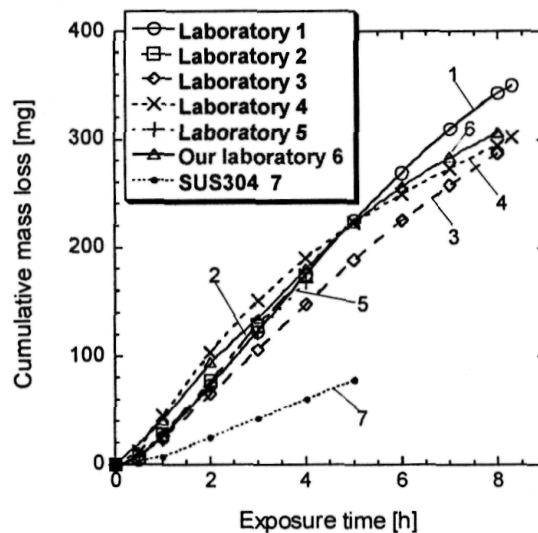


Fig. 3.5 Curbele cumulative de pierdere masică-timp pentru Nichel 200 din 7 laboratoare [105]



### 3.2.4. Modelul Thiruvengadam

Plecând de la ideea că în orice proces din natură un rol important în evoluția sa îl prezintă modul de repartizare a energiilor dezvoltate, A. Thiruvengadam [120] definește intensitatea distrugerii cavitaționale pe baza energiei absorbite de material în timpul eroziunii:

$$I = \frac{Ea}{t \cdot Ae} = \frac{\Delta V \cdot Se}{t \cdot Ae} = i \frac{Se}{Ae} \quad (3.11)$$

unde:

- Ea - energia absorbită de materialul erodat,
- $\Delta V$  - volumul erodat în timpul t,
- Se - rezistența la eroziune cavitațională,
- t - durata atacului cavitațional,
- Ae - suprafața erodată cavitațional,
- i - adâncimea medie a eroziunii cavitaționale.

Cu relația de mai sus se poate determina energia absorbită de material, necesară îndepărtării volumului  $\Delta V$  dar nu și a întregii energii consumate în timpul eroziunii cavitaționale (energia necesară deformațiilor elasto-plastice, etc.). Datorită imposibilității măsurării tuturor energiilor ce intervin în procesul distrugerii cavitaționale, metoda lui Thiruvengadam [120] este prea puțin utilizată.

Meritul important al lui Thiruvengadam, în evaluarea comportării materialelor la atacurile cavitaționale, este cel al curbei vitezei de eroziune, fig. 3.6, care a devenit un model acceptat de cercetători, prin faptul că pe baza ei se definesc cele patru stadii specifice erodării materialului prin cavitație (zona 1- stadiul incipienței cavitației, zona 2-stadiul acumulărilor, zona 3-zona de atenuare a distrugerilor prin cavitație și zona 4 - zona staționară) [120].

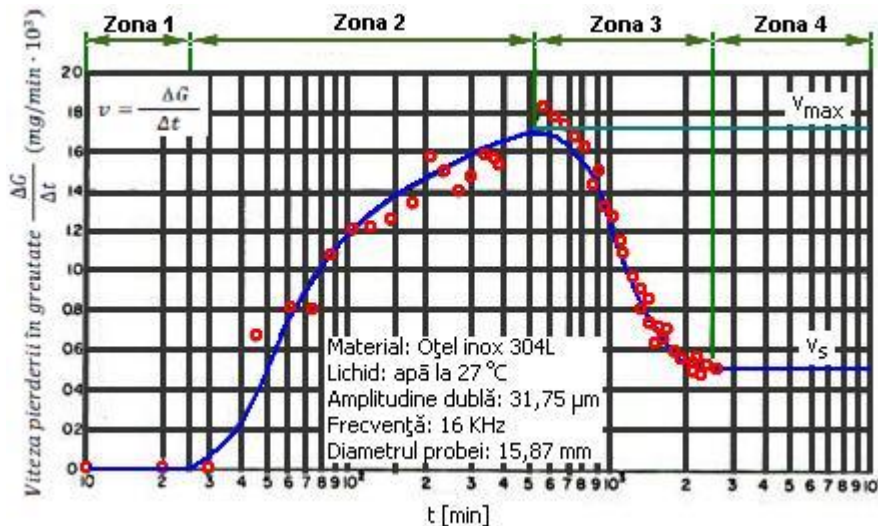


Fig. 3.6 Curba tip a vitezei de eroziune cavitațională stabilită de Thiruvengadam [120]

Din această formă a curbei Thiruvengadam, din punct de vedere al comportării, respectiv rezistenței la cavitație, zona 4 este cea mai potrivită pentru

caracterizarea și compararea cu alte materiale. Această metodă a fost utilizată și în cadrul acestei teze , la cap. 2 (paragraful 2.3 Rezultatele experimentale).

Cercetările din aparatele vibratorii, pe diverse tipuri de materiale (diverse categorii de oțeluri, bronzuri, alame, fonte, etc) au arătat că forma acestei curbe nu se respectă întotdeauna, în special la testele din aparatele vibratorii. Motivul fiind multitudinea factorilor ce determină procesul hidrodinamic al cavității și procesul mecanic al distrugerii [6].

### **3.2.5. Modelul Knapp**

R.T. Knapp este unul dintre pionierii cercetărilor de eroziune prin cavităție, datorită stațiunii cu tunel hidrodinamic, construit în acest scop. Lucrările sale, sunt de referință datorită rezultatelor obținute la cercetările realizate în tunelul hidrodinamic, dar și în aparatul cu disc rotitor.

Cum principalul parametru hidrodinamic al cavității produse în tunel și aparatul cu disc rotitor este viteza, Knapp a propus, în 1955 [83], relația:

$$\Delta V = k_1 v^{n_1}, \quad (3.12)$$

Unde  $v$ -este viteza de eroziune cavitățională, iar  $k_1$  și  $n_1$  sunt exponenți obținuți din aproximarea punctelor experimentale.

### **3.2.6. Modelul Frank**

Pentru o mai bună ilustrare a relației dintre duritatea materialului și rezistența sa la eroziunea produsă prin cavităție J.P.Franc și colaboratorii [32] construiesc în „La Cavitation, Mecanismes physiques et aspects industriels” (1995) o diagramă (viteză de eroziune-duritatea Vickers), fig.3.7, care se împarte în trei zone, în funcție de tipul materialului. Variațiile dependențelor din această diagramă nu au fost descrise și prin relații analitice, dar oferă o imagine clară a dependenței comportamentului materialului la cavităție și de alți factori specifici lui (reziliența finală, rezistența mecanică la rupere, limita de curgere, microstructura, etc.), decât duritatea.

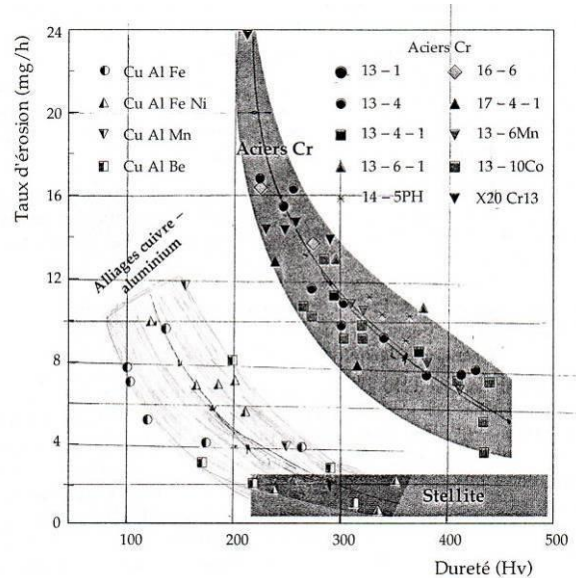


Fig.3.7 Relația dintre viteza de eroziune și duritatea HV, pentru trei categorii de materiale testate în aparat vibrator [26]

Figura 3.7 arată trei regiuni bine separate, fiecare corespunzând unei familii de materiale testate:

- În interiorul fiecărei familii de oțeluri și aliaje de cupru-aluminiu, viteza de eroziune descrește cu creșterea durității, însă viteza eroziunii descrește diferit de la o familie la alta;
- Pentru oțelurile inoxidabile, tip Stellite (cunoscut ca fiind cu foarte bună rezistența la cavitație [6]), practic viteza de eroziune, funcție de duritatea oțelului, nu suferă variații substanțiale.

Datele din diagrama, prezentată în figura 3.7, conduc la concluzia, că vitezele de eroziune, chiar și în cadrul aceleiași familii, sunt foarte diferite. Prin urmare se poate afirma că raportul duritate-viteză de eroziune, într-o familie are o tendință bine definită, dar aceasta nu poate fi extrapolată la alte familii de aliaje.

### 3.3. Metoda propusă

#### 3.3.1. Prezentarea metodei

Analiza multiplelor date, acumulate în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara printr-o experiență de peste 60 de ani, a generat întrebarea „**Care este limita până la care un material poate fi considerat**”:

- cu slabă rezistență la eroziune cavitațională,
- cu bună rezistență la eroziune cavitațională,
- cu foarte bună rezistență la eroziune cavitațională,
- cu excelentă rezistență la eroziune cavitațională,

e. - superrezistent la eroziune cavitațională?

În majoritatea studiilor aprecierea rezistenței la eroziune cavitațională, se face, cel mai des, prin una din metodele:

1. - compararea pantei curbelor ce dau variația volumului erodat  $V(t)$ , respectiv a masei erodate  $m(t)$ , fig.3.8 în funcție de timpul de atac cavitațional, cu ale materialului etalon;

2. - compararea valorilor maxime,  $v_{max}$ , sau de stabilizare,  $v_s$ , ale vitezelor de eroziune cavitațională cu ale materialului etalon (fig. 3.9);

3. - compararea adâncimilor maxime de pătrundere, MDE, sau a vitezelor medii de pătrundere, MDER, cu ale materialului etalon în prezent utilizată cel mai puțin.

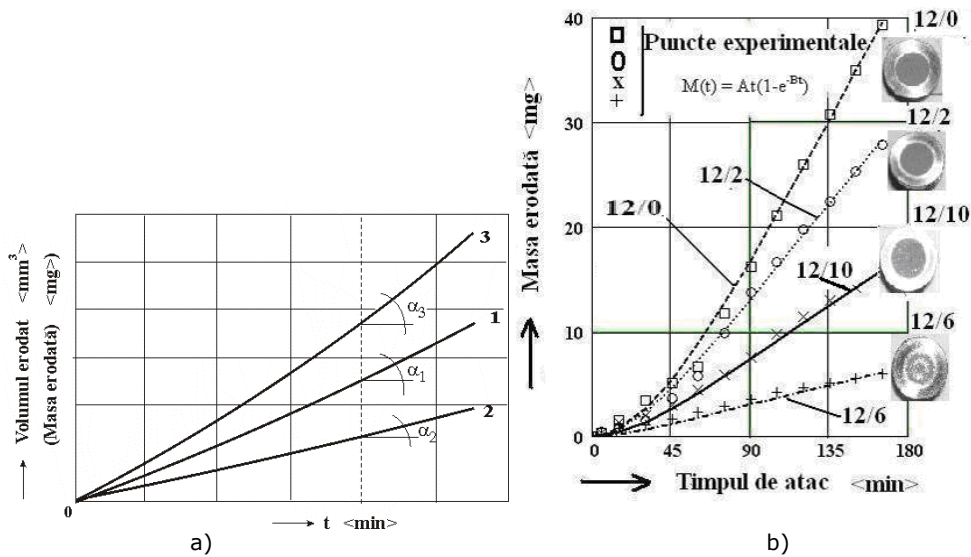


Fig. 3.8 Variația volumului erodat cu timpul de atac cavitațional  
1. materialul etalon; 2,3 - materialul comparat  
Materiale cercetate în cadrul tezei

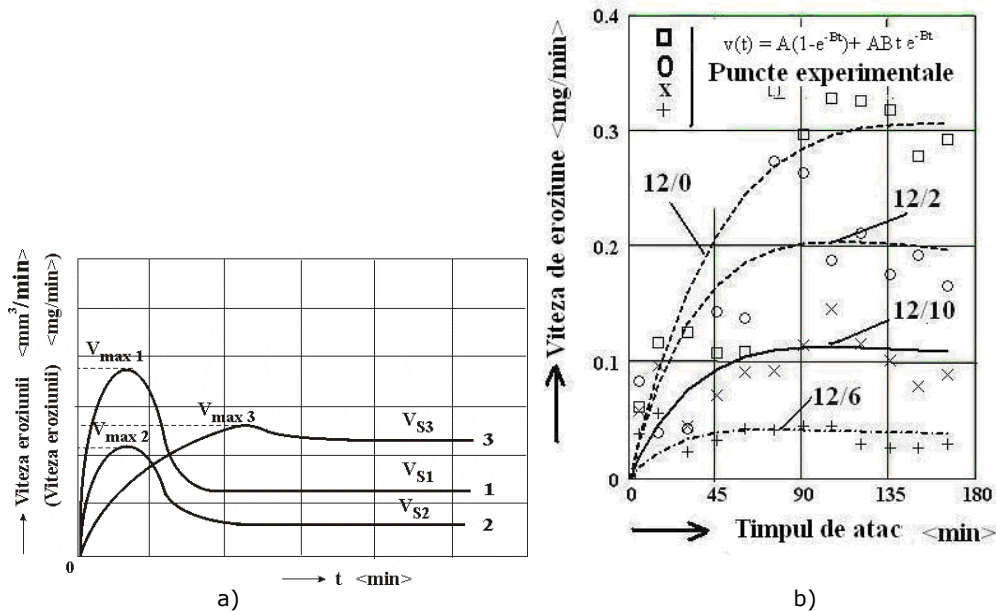
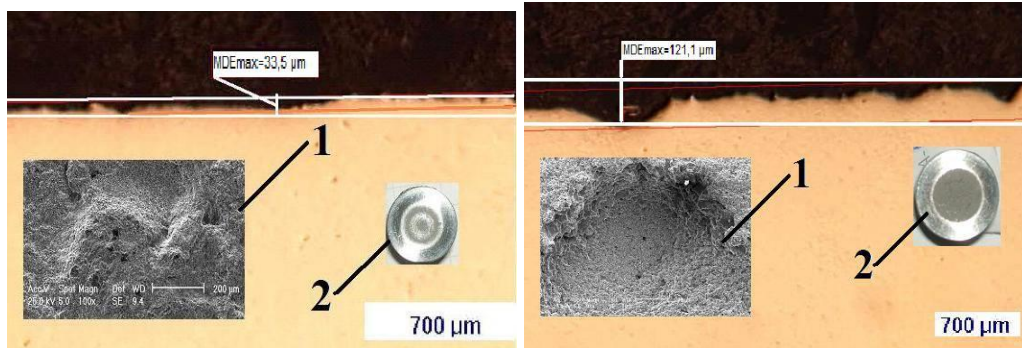


Fig.3.9 Variația vitezei de eroziune cavitațională cu timpul de atac  
1 - materialul etalon; 2,3 - materialul comparat  
Materiale cercetate în cadrul tezei

De obicei, ca material etalon se utilizează un oțel cu rezistență cavitațională bună sau foarte bună. Pentru Laboratorul Universității din Michigan materialul etalon îl constituie oțelul inoxidabil 304 SS [46], [51]. Pentru Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara (LMHT) ca material etalon se folosește oțelul inoxidabil OH12NDL (folosit la paletelor turbinelor de la CHE Porțile de Fier I), considerat ca fiind cu bună rezistență la eroziunea cavitației.

Aprecierea comportamentului cavitațional prin primele două metode necesită, de fiecare dată, construirea curbelor  $V(t)$  (respectiv  $m(t)$ ) sau  $v(t)$  pentru materialul analizat și cel etalon.

De asemenea, adâncimile maxime ale cavernelor produse de cavitație, (exemplu pentru materialele cercetate în cadrul tezei, fig.3.10), măsurate la finalizarea atacului (după 165 minute), nu sunt în concordanță, de fiecare dată, cu evoluțiile comportamentelor reflectate prin curbele specifice din fig.3.8b și 3.9b. Coincidența dintre curbele caracteristice și adâncimile măsurate la final de atac este pur întâmplătoare, ea fiind mult dependentă de omogenitatea structurală și de dimensiunile gărnițelor expulzate, în timpul cavitației. Însă, calculele parametrilor rezistenței normalizate la cavitație  $R_{ns}$  și  $R_{n \max}$ , conform metodicii descrise de standardul ASTM G32-2010 [123], permite o ordonare obiectivă.



a)-Oțel C3 (12/6) b)- Oțel C1 (12/0,5)  
Fig. 3.10 Imagini ale distrugerilor produse în structura și suprafețele oțelurilor expuse  
cavităției

**Prin urmare crearea unei metode de ierarhizare în clase de rezistență la cavitație, care să permită proiectantului și executantului alegerea celui mai adecvat material, funcție de agresivitatea dinamică a cavităției, așa cum se propune în metoda de mai jos, este necesară.**

**Obs.** Relațiile de calcul a parametrilor  $R_{ns}$  și  $R_{n\ max}$ , conform normelor ASTM, sunt:

$$R_{ns} = \frac{v_s}{v_{se}} \quad (3.13)$$

$$R_{n\ max} = \frac{v_{max}}{v_{max\ e}} \quad (3.14)$$

Unde:  $v_s$ ,  $v_{se}$ , și  $v_{max\ e}$ , (mărimile cu indicele "e" se referă la oțelul etalon)- reprezintă valorile maxime și de stabilizare definite de curbele de aproximare, fig. 3.9, definite prin relații de forma:

$$v(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot e^{-B \cdot t} \quad (3.15)$$

În cadrul lucrării sunt analizate, pentru fundamentarea metodei, rezultatele cercetărilor cavitaționale obținute pe o gamă de 12 oțeluri inoxidabile, folosite cu precădere în fabricarea rotoarelor și paletelor de mașini hidraulice (turbine, pompe, elici navale). Patru dintre aceste oțeluri fac obiectul tezei de doctorat a drd.ing. Karabenciov Adrian. Cu permisiunea dânsului și a conducătorului de doctorat, am utilizat și rezultatele sale în stabilirea modelului ce va fi prezentat mai jos. În tabele 3.1 și 3.2 sunt afișate compozițiile chimice (cu prezentarea doar a celor folosite în stabilirea constituției microstructurale, după diagrama Schaffler) și proprietățile mecanice. Compoziția chimică a primelor 4 oțeluri (ce fac obiectul tezei de doctorat a d-lui Adrian Karabenciov), a fost determinată la un spectrometru de emisie optică prin scânteie tip Foundry Master, producător WAS (Germania), aflat în dotarea Laboratorului de Încercări Spectrochimice de Emisie Optică și Fluorescență de Raze X (LISEFRX), din cadrul Centrului de Expertizare a Materialelor Speciale din Universitatea Politehnica București. În același centru au fost măsurate și proprietățile mecanice. Pentru restul oțelurilor compozițiile chimice și proprietățile mecanice au fost determinate în Laboratorul de Știința Materialelor din Timișoara.

Toate oțelurile au fost cercetate în aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel, prezentat în capitolul 2 (paragraful 2.2)

**Tabelul 3.1.** Compoziția chimică a oțelurilor folosite (altele decât cele cercetate în cadrul tezei)

Simbolul oțelului (Cr/Ni)	Elementele chimice, %												
	C	Si	Mn	W	Ta	Cr	Ni	Mo	Al	Co	Ti	Nb	V
<b>6/10</b>	0,119	1,45	3,06	0,007	0,079	6,48	10,06	0,095	1,12	0,026	0,83	0,004	0,345
<b>10/10</b>	0,115	1,72	2,62	0,007	0,015	10,62	10,08	0,037	1,19	0,028	0,017	0,04	0,043
<b>18/10</b>	0,097	1,55	2,45	0,037	0,010	17,91	9,97	0,1	0,67	0,066	0,64	0,035	0,069
<b>24/10</b>	0,118	2,32	2,89	0,007	0,010	23,86	10,09	0,038	1,18	0,052	0,85	0,041	0,071
<b>OH12NDL</b>	0,1	0,3	0,4	-	-	12,8	1,25	-	-	-	-	-	-
<b>X20Cr13</b>	0,15	0,6	0,7	-	-	13	0,6	-	-	-	-	-	-
<b>X10CrNi18/4PH*</b>	0,1	0,32	3,45	-	-	19,7	3,4	-	-	-	-	-	-
<b>III-RNR**</b>	0,12	1,0	0,6	-	-	15	2,0	0,2	-	-	-	-	-

\* Oțel inoxidabil austenito-feritic; \*\* Oțel inoxidabil III-RNR –folosit la navele maritime

**Tabelul 3.2** Caracteristicile mecanice și structurale ale oțelurilor folosite (altele decât cele cercetate în cadrul tezei)

Simbolul oțelului (Cr/Ni)	R <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	R <sub>p0,2</sub> N/mm <sup>2</sup>	Duritatea	Microstructura
<b>6/10</b>	1550	1120	48.3 HRC	32%M+68%A
<b>10/10</b>	1450	1020	45 HRC	100%A
<b>18/10</b>	1335	934	38 HRC	98%A+2%F
<b>24/10</b>	1280	901	30 HRC	81%A+19%F
<b>OH12NDL</b>	650	400	225 HB	88%M+12%F
<b>20Cr130</b>	600	300	170 HB	90%M+10%F
<b>X10CrNi18/4PH</b>	610	338	185 HB	74%A+5%M+21%F
<b>III-RNR**</b>	550	380	159 HB	84%M+16%F

M -martensită, A- austenită, F- ferită

### 3.3.2. Definirea domeniilor de rezistență la cavitație

Pentru definirea limitelor de existență a domeniilor de apreciere a rezistenței cavitaționale a materialelor este preferabilă folosirea formelor adimensionale  $R_{ns} = v_s/v_{se}$  sau  $R_{nmax} = v_{max}/v_{maxe}$  (mărimile cu indicele "e" se referă la oțelul etalon). Desigur, cele două limite, pentru o rezistență cavitațională excelentă, trebuie să fie foarte apropiate, în timp ce pentru una slabă cele două limite trebuie să fie cât mai depărtate.

Din experiența de peste 50 ani, în domeniul cercetărilor de rezistență la eroziunea cavitației și din analiza rezultatelor obținute în LMHT se propun ca valori ale limitelor domeniilor de clasificare cele din tabelul 3.3, în ordinea scăderii rezistenței la eroziunea cavitației.

**Tabelul 3.3** Limite pentru domeniile de rezistență la eroziunea cavitațională (cu materiale etalon 41Cr4 și OH12NDL)

Clasa	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună	slabă
R <sub>ns</sub>	< 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,6	> 1,6
R <sub>n max</sub>	<0,25	0,25 ÷ 0,5	0,5 ÷ 1,0	1,0 ÷ 2,0	> 2,0

Limitele au fost stabilite după regula dublării intervalului la fiecare descreștere (de trecere de la o clasă superioară la una inferioară). Această regulă a



fost aplicată atât la clasificarea după  $R_{ns}$  cât și după  $R_{nmax}$ . O astfel de procedură corespunde principiului extinderii clasei, dar nu are nici un alt suport teoretic.

### 3.3.3. Ierarhizarea oțelurilor inoxidabile cercetate în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara

În baza limitelor stabilite în tabelul 3.3, ierarhizarea materialelor prezentate și cercetate în teză arată ca în tabelul 3.4.

**Tabelul 3.4** Clasificarea după parametrii  $R_{ns}$  și  $R_{nmax}$

Rezistența la cavitație	Materialul	Parametrul		
		$R_{ns}$	$R_{nmax}$	$R_{nmax} / R_{ns}$
<b>Superrezistentă</b>	12/6	0,1	0,01	0,1
<b>Excelentă</b>	6/10	0,33	0,4	1,21
	<b>Inox III RNR</b>	<b>0,39</b>	<b>0,33</b>	0,84
<b>Foarte bună</b>	X20Cr13	0,54	<b>0,46 (Excelent)</b>	1,47
	10/10	0,44	0,51	1,16
	18/10	0,46	0,53	1,15
	12/2	0,48	0,56	1,17
	24/10	0,5	0,58	1,16
	<b>12/10</b>	<b>0,75</b>	<b>0,72</b>	0,96
	X10CrNi18/4PH	0,77	0,67	0,87
<b>Bună</b>	OH12NDL	1,00	1,00	1,29
	12/0,5	0,92	0,93	1,01

Din analiza datelor din tabelul 3.4, se constată o foarte bună concordanță a clasificărilor, cu o singură diferență între clasificările după  $R_{ns}$  și  $R_{nmax}$ . Aceasta apare la oțelul X20Cr13 considerat cu foarte bună rezistență, după parametrul  $R_{ns}$  și cu excelentă rezistență după parametrul  $R_{nmax}$ . Totodată se observă că această diferență este la foarte mică distanță de limitele domeniilor de clasificare, adoptate în tabelul 3.3.

În baza datelor din tabelul 3.4 se poate considera că atunci când limitele celor două metode nu diferă una de alta se recomandă ca ordonarea materialelor să se facă după parametrul  $R_{ns}$ .

Evident valorile rapoartelor  $R_{nmax}/R_{ns}$ , tabelul 3.5, relevă câteva deficiențe, ale metodei, în ceea ce privește comportarea la cavitație. Este interesant de notat că valori importante  $R_{nmax}/R_{ns}$  apar în toate clasele de calitate.

**Tabelul 3.5** Valoarea  $R_{nmax}/R_{ns}$  pentru unele materialele testate-Aparatul T1

Materialul	$R_{n\ max} / R_{n\ s}$	Clasa
	Oțelul etalon OH12NDL	
O H 12 N D L	1,29	bună
20 Cr 130	1,47	foarte bună
Inox III RNR	0,84	excelentă
<b>X10CrNi18/4PH</b>	0,87	bună
6/10	1,21	excelentă
10/10	1,16	foarte bună
18/10	1,15	foarte bună
24/10	1,16	foarte bună
12/0,5	1,01	bună
12/2	1,17	foarte bună
12/6	0,1	superrezistență
12/10	0,96	foarte bună

Verificarea metodei este realizată pe baza rezultatelor experimentale obținute de Garcia la distrugerea cavitațională a șase oțeluri, tabel 3.5, testate în aparatul vibrator de la Michigan ( $A = 25,4\ \mu\text{m}$ ,  $f = 20\ \text{kHz}$ ,  $d = 14,3\ \text{mm}$ ) [39], [40].

**Tabelul 3.5** Parametrii și caracteristicile materialelor testate de Garcia [40]

Materialul	$R_{n\ s}$	$R_{n\ max}$	MDPR $\mu\text{m}/\text{ora}$	Rezistența la eroziune cavitațională
<b>Oțelul carbon</b>	2,0	2,3	5,8	slabă
<b>304 SS (oțel etalon)</b>	1,0	1,0	2,54	bună
<b>316 SS</b>	0,9	0,9	2,28	bună
<b>Mo -1/2 Ti</b>	0,9	0,9	2,28	bună
<b>Cb- I Zr</b>	1,5	1,5	3,7	bună
<b>Cb I Zr (A)</b>	1,8	1,8	4,57	bună

Materialul etalon pentru acest aparat este oțelul inoxidabil 304 SS.

Se constată că, după valorile celor doi parametri adimensionali,  $R_{ns}$  și  $R_{nmax}$ , materialele testate de Garcia [39] se încadrează în limitele claselor ce corespund comportamentului lor cavitațional.

Aplicarea la un număr cât mai mare de rezultate experimentale, obținute pe mai multe aparate vibratorii, cu parametri funcționali diferiți, poate conduce la căi de corelare a parametrilor adimensionali  $R_{ns}$ , respectiv  $R_{nmax}$ , cu caracteristicile mecanice ale materialelor și parametri funcționali ai aparatelor.

### 3.3.4. Corelarea parametrilor specifici eroziunii cavitaționale cu compoziția chimică și structura microscopică

Plecând de la analizele de mai sus, în continuare, se prezintă diagrame (fig.3.11) de clasificare a oțelurilor inoxidabile, testate în laboratorul LMHT, pe aparatul vibrator magnetostriktiv T1, după raportul  $Cr_e/Ni_e$ . Acest raport ia în considerare influența principalelor elemente chimice de aliere asupra rezistenței la cavitație. Prin curbele de aproximare a punctelor din diagrame s-a pus în evidență tendința spre care tinde raportul  $Cr_e/Ni_e$  pentru realizarea unor oțeluri cu rezistențe

sporite la eroziunea cavitației. Întrucât natura și morfologia constituenților microstructurali ai oțelurilor inoxidabile depinde de compoziția lor chimică, în special de raportul  $Cr_e/Ni_e$  (vezi diagrama Schäffler [120]) rezultă că, folosind aceste diagrame se pot anticipa rezistențele acestor oțeluri la atacurile cavitației.

Așadar, din aceste diagrame rezultă că oțeluri inoxidabile cu compoziții chimice diferite pot avea același comportamente (rezistențe) la atacurile distructive ale cavitației, fapt dovedit în exploatarea mașinilor hidraulice. **Totodată, se remarcă o delimitare a domeniului oțelurilor cu rezistență sporită la cavitație în intervalul  $Cr_e/Ni_e \cong 1.0 \div 2.0$ , cu tendința de optimizare spre valoarea  $Cr_e/Ni_e \cong 1.8$**

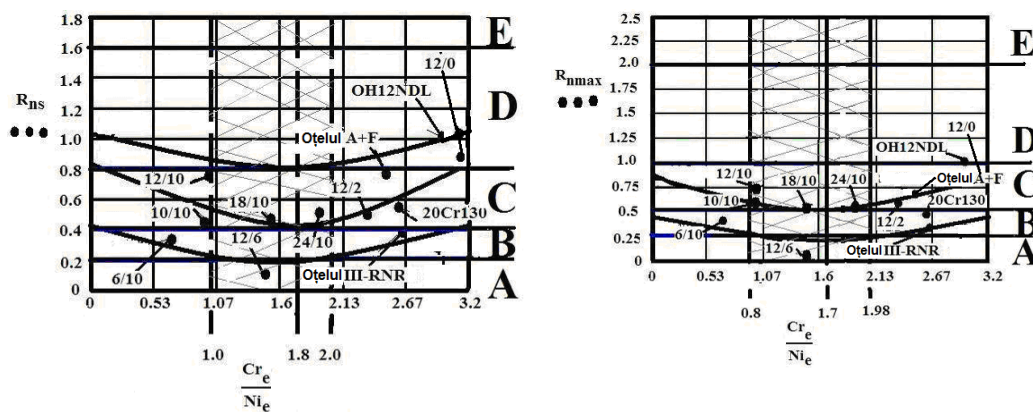
a) după  $R_{ns}$ b) după  $R_{n\ max}$ 

Fig.3.11 Ierarhizarea oțelurilor folosind corelarea rezistenței normalizate la eroziunea cavitației cu raportul  $Cr_e/Ni_e$

(A- superrezistență, B- rezistență excelentă, C- rezistență foarte bună, D- rezistență bună, E- rezistență slabă)

### 3.3.5. Corelarea parametrului $R_{ns}$ cu proprietățile mecanice

Folosind principiile descrise la punctul 3.3.4, în diagrama de mai jos (fig.3.12) s-a corelat rezistența normalizată cu proprietățile mecanice și compoziția chimică, exprimate într-o singură relație, notată cu  $\psi$ . Expresia lui  $\psi$  constituie o generalizare a relației stabilite de Sakai-Shima, prezentată de Bordeasu la simpozionul internațional de la Grenoble din 1998 [23].

Se remarcă o foarte bună concordanță cu clasificările de la punctul 3.3.4, ceea ce recomandă și utilizarea acestor diagrame pentru anticiparea comportării oțelurilor inoxidabile la eroziunea cavitației.

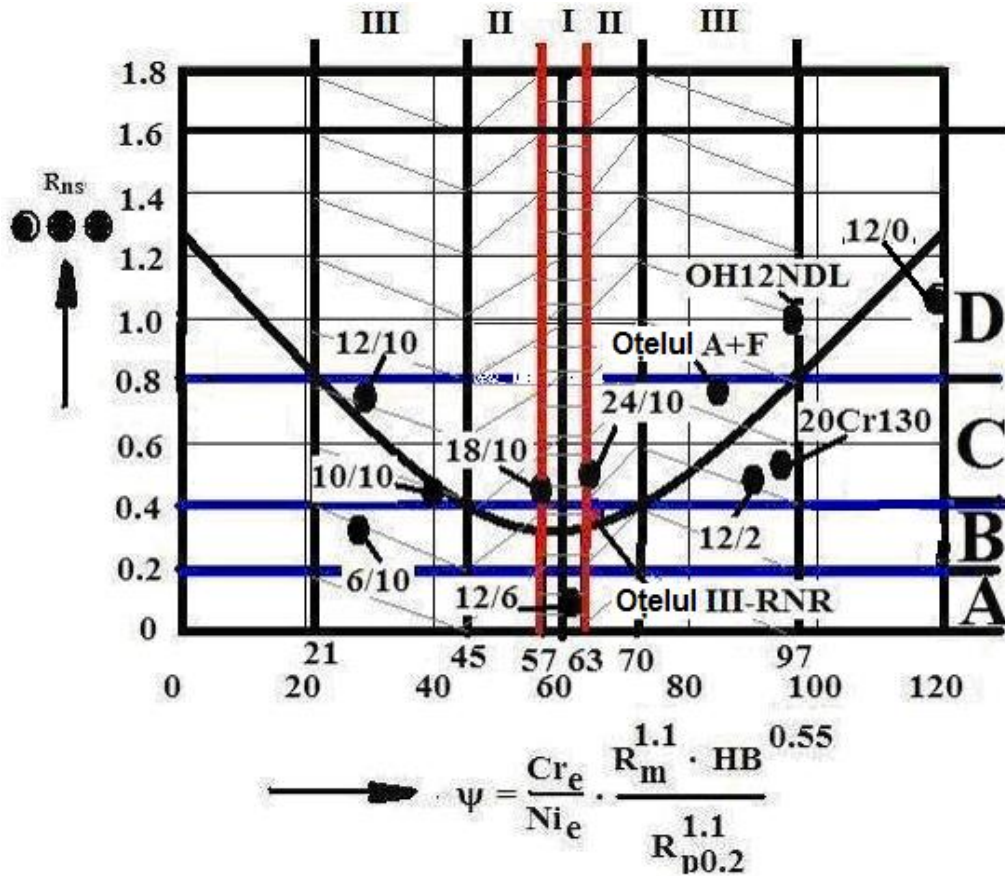


Fig.3.12 Influența compoziției chimice și a proprietăților mecanice asupra rezistenței normalizate la cavitație  
 (A- superrezistență, B- rezistență excelentă, C- rezistență foarte bună, D- rezistență bună)  
 I- oțeluri superrezistente și cu excelentă rezistență la cavitație; II – oțeluri cu foarte bună rezistență la cavitație; III – oțeluri cu bună rezistență la cavitație

Se face observația că delimitarea în cele trei domenii de clasare a oțelurilor după rezistența la cavitație, de intersecția curbei de aproximație cu orizontalele ce definesc limitele parametrului  $R_{ns}$  restrânge numărul oțelurilor din tabelul 3.4, dar corespunde comportamentului definit în tabelul 3.3.

### 3.4. Concluzii

1. Multitudinea relațiilor și metodelor de evaluare a rezistenței materialelor la atacurile cavitației arată că nu există un accept unanim, în rândurile specialiștilor, cu privire la parametrii utilizați și modul de stabilire a acestora (empiric, analitic, etc).

2. **Metoda de ierarhizare construită în cadrul tezei, bazată pe extinderea domeniilor de comportare la eroziunea cavitației de la slab spre superezistente este adecvată și justificată, deoarece prin aplicarea unor**

**tratamente termice și mecanice se modifică proporția de constituenți microstructurali și implicit rezistența la impactul bulelor cavitaționale.**

3. Pentru anticiparea comportamentului la cavitație al oțelurilor inoxidabile, destinate echipamentelor hidromecanice, se pot folosi diagramele din fig. 3.11 și 3.12, calculând raportul  $Cr_e/Ni_e$  sau coeficientul  $\psi$ .

**4. Se constată o tendință de grupare a oțelurilor cu rezistențe superioare la atacurile cavitației în domeniul  $Cr_e/Ni_e \cong 1.0 \div 2.0$ , cu tendința de optimizare spre valoarea  $Cr_e/Ni_e \cong 1.8$ .**

5. Se impune lărgirea bazei de date de oțeluri inoxidabile, cercetate și în aparate vibratorii cu alți parametri funcționali, pentru creșterea gradului de aplicabilitate a relațiilor construite în acest proiect.

**6. Metoda prezentată arată că ordonarea materialelor după rezistența la distrugere cavitațională (tabelul 5), nu concordă cu criteriile standard de clasificare pe grupe de calitate (oțeluri carbon nealiate, oțeluri aliate pentru construcții, oțeluri inoxidabile, etc).** Datorită acestui dezacord se impune pentru materialele utilizate frecvent în fabricarea pieselor de tipul: palete de turbine hidraulice, rotoare de pompe și elici navale să se cuprindă, în normele standard, prevederi legate de rezistența la distrugere prin cavitație.

7. Se impune verificarea metodei prin extinderea la alte aparate vibratorii, cu parametri diferiți de ai aparatului vibrator magnetostriktiv T1.

## 4. Concluzii finale și contribuții originale

Cercetările și analizele realizate în cadrul programului de doctorat și prezentate în teză conduc la următoarele concluzii, cu caracter general:

- studierea eroziunii cavitaționale, începută de peste 100 ani, continuă să fie o problemă de mare actualitate și este mult amplificată în ultimii ani, ca urmare a ritmului ascendent de dezvoltare și re tehnologizare a mașinilor hidraulice, echipamentelor hidromecanice și construcțiilor de nave;

- cercetarea eroziunii cavitației continuă să fie o preocupare atentă a oamenilor de știință ca urmare a multitudinii factorilor ce definesc hidrodinamica curgerii și materialul solid adiacent;

- investigarea eroziunii produse prin cavitație, în laborator, este foarte utilă, mai ales dacă se urmărește analiza, evaluarea comportării și rezistenței la cavitație, precum și influența factorilor ce definesc marca de oțel;

- evaluarea comportării materialelor la eroziunea cavitației este indicat să se facă atât pe baza curbelor și parametrilor caracteristici cât și pe baza microfotografiilor realizate la suprafețele degradate la diverși timpi intermediari și final ai atacului cavitației;

- s-a proiectat și realizat o gamă de opt oțeluri inoxidabile, cu conținut aproximativ constant de crom ( $\cong 12\%$ ) și variabil de nichel (din care patru cu  $\cong 0,1\%$  carbon și patru cu  $\cong 0,036\%$  carbon), având ca principală destinație fabricarea paletelor și rotoarelor pompelor și turbinelor hidraulice;

- toate oțelurile proiectate și cercetate, au rezistența necesară la cavitație pentru a fi utilizate în fabricarea paletelor și rotoarelor de mașini hidraulice (turbine și pompe)

- oțelurile inoxidabile cu conținut de aproximativ  $12\%$  crom și variabil de nichel, pot conduce la combinații ale constituenților structurali care, prin proprietățile mecanice dobândite duc la creșterea rezistenței la cavitație, oferind astfel noi soluții pentru fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice;

- cercetarea rezistenței și comportării la cavitație a celor 8 oțeluri inoxidabile, cu conținut constant de crom și variabil de nichel, în cele două aparate vibratorii: magnetostrictiv cu tub de nichel, T1, și cu cristale piezoceramice, T2, au pus în evidență diferențe între intensitățile de atac la cavitației și au arătat că mecanismul degradării prin suprafețele atacate este identic;

- se confirmă că rezistența și comportarea oțelurilor inoxidabile în timpul atacului cavitației sunt dependente de natura și proporția constituenților structurali, proprietățile mecanice și elementele chimice componente;

- rezistența la cavitație este foarte redusă în primele faze de atac cavitațional, datorită distrugerii vârfulor asperităților generate prin acest procedeu. După îndepărtarea asperităților viteza de eroziune se reduce; rezistența la cavitație crescând ca urmare a durificării;

- deși adâncimea maximă a eroziunii, măsurată la un moment dat, oferă indicii despre intensitatea distrugerii cavitaționale, ea nu poate fi utilizată ca element de referință pentru compararea materialelor după rezistența la eroziunea cavitațională. Prin urmare, aprecierea, prin comparație, a rezistenței la cavitație pe baza valorilor MDE măsurate, la final de atac nu este potrivită deoarece ea depinde

de locul în care s-a făcut secțiunea și mai ales dimensiunile grăunților, ce sunt expulzați într-un anumit moment al atacului cavitației;

- pentru obținerea unei rezistențe sporite la cavitație, tendința este de a crea oțeluri în care conținutul de nichel să fie de circa 4-8 %. Din punct de vedere al valorii echivalente,  $Ni_e$ , necesară stabilirii naturii constituenților structurali, conform diagramei Schäffler, tendința este spre aproximativ 6-10 %;

- rezistența la eroziunea prin cavitație este mult influențată de elementele de aliere, care determină raportul dintre constituenții microstructurali, specifici oțelurilor inoxidabile, cu aplicație în domeniul echipamentelor hidromecanice. În cazul oțelurilor cercetate, cu microstructuri foarte apropiate, principalele elemente constitutive de aliere care joacă un rol important în comportarea la eroziunea cavitațională sunt C, Cr, Mn, Si, Ti, W, Nb, Mo, V;

- cantitățile de mangan și siliciu, peste 2 %, fiecare, tind să scadă rezistența la cavitație.

- influența titanului, molibdenului și niobiului, în cantități sub 1%, este greu de apreciat, tendința fiind fie de creșterea, fie de scăderea rezistenței la cavitație;

- conținutul de vanadiu, din oțelurile cercetate poate crește sau scade rezistența la cavitație. Procentul de delimitare a efectului de îmbunătățire, sau reducere, situându-se în jurul a 1-1,3 %;

- în anumite situații ferită aliată, în combinație cu martensita, oferă oțelului o rezistență la atacul cavitației superioară celui cu structură pur martensitică sau austenitică;

- evoluția în timp a curbelor de pierdere cumulată și viteză de eroziune, indiferent de aparatul utilizat în generarea cavitației vibratorii, ca formă, pentru același material, este similară. Diferența fiind de valoarea vitezelor ca urmare a intensităților erozive diferite;

- modelul analitic construit pentru descrierea curbelor specifice eroziunii prin cavitație (pierdere cumulată și viteză) operează la fel de simplu indiferent dacă avem unități de masă, volum sau lungime. Relația pentru descrierea vitezei se obține prin simpla derivare a celei folosită la pierderea cumulată;

- la toate oțelurile cercetate vitezele de eroziune tind să se stabilizeze la valoarea maximă, care conform cercetărilor anterioare, acest mod de evoluție al comportamentului oțelurilor, în timpul atacului cavitației, este specific oțelurilor cu rezistență ridicată, sau care și-o sporesc prin durificarea stratului superficial atacat prin cavitație;

- s-a stabilit o **metodă nouă, estimativă**, pentru clasificarea oțelurilor inoxidabile, testate în aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1, care corelează parametrul caracteristic rezistenței la cavitație,  $R_{ns}$ , cu proprietățile mecanice și conținuturile echivalente de nichel și crom. Relațiile construite prin această metodă reprezintă o generalizare a relațiilor stabilite de Sakai-Shima și apoi Bordeasu, cu aplicare la oțelurile inoxidabile testate în Laboratorul de Cavitație din Timișoara;

- metoda de ierarhizare construită în cadrul tezei, bazată pe extinderea domeniilor de comportare la eroziunea cavitației de la slab spre superrezistente este adecvată și justificată, deoarece prin aplicarea unor tratamente termice și mecanice se modifică proporția de constituenți microstructurali și implicit rezistența la impactul bulelor cavitaționale;

- oțelurile inoxidabile pot fi grupate după rezistența la cavitație funcție de valoarea raportului  $Cr_e/Ni_e$ . Pentru cele cu rezistență superioară la atacurile cavitației, valoarea raportului este  $\cong 1.0 \div 2.0$ , cu tendință de optimizare spre 1,8;



- ordonarea materialelor după rezistența la distrugere prin cavitație nu concordă cu criteriile standard de clasificare pe grupe de calitate (oțeluri carbon nealiat, oțeluri aliate pentru construcții, oțeluri inoxidabile, etc.);

## Contribuții personale și originale

- am participat la proiectarea și realizarea unui aparat nou T2, cu cristale piezoceramice (amplitudinea vibrațiilor = 50  $\mu$ m, frecvența vibrațiilor = 20kHz, diametrul epruvetă - 15, 9 mm), care respectă cerințele ASTM G32-2010, destinat producerii cavitației vibratoare, indiferent de natura lichidului de lucru;

- împreună cu membrii colectivului din cadrul Laboratorului de Cavitație, coordonați de prof.dr.ing. Ilare BORDEAȘU am contribuit la perfecționarea aparatului vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, proiectat și realizat de C.P.I. ing. Potencz Iosif, în anul 1965;

- am analizat tendința de influență a principalilor proprietăți mecanice ( $R_m$ , HB,  $R_{p0,2}$ , Z și  $A_5$ ), de care depinde alegerea materialului din punct de vedere al solicitărilor mecanice, asupra comportării cavitaționale a celor opt oțeluri inoxidabile construite, aducându-se elemente noi față de cele prezentate în literatura de specialitate;

- am construit un model analitic, care operează la fel de simplu indiferent dacă pierderile de material sunt evaluate în unități de masă, volum sau lungime și care permite obținerea unei funcții unice pentru curbele specifice de eroziune, pierdere cumulată și viteză. Cea de a doua se obține prin simpla derivare a primei.

- plecând de la relațiile stabilite de Sakai-Shima și apoi Bordeășu am conceput o **metodă nouă, estimativă**, pentru clasificarea oțelurilor inoxidabile testate în Laboratorul de Cavitație din Timișoara, testate în aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, prin care se corelează parametrul caracteristic rezistenței la cavitație,  $R_{ns}$ , cu proprietățile mecanice și conținuturile echivalente de nichel și crom;

- am investigat modul în care constituenții structurali, funcție de gradul de finețe, omogenitate și cota procentuală de participare (determinată pe baza diagramei lui Schäßler), tind să influențeze rezistența oțelurilor la eroziune cavitațională;

- am analizat influența rezistenței la eroziunea prin cavitație de către principalele elemente constitutive de aliere;

- am pus în evidență tendința de grupare a oțelurilor cu rezistențe superioare la atacurile cavitației în domeniul  $Cr_e/Ni_e \cong 1.0 \div 2.0$ ;

- am arătat că raportul dintre intensitățile de distrugere prin cavitația produsă în aparate vibratorii cu parametrii funcționali nu este unul constant, el depinzând de parametrii funcționali ai aparatului, caracteristicile mecanice, structurale și compoziția chimică a materialului;

- am arătat că deși literatura de specialitate recomandă oțelurile cu structuri martensitice ca fiind cu cea mai bună rezistență la cavitație, se pot genera oțeluri cu structuri combinate (martensită-austenită, martensită-ferită, austenită-ferită), care să aibă rezistență similară sau superioară celor cu structuri martensitice.

## 5. Perspective

Pe baza cercetărilor efectuate în cadrul acestui program de doctorat, a rezultatelor obținute și prezentate în lucrare, pentru cercetările viitoare, se pot formula următoarele perspective:

- generarea de noi oțeluri inoxidabile, prin diverse combinații ale cromului și nichelului, astfel încât să se poată obține combinații ale constituenților structurali care, prin proprietățile mecanice dobândite în urma tratamentelor termice specifice, să conducă la creșterea rezistenței la cavitație;
- cercetarea degradării structurale a oțelurilor inoxidabile utilizate în fabricarea și repararea rotoarelor și paletelor pompelor și turbinelor hidraulice în perioada de incipiență a cavitației
- cercetarea influenței raportului constituenților structurali martensită-austenită, martensită-ferită, respectiv austenită-ferită asupra comportamentului oțelurilor inoxidabile la eroziunea prin cavitație
- lărgirea bazei de date de oțeluri inoxidabile, cercetate în aparate vibratorii cu alți parametrii funcționali, pentru creșterea gradului de aplicabilitate a relațiilor construite în acest proiect și pentru clasificarea după rezistența la cavitație.

**LISTA PUBLICAȚIILOR REZULTATE ÎN URMA TEZEI DE  
DOCTORAT,  
PUBLICATE SUB AFILIERE UPT**

**Ing. Alin Dan JURCHELA doctorand**

**1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate ISI**

1. I. Bordeășu, A. Karabenciov, **A. Jurchela**, R. Bădărău, V. Bălășoiu, I. Mitelea, B. Ghiban, "Considerations on the influence of nickel on the cavitation damage to stainless steel by 0.1% carbon content and constant chrome content", *Metalurgia International*, vol. XIV, no.12, pp.5-8, 2009

**2. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate ISI Proceedings**

1. I. Bordeășu, L.E. Anton, A. Baya, **A. Jurchela**, „The Necessity of Considering Cavitation Erosion a Mechanic Phenomena, Against Chemical Corosion”, *Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of The 19th International DAAAM Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on New Generation of Intelligent Systems and Solutions*, Trnava Slovacia, pp.0145-0146, 22-25th October 2008
2. **A. Jurchela**, I. Bordeasu, A. Karabenciov, O. Oanca, „Cavitation resistance of stainless steels with constant chromium and carbon content”, *ModTech International Conference - New face of TMCR Modern Technologies, Quality and Innovation*, pp. 549-552, 2011
3. A. Karabenciov, M.E. Dimian, **A.D. Jurchela**, O. Oanca, “Cavitation resistanceof stainless steels with constant nickel and carbon content”, *The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova*, vol. I, pp. 553-556, mai 2011
4. **A.D. Jurchela**, I. Bordeășu, I. Mitelea, A. Karabenciov, „Considerations on the Effects of Carbon Content on the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steels with Controled” Content of Chromium and Carbon, *21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25th, 2012*, în curs de publicare
5. A. Karabenciv, I. Bordeășu, I. Mitelea, **A. Jurchela**, „Considerations on the Cavitation Erosion Behavior of Two Stainless Steels with Similar Ratios of Structural Constituents”, *21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25th, 2012*, în curs de publicare

**3. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI**

1. I. Bordeășu, R. Bădărău, **A. Jurchela**, “The Deformations And Microstructural Transformations Analyses Produced By Cavitation To The Austenitic Stainless Steel”, *Machine Design, Monograpf University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences*, ISBN 978-86-7892-105-6, pp.411-414, 2008
2. A. Karabenciov, I. Bordeășu, **A.D. Jurchela**, „Study of Stainless Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Charbon and 10 % Nickel, *Study of Stainless*

Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Charbon and 10 % Nickel”, Machine Design 2009, Monography University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, pp.421-426, 2009

3. **A.D. Jurchela**, A. Karabenciov, N. Birau, „Considerations on the effect microstructure and mechanical properties of steels with constant chromium content on the resistance to cavitation erosion”, Machine Design 2010, Monograph University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, pp.383-386, 2010
4. A. Karabenciov, **A.D. Jurchela**, N. Birau, E. Dimian, A. Lustyan, T. Binzar, I. Bordeasu, „The study of cavitation erosion behaviour of a range of stainless steels with constant content of carbon and chromium”, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Tomul LVI (LX), Fasc. 2A, pp. 175-180, Iasi, 2010
5. I. Bordeasu, M. Popoviciu, **A.D. Jurchela**, C. Chirita, “New contributions in the correlation of Mechanical properties with the cavitation Resistance of stainless steels”, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Tomul LVIII (LXII), Fasc. 1, pp. 34-41, 2012

#### **4. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate BDI**

1. I. Bordeasu, M. Popoviciu, V. Bălășoiu, **A.D. Jurchela**, A. Karabenciov, „The Influence of the Vibratory Test Facility Type and Parameters upon the Cavitation Erosion Evolution”, 25-th IAHR Symposium on Hydarulic Machinery and Systems, pp. 282-290, Timișoara, 20-24 September, 2010
2. A. Karabenciov, **A. Jurchela**, I. Bordeasu, M. Popoviciu, „Considerations upon the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steels with Variable Chromium and Nickel Content”, 25-th IAHR Symposium on Hydarulic Machinery and Systems, pp.275-281, Timișoara, September 20-24, 2010

#### **5. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale (Proceedings) din străinătate**

#### **6. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice**

1. I. Bordeasu, **A. Jurchela**, A. Karabenciov, D. Bordeasu, Fl. Bodin, „Nickel’s Influence over Cavitation Erosion Of Stainless Steels With Constant Chromium Content”, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timișoara Transactions on Mechanic, Special Issue, Tom 53 (67), pp.421-424, Timișoara 2008
2. **A. Jurchela**, I. Bordeasu, A. Karabenciov, C. Podoleanu, „Studii privind modelele utilizate în evaluarea eroziunii cavitaționale produsă în tunele hidrodinamice și aparate cu disc rotitor”, A VIII-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.14, pp.275-282, Sebeș, 30-31 mai 2008
3. **A.D. Jurchela**, I. Bordeasu, A. Karabenciov, I. Mitelea, D.R. Lupu, „Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului aliat tratat cu fascicole de electroni”, A IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp.761-766 Sebeș, 5-6 iunie 2009
4. **A.D. Jurchela**, I. Bordeasu, A. Karabenciov, I. Mitelea, „Rezistența la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicole de electroni”, a IX-a

- Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp.767-772, Sebeș, 5-6 iunie 2009
5. **A.D. Jurchela**, I. Bordeășu, A. Karabenciov, I. Mitelea, N. Birău, „Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicule laser”, a IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp.781-786, Sebeș, 5-6 iunie 2009
  6. **A.D. Jurchela**, A. Karabenciov, I. Bordeășu, I. Mitelea, N. Birău, E. Dimian, „Cavitation erosion resistance of unalloyed titanium treated with electron beam”, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference, Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA'09, Nyíregyháza, Hungary, pp.225-228 noiembrie, 2009
  7. A. Karabenciov, I. Bordeășu, **A.D. Jurchela**, I. Mitelea, A.T. Lustyan, „Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului aliat tratat cu fascicule laser”, A IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp.773-780, Sebeș, 5-6 iunie 2009
  8. N. Birău, A. Karabenciov, I. Bordeășu, **A. Jurchela**, E. Dimian, E. Bleoancă, E. Alexescu, „Cercetări privind eroziunea cavitațională a două oțeluri inoxidabile austenitice”, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, pp.431-434, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  9. I. Bordeășu, E. Dimian, A. Karabenciov, **A.D. Jurchela**, N. Birău, A. Lustyan, V. Câmpian, „Considerații privind comportarea la eroziune a unor oțeluri destinate creșterii rezistenței suprafețelor atacate prin cavitație”, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, Vol.17, pp.425-430, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  10. E. Dimian, I. Bordeășu, A. Karabenciov, **A.D. Jurchela**, N. Birău, I. Mitelea, „Rezistența la eroziunea cavitațională a unui aliaj de titan ecruisat”, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, pp.453-438, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  11. **A.D. Jurchela**, I. Bordeășu, A. Karabenciov, N. Birău, E. Dimian, „Influența microstructurii și a proprietăților mecanice ale oțelurilor cu conținut controlat de crom asupra rezistenței la distrugerea prin cavitație”, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, pp.445-450, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  12. A. Karabenciov, I. Bordeășu, **A.D. Jurchela**, E. Dimian, N. Birău, R. Bădărău, „Influența microstructurii și a proprietăților mecanice ale oțelurilor cu conținut controlat de nichel asupra rezistenței la distrugerea prin cavitație”. A-X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, pp.493-444, Sebeș, 4-5 iunie 2010

**7. Granturi de cercetare-dezvoltare nationale (MEC) si contracte de cercetare-dezvoltare in programme nationale**

Nr. Crt.	Nr.grant/contract, anul	Denumire grant/contract	Beneficiar	Director/colaborator
1	Program IDEI, COD CNCSIS ID_34/77/2007	Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportarii materialelor la eroziunea prin cavitatie	MEC	membru
2	Program IDEI, COD CNCSIS ID_34/77/2007 Act additional 1/2008 Nr.801/2201.08/2268 /13.02.2008	Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportarii materialelor la eroziunea prin cavitatie	MEC	membru
3	Program IDEI, COD CNCSIS ID_34/77/2007 Act additional 1/2009	Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportarii materialelor la eroziunea prin cavitatie	MEC	membru
4	Program IDEI, COD CNCSIS ID_34/77/2007 Act additional 1/2010	Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportarii materialelor la eroziunea prin cavitatie	MEC	membru

## 6. BIBLIOGRAFIE

1. Anton I., Cavitația, vol. I, Editura Academiei RSR București, 1984
2. Anton I., Cavitația, vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985
3. Berchiche N., Franc J.P., Michel J.M., A Cavitation Erosion Model for Ductile Materials, *J.Fluids Engineering*, vol.124, pp. 601-606, 2002,
4. Birău N., Karabenciov A., Bordeasu I., **Jurchela A.**, Dimian D., Bleoancă E., Alexescu E., Cercetări privind eroziunea cavitațională a două oțeluri inoxidabile austenitice, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, ISSN2067-7138, vol.17, p.431-434, Sebeș, 4-5 iunie 2010
5. Bogaciov I. N., Miut R. I., Vekslev I. G., Rezistența cavitațională a oțelurilor austenito - feritice, *Energomașinostroenie*, Nr. 9, Leningrad, 1963
6. Bordeasu I., Eroziunea cavitațională a materialelor folosite în realizarea elicelor navale, *analele Universității din Oradea , fascicula Mecanică*, Oradea, 1992
7. Bordeasu I., Miu V., Popoviciu M., Comparatie între comportarea cavitațională a oțelului D - 32 și aliajului de cupru utilizat pentru realizarea elicelor navale, Sesiunea de comunicări științifice a tinerilor absolvenți, Timișoara, 1989
8. Bordeasu I., Popoviciu M., Comportarea la cavitație a unor materiale utilizate în construcția aparatelor hidraulice de comandă și reglare, Conferința Internațională de Sisteme Hidropneumatice de Acționare, Vol III, Timișoara, 1995
9. Bordeasu I., Teză de doctorat, Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, 1997
10. Bordeasu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
11. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Pătrășcoiu C., Bălășoiu V., An analytical model for the cavitation erosion characteristic curves, International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timișoara, Romania, October 2004
12. Bordeasu I., Popoviciu M., Comportarea cavitațională a oțelului inoxidabil utilizat la elicele navale, Conferința de Mașini hidraulice, Vol III, Timișoara, 1990
13. Bordeasu I., ș.a., Cavitation Erosion for G-X5CrNi13.4 Martensitic Stainless Steel With Various Heat Treatments, The 6-th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, pp.259, Timișoara 2004
14. Bordeasu I., Bădărău R., **Jurchela A.**, The Deformations And Microstructural Transformations Analysis Produced By Cavitation to the Austenitic Stainless Steel; Machine Design, Monograph University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, ISBN 978-86-7892-105-6, pp.411-414, 2008
15. Bordeasu I., Popoviciu M., ș.a., New contributions in the correlation of Mechanical properties with the cavitation Resistance of stainless steels, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, ISSN 1011+2855, Tomul LVIII (LXII), Fasc. 1, p. 34-41, 2012
16. Bordeasu I., Anton L.E., Baya A., **Jurchela A.**, The Necessity of Considering Cavitation Erosion a Mechanic Phenomena Against Chemical Corosion, Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of The 19th International DAAAM



- Symposium, Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on New Generation of Intelligent Systems and Solutions, Trnava Slovakia, ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5, pp.0145-0146, 22-25th October 2008
17. Bordeasu I., Popoviciu M., **Jurchela A.D.**, Chirita. C., New contributions in the correlation of Mechanical properties with the cavitation Resistance of stainless steels, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, ISSN 1011+2855, Tomul LVIII (LXII), Fasc. 1, pp. 34-41, 2012
  18. Bordeasu I., Karabenciov A., **Jurchela A.**, Bădărău R., Bălăşoiu V., Mitelea I., Ghiban B., Considerations on the influence of nickel on the cavitation damage to stainless steel by 0.1% carbon content and constant chrome content, Metalurgia International, vol. XIV, no.12, pp.5-8, ISSN 1582-2214, 2009
  19. Bordeasu I., **Jurchela A.**, Karabenciov A., Bordeasu D., Bodin Fl., Nickel's Influence over Cavitation Erosion Of Stainless Steels With Constant Chromium Content, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timişoara Transactions on Mechanics, Special Issue ISSN 1224-6077, Tom 53 (67), p.421-424, Timişoara 2008,
  20. Bordeasu I., Popoviciu M., Bălăşoiu V., **Jurchela A.D.**, Karabenciov A., The Influence of the Vibratory Test Facility Type and Parameters upon the Cavitation Erosion Evolution, 25-th IAHR Symposium on Hydarulic Machinery and Systems, pp282-290, Timişoara, 20-24 September, 2010
  21. Bordeasu I., Dimian E., Karabenciov A., **Jurchela A. D.**, Birău N., Lustyan A., Câmpian V., Considerații privind comportarea la eroziune a unor oțeluri destinate creșterii rezistenței suprafețelor atacate prin cavitație, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, Vol.17, ISSN2067-7138, p.425-430, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  22. Bordeasu I., Șerban V., Voda M., Codrean C., Cavitation Erosion for G-X5CrNi13.4, Martensitic Stainless Steel With Various Heat Treatments; Scientific Buletin "Politehnica" University of Timişoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), ISSN:1224-6077, p.259-264, Timişoara, 2004
  23. Bordeasu I., Anton M.I., *Correlation between Cavitation Rate with Both Parameters of the Vibratory Apparatus and the Phisico-mechanical Properties of the Material*, Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, pp.199-202, 7-10 April, France, 1998
  24. Bregliozzia A., Di. Schinob, S.I.U. Ahmeda, J.M. Kennyb, H. Haefkea, Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
  25. Cuppari M.G. Di V., Souza R.M., Sinatora A., Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe-Cr-Ni-C alloys, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
  26. Dairo Hernán Mesa Grajales, Carlos Mario Garzón Ospina, André Paulo Tschiptschin, Mesoscale plasticity anisotropy at the earliest stages of cavitation-erosion damage of a high nitrogen austenitic stainless steel, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
  27. Dimian E., Bordeasu I., Karabenciov A., **Jurchela A.**, D. Birău N., Mitelea I., Rezistența la eroziunea cavitațională a unui aliaj de titan ecruisat, A X-a Conferința națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, ISSN2067-7138, p.453-438, Sebeș, 4-5 iunie 2010
  28. Dorey J. M., Rarcadou T., Similitude en erosion de cavitation, Essais sur un roue de pompe en eau et en sodium , Rapport EDF/ DER Departament Machines Catou, 1993

29. Edwin L., Frances A., Margaret W., *Statistics Manual*, Dover Publications, Inc. New York
30. Escaler X., Egusquiza E., Farhat M., Avellan F., *Vibration cavitation detection using onboard measurements*, Fifth International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-6-007, Osaka, Japan, 1-4 November 2003
31. Escaler X., Farhat M., Ausoni F., Egusquiza E., Avellan F., *Cavitation monitoring of hydroturbines: Test in a Francis turbine model*, Sixth International Symposium on Cavitation CAV 2006, Wageningen, The Netherlands, September 2006
32. Franc J.P., e.a., *La Cavitation, Mecanismes phisiques et aspects industriels*, Press Universitaires de Grenoble, 1995
33. Franc J.P., Michel M.J., *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publishers, London, 2004
34. Fujiama S., Akamatsu T., *Proc. 10<sup>th</sup> Int. Shock Tube Symp.*, Dept. of Aeronautical Engineering, p. 174, Kyoto University, Japan, 1975
35. Fujita H., Veda S., *Acta Met.*, vol. 20, pp.759, 1972
36. 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
37. Garcia R., Hammitt F. G., Nystrom R. E., *Correlation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement*, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1960
38. Garcia R., Hammitt F.G., Frederick G. *Amplitude determination of an ultrasonic transducer by means of an accelerometer assembly*. UMR1595. 1965.
39. Garcia R., Hammitt F.G., Frederick G. *Ultrasonic-induced cavitation studies in lead-bismuth alloy at elevated temperatures*. UMR1585. 1965.
40. Garcia, Ramon.; Hammitt F.G., Frederick G. *Cavitation damage and correlations with material and fluid properties*. UMR1593. 1966.
41. Geru N., ș.a., *Analiza structurii materialelor metalice*, Editura Tehnică, București, 1991
42. Geru N., ș a., *Analiza structurii materialelor metalice*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1991
43. Georgevici I., *Teză de doctorat, Contribuți privind dezvoltarea unor oțluri inoxidabile cu transformare martensitică directă*, 2003
44. Grantul CNCSIS PN II: ID-34/2007-2010: *Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportării materialelor la eroziunea prin cavitație*
45. Grant ANSTI6153/ fazele 2000-2003, *Cercetari teoretice și experimentale în domeniul turbomașinilor și echipamentelor hidraulice de acționare*
46. Hammitt F. G., Nath A., De. M. K., *Erosion of ferrous and aluminim alloys in cavitating* 159 adiois, Report No. UMICH 014456-53 - I, University, Michigan, 1980
47. Hammitt F.G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, McGraw Hill International Book Company, 1980
48. HATTORI S., KITAGAWA T., *Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data*, *Wear*, Volume 269, Issues 5-6, 19 July, pp. 443-448.2010
49. HATTORI S., MIKAMI N., *Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays*, *Wear*, Volume 267, Issue 11, 29 October, pp. 1954-1960.2009
50. HATTORI S., ISHIKURA R., *Revision of cavitation erosion database and analysis of stainless steel* *Wear*, Volume 268, Issues 1-2, pp. 109-116.2010

51. 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
52. Heymann F. J., Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion, ASTM STP, Vol.474, pp212, 1970
53. Hobbs J. M., Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960
54. Hooper L. J., Experimental Investigation of Initiation of Cavitation Behind an Accelerated Circular Disc, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery Sendai, 1962
55. <http://marcomen2a.blogspot.com/2009/06/cavitation.html>
56. <http://khia.belzona.com>
57. <http://jacpump.wordpress.com>
58. <http://www.ask.com>
59. [http://www.grupoogman.com/og\\_it\\_manual.html](http://www.grupoogman.com/og_it_manual.html)
60. [http://www.hielscher.com/ultrasonics/astm\\_g32-92.htm](http://www.hielscher.com/ultrasonics/astm_g32-92.htm)
61. **Jurchela A.D.**, Karabenciov A., Birau N., Considerations on the effect microstructure and mechanical properties of steels with constant chromium content on the resistance to cavitation erosion Machine Design 2010, Monograph University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, ISSN 1821-1259, pp.383-386, 2010
62. **Jurchela A.D.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Oanca O., Cavitation resistance of stainless steels with constant chromium and carbon content, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2011, ISSN 2069-6736, vol. I, pp. 549-552, Vadul lui Vodă, Chişinău, Republica Moldova, mai 2011
63. **Jurchela A.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Podoleanu C., Studii privind modelele utilizate în evaluarea eroziunii cavitaţionale produsă în tunele hidrodinamice şi aparate cu disc rotitor; A VIII-a Conferinţă naţională multidisciplinară cu participare internaţională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii româneşti, Ştiinţă şi inginerie, ISBN 973-8130-82-4; ISBN 978-973-720-198-0, vol.14, pp.275-282, Sebeş, 30-31 mai 2008
64. **Jurchela A.D.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Lupu D. R., Asupra rezistenţei la eroziune cavitaţională a titanului aliat tratat cu fascicule de electroni, A IX-a Conferinţă naţională multidisciplinară cu participare internaţională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii româneşti, Ştiinţă şi inginerie, ISBN 973-8130-82-4; ISBN 978-973-720-245-1, vol.15, pp.761-766 Sebeş, 5-6 iunie 2009
65. **Jurchela A.D.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Rezistenţa la eroziune cavitaţională a titanului nealiat tratat cu fascicule de electroni, a IX-a Conferinţă naţională multidisciplinară cu participare internaţională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii româneşti, Ştiinţă şi inginerie, ISBN 973-8130-82-4, ISBN 978-973-720-245-1, vol.15, pp.767-772, Sebeş, 5-6 iunie 2009
66. **Jurchela A.D.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Birău N., Asupra rezistenţei la eroziune cavitaţională a titanului nealiat tratat cu fascicule laser, a IX-a Conferinţă naţională multidisciplinară cu participare internaţională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii româneşti, Ştiinţă şi inginerie, ISBN 973-8130-82-4; ISBN 978-973-720-245-1, vol.15, pp.781-786, Sebeş, 5-6 iunie 2009
67. **Jurchela A.D.**, Bordeasu I., Karabenciov A., Birău N., Dimian E., Influenţa microstructurii şi a proprietăţilor mecanice ale oţelurilor cu conţinut controlat de

- crom asupra rezistenței la distrugerea prin cavitație, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, ISSN2067-7138, vol.17, pp.445-450, Sebeș, 4-5 iunie, 2010
68. **Jurchela A.D.**, Bordeășu I., Mitelea I., Karabenciov A., Considerations on the Effects of Carbon Content on the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steels with Controlled Content of Chromium and Carbon, 21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25<sup>th</sup>, 2012
  69. **Jurchela A.D.**, Karabenciov A., Bordeășu I., Mitelea I., Birău N., Dimian E., Cavitation erosion resistance of unalloyed titanium treated with electron beam, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference, Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA'09, Nyíregyháza, Hungary, ISBN: 978-973-638-449-3, pp.225-228 noiembrie, 2009
  70. Kado T. s. a., Cavitation erosion in vibratory and venturi facilities, University of Michigan, Departament of Mechanical Engineering, Report. No UMICH 014456 - 56 - J, 1980
  71. Karabenciov A., **Jurchela A.**, Bordeășu I., Popoviciu M., Considerations upon the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steels with Variable Chromium and Nickel Content, 25-th IAHR Symposium on Hydarulic Machinery and Systems, pp.275-281, Timișoara, September 20-24, 2010
  72. Karabenciov A., **Jurchela A.D.**, Birau N., Dimian E., Lustyan A., Binzar T., Bordeășu I., The study of cavitation erosion behaviour of a range of stainless steels with constant content of carbon and chromium, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, ISSN 1011+2855, Tomul LVI (LX), Fasc. 2A, pp. 175-180, Iași, 2010
  73. Karabenciov A., Bordeășu I., **Jurchela A.D.**, Study of Stainless Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Charbon and 10 % Nickel, Study of Stainless Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Charbon and 10 % Nickel, Machine Design 2009, Monograpf University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2009, ISSN 1821-1259, pp.421-426
  74. Karabenciov A., Dimian M.E., **Jurchela A.D.**, Oanca O., Cavitation resistance of stainless steels with constant nickel and carbon content; The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, ISSN 2069-6736, vol. I, pp. 553-556, mai 2011
  75. Karabenciov A., Bordeășu I., Mitelea I., **Jurchela A.**, Considerations on the Cavitation Erosion Behavior of Two Stainless Steels with Similar Ratios of Structural Constituents, 21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25<sup>th</sup>, 2012
  76. Karabenciov A., Bordeășu I., **Jurchela A.D.**, Mitelea I., Lustyan A.T., Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului aliat tratat cu fascicole laser, A IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, ISBN 973-8130-82-4, ISBN 978-973-720-245-1, vol.15, pp.773-780, Sebeș, 5-6 iunie 2009
  77. Karabenciov A., Bordeășu I., **Jurchela A.D.**, Dimian E., Birău N., Bădărău R., Influența microstructurii și a proprietăților mecanice ale oțelurilor cu conținut controlat de nichel asupra rezistenței la distrugerea prin cavitație A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, ISSN2067-7138, vol.17, pp.493-444, Sebeș, 4-5 iunie 2010

78. Karimi A., Leo W.R., Phenomenological model for cavitation erosion rate  
Computation Material Science and Engineering, 95, 1 □ 14, 1987
79. 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
80. Karimi A., Martin, J. L Cavitation erosion of materials, International Metals  
Reviews, Volume 31, pp. 1-26, 1986
81. Katona S.E., Bordeasu I., Mitelea I., Contribution Regarding the Behavior to  
Cavitation Erosion of Some Austenitic Stainless Steels; 21st International  
Conference on Metallurgy and Materials- 25th, 2012
82. Knapp R., Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, New York,  
1970
83. Knapp R.T., Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation  
damage, Trans ASME, 77, 1045-1054, 1955
84. Knapp R.T., Cavitation and nuclei, Trans. ASTM, 80, 1315-1324, 1958
85. Kuzman, A.A.F., Influența unor proprietăți fizice ale lichidului asupra incipienței  
și eroziunii cavitaționale, Teză de doctorat, Timișoara, 1992
86. Lambert, Teză de doctorat, Deformația plastică și rezistența la cavitație a  
oțelurilor inoxidabile austenitice, 1998
87. Liță M., Tehnici pentru investigația materialelor, Editura Politehnică Timișoara,  
2009
88. Maekawa M., Miyagawa K., Komuro T., Fukuda H., Study of cavitation erosion  
on hydraulic turbine runners, Fifth International Symposium on Cavitation,  
Cav03-OS-6-015, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
89. Mitelea I., Georgevici I., Noi oțeluri inoxidabile în construcția echipamentelor  
pentru generarea puterii hidroelectrice, Simpozionul internațional Zilele  
Academice Timișene, Secția Materiale avansate, pp. 64-69, Ediția a VII-a,  
Timișoara, 24-25 mai 2001,
90. Mitelea I., Georgevici I., Radu B., Particularities of microstructural  
transformation during tempering stainless steel 13/671 (13%Cr, 6%Ni, 1%Mo),  
Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 47 (61), Seria  
Mecanică, fascicola 2, 2002, ISSN 1224-6077 pp. 107-112
91. Mitelea I., Georgevici I., Radu B., The effect of quenching – tempering heat  
treatment on internal stresses of 13/6/1 (13%Cr, 6%Ni, 1%Mo), stainless steel,  
Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 48 (62), Seria  
Mecanică, fascicola 2, 2003, ISSN 1224-6077, pp. 117-120
92. Mitelea I., Bordeasu I., Popoviciu M., Hadar A., Corrosion of Stainless Steels  
with "Soft" martensitic Structure, Chem.Abs. RCBUAU 58(2), Revista de chimie,  
ISSN:0034-7752, vol.58 (2) Nr.2/2007, pp.254-257
93. Mitelea I., Budău V., Studiul metalelor, Indreptar tehnic, Editura Facla,  
Timișoara, 1987
94. Mitelea I., Studiul metalelor, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia"  
Timișoara, 1983
95. Palaev N.I., Ede I.I.U., Kavitația v gidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad,  
1974
96. Pardeep Kumar, R.P. Saini, Study of cavitation in hydro turbines—A review,  
ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, pp.374–383,  
2010
97. Park M.C., Kim J.H., Kim S.J., *Effect of carbon on the cavitation erosion  
resistance of Fe-Ni-C austenitic alloys*, Division of materials science and  
engineering, Hanyang university, pp.133-791, Seoul, Korea, 2009

98. Pădurean I., Teză de doctorat, Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile, 2005
99. Pereira, F. -"Prediction de l'Erosion de Cavitation: Approche Energetique," Ph.D. thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Institut de Machines Hydrauliques et de Mecanique des Fluides ( IMHEF-LMH) , No. 1592, 1997
100. Pilic R.L., Djordjevic V., Utjecaj slanosti na brzinu erozije kavitacijom domacih materijala za gradnju brodskih vijaka, VI Simpozijum Teorija Praksa Brodogradnje, Sveska 2, Beograd, 1984
101. Popoviciu M., Tehnologia fabricației și montajului mașinilor hidraulice, Litografia Institutului Politehnic Traian Vuia Timișoara, 1981
102. Popoviciu M., Bordeășu I., Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice, Editura Politehnica, Timișoara 1988.
103. Preece C.M., Burton J.H., Wear, vol. 60, pp. 269, 1980
104. Pustashny A.V., Kaprontsev S.V., Azipod propeller blade cavitation observations during ship maneuvering, International Symposium on Cavitation CAV2001:sessionB9.002, 2001
105. Rao P.V., ș. a., ASTM, pp. 189, 1981
106. Rao B.C.S., Buckley D.H., Materials Science and Engineering, vol. 67, pp. 55, 1984
107. Sakai I., Shima A., On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials, Report No. 385, Tokyo, 1987
108. Shuji Hattori, Norihiro Mikami, Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, Wear, WEA-99203, No. of Pages7, 2009
109. Simoneau R., ș.a., Cavitation Erosion and Deformation mechanisms of Ni and Co Austenitic Stainless Steels, Erosion by Liquid and Solid Impact, Proceedings of, ELSI-VII, pp.32.1-32.8, Cambridge, 7-10.10, 1987
110. Simoneanu R., Cavitation pit counting and steady - state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995
111. Standhammer K. P., ș.a., Acta Metall., vol. 31, nr. 2, pp. 267, 1983
112. Steller J.K., International cavitation erosion test - summary of results, ImechE Cavitation Conf., pp.95-102, 1992
113. Steller K., Reymann Z., Krzysztoowicz T., - Evaluation of the resistance of materials to the cavitation erosion, Proceedings of the fifth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Akad Kiado, Budapest, 1975.
114. Steller K., Change of the relative material resistance due to the change of cavitation conditions. Proceedings of the sixth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapesta, 1979
115. Steller K., Bugola R., Steller J., Cavitation Roads and their erosive effects, 2 - emes, Journées Cavitation, Paris, 1992
116. STELLER J. K., *International Cavitation Erosion Test - Test Facilities and Experimental Results*, 2 - éméés Journées Cavitation, Paris, March, 1992
117. Steller J.K., International cavitation erosion test - summary of results, International Conference, Cambridge, 1992
118. Terwisga T.J.C., Wijngaarden E., Basschers J., Kuiper G., Cavitation research on ship propellers, Sixth International Symposium on Cavitation CAV 2006 , Wageningen, The Netherland, September
119. Thiruvengadam A., - Cavitation erosion, Applied Mechanics, Vol 24, Nr. 3, 1971.
120. Thiruveadam A., Preece, On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 - 3, 1963
121. Trușculescu M., Studiul metalelor, Editura Didactică și Pedagogică, București.

122. Van der Meulen, Cavitation erosion of a ship model propeller, ASME for Testing Materials, 1970
123. [www.astm.org/Standards/G32.htm](http://www.astm.org/Standards/G32.htm)
124. Zheng Y.G., S.Z. Luo, W. Ke, Cavitation erosion- corrosion behaviour of CrMnB stainless overlay and 0Cr13Ni5Mo stainless steel in 0.5M NaCl and 0.5M HCL solutions, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)