

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

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

Adrian KARABENCIOV

Conducători științifici: prof.univ.dr.ing Ilaire BORDEAȘU
prof.univ.dr.ing Ion MITELEA
Referenți științifici: prof.univ.dr. Anton HADĂR
prof.univ.dr.ing. Viorel CÂMPIAN
conf.univ.dr.ing. Mircea BĂRGLĂZAN

Ziua susținerii tezei: 8.02.2013

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

Prezenta teză de doctorat intitulată „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil în crom” reprezintă o sinteză a activității de cercetare teoretică și experimentală efectuată de autor în domeniul cavitației și eroziunii cavitaționale.

Teza se axează pe studiul experimental al eroziunii oțelurilor inoxidabile prin cavitație vibratoare și pe dezvoltarea unui model de evaluare a comportamentului și rezistenței la această cavitație.

Testele experimentale s-au efectuat pe cele două aparate vibratorii aflate în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara, și anume: aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 și aparatul standard T2, construit conform normelor ASTM G32-2010. Cercetările au fost efectuate pe opt oțeluri inoxidabile; din fiecare fiind testate câte trei probe pe fiecare aparat vibrator (în total 48 de probe).

Cu această ocazie, doresc să mulțumesc coordonatorilor mei științifici, d-lui prof. univ. dr. ing. **Ilare Bordeasu** și d-lui prof. univ. dr. ing. **Ion Mitelea**, care mi-au făcut onoarea de a mă accepta ca student doctorand, sprijini, ajuta și îndruma, cu un profesionalism de excepție și un deosebit simț pedagogic, de la începutul studiilor doctorale până la finalizarea tezei. Datorită colaborării cu dânsii și cu unii colegi, atât din cadrul Universității Politehnica din Timișoara cât și din cadrul altor universități din țară, am reușit să public un număr de 26 lucrări științifice, prezentate și apărute în publicații naționale sau internaționale de prestigiu (în special din categoria ISI și BDI).

De asemenea, aș dori să le mulțumesc d-lui **prof. univ. dr. ing. Mircea Octavian Popoviciu** pentru recenziile făcute și sfaturile pertinente acordate, ce mi-au permis finalizarea unei lucrări unitare.

Mulțumesc, de asemenea, **doamnei prof. univ. dr. ing. Brândușa Ghiban**, pentru sprijinul real acordat, în cadrul colaborării cu Centrul de Expertizare Materiale Speciale al Universității Politehnica din București, pe tot parcursul realizării părții experimentale a tezei de doctorat, pentru consultanța științifică și observațiile extrem de prețioase în conceperea și realizarea acestei lucrări, pentru bunăvoința de care a dat dovadă în mod constant.

Mulțumesc cadrelor didactice, personalului tehnic și colegilor din Catedra de Mașini Hidraulice din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica din Timișoara care m-au ajutat în anii petrecuți aici.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, care a fost mereu alături de mine, dând dovadă de înțelegere, astfel încât am putut finaliza această activitate, începută la 1 octombrie 2008, ca doctorand, dar din 2004 ca specializare. La final amintesc că studiile doctorale ale autorului s-au desfășurat prin finanțare obținută prin intermediul **Grantului CNCSIS PN II: ID-34/2007: "Dezvoltarea de modele pentru evaluarea comportării materialelor la eroziunea prin cavitație"**.

Timișoara, Februarie 2013

Adrian KARABENCIOV

KARABENCIOV, Adrian

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

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 131, Editura Politehnica, 2013, 188 pagini, 156 figuri, 26 tabele.

Cuvinte cheie:

Cavitație, eroziune cavitațională, rezistență la cavitație, oțel inoxidabil, microstructură, proprietăți mecanice, curbe caracteristice, model de estimare

Rezumat,

Teza de doctorat cuprinde studiul rezistenței la cavitație a unei game de opt oțeluri inoxidabile cu conținut constant de nichel (aprox. 10%) și variabil de crom și carbon. Astfel, cele opt oțeluri au fost testate pe două aparate vibratorii cu intensități diferite ale eroziunii cavitaționale. Testele pe aceste aparate au fost urmate de analizarea rezultatelor, trasarea curbelor caracteristice, studierea microstructurii suprafețelor erodate și compararea rezultatelor. La final a fost conceput un model de estimare a rezistenței la eroziunea cavitațională a oțelurilor inoxidabile, model care să țină seama atât de proprietățile mecanice cât și de constituția chimică a oțelului inoxidabil.

CUPRINS

Introducere.....	9
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT DE NICHEL FOLOSITE LA ECHIPAMENTELE HIDROMECHANICE	11
1.1. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan național.....	16
1.2. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan internațional.....	21
1.3. Cercetarea eroziunii cavitației produsă în laborator	28
1.3.1. Obiective urmărite și aparatură utilizată	28
1.3.2. Metode de evaluare și precizare a eroziunii produsă prin cavitație.....	31
1.4. Concluzii	36
1.5. Obiectivele tezei de doctorat.....	37
Cap. 2. Considerații privind procesul distrugerii metalelor prin eroziunea cavitațională.....	38
2.1. Generalități	38
2.2. Mecanisme ale ruperii prin eroziune cavitațională	40
2.2.1. Influența perioadei de incubație și a vitezei de deformație	40
2.2.2. Mecanismul ruperii prin oboseală	42
2.3. Influența tratamentului de modificare a constituției microstructurale și caracteristicilor mecanice	45
2.4. Influența condițiilor de testare asupra începutului fisurării	46
2.5. Concluzii	47
Cap. 3. Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație a unei game de oțeluri inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil în crom....	48
3.1. Oțelurile cercetate	48
3.2. Testarea la cavitație vibratorie	59
3.2.1. Aparatura și metoda de testare	59
3.2.2. Rezultate experimentale. Discuții	66

3.2.2.1. Curbele caracteristice. Modelul analitic	66
3.2.2.2. Prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale	79
3.3. Compararea rezultatelor experimentale	88
3.3.1. Compararea rezistenței și comportamentului la cavitație.....	88
3.3.2. Influența tipului și parametrilor funcționali ai aparatului vibrator asupra evoluției eroziunii cavitației	92
3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație. Investigații metalografice	97
3.4.1. Aparatura și metoda utilizate.....	97
3.4.2. Microstructura erodată. Fenomenologia degradărilor prin cavitație.....	101
3.4.3. Efectul atacului cavitației și a constituenților microstructurali asupra microdurității din suprafața erodată	122
3.5. Analiza rezultatelor experimentale.....	125
3.5.1. Influența dimensiunii suprafeței probei expuse atacului asupra comportamentului și rezistenței la cavitație	125
3.5.2. Influența principalelor elemente chimice constitutive asupra rezistenței la cavitație.....	137
3.5.3. Efectul constituției microstructurale asupra rezistenței la eroziunea prin cavitație.....	140
3.5.4. Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței la cavitație.....	141
3.6. Concluzii	143
Cap. 4 Model de estimare a rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile cercetate în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara.....	145
4.1 Introducere	145
4.2 Modele de evaluare și ierarhizare la cavitație pe baza caracteristicilor fizico- mecanice ale materialelor.....	145
4.2.1 Modelul Hammitt.....	147
4.2.2 Modelul Garcia	148
4.2.3 Modelul Hoff	148

4.2.4 Modelul K. Steller	149
4.2.5 Modelul Sakai-Shima.....	151
4.2.6 Modelul Bordeășu.....	152
4.3 Modelul propus.....	154
4.3.1 Date utilizate	154
4.3.2 Corelarea parametrului 1/MDER cu constituția chimică	156
4.3.3 Corelarea parametrului 1/MDER cu proprietățile mecanice	157
4.3.4 Corelarea parametrului 1/MDER cu proprietățile mecanice și constituția chimică	163
4.4 Concluzii	166
Cap.5. Concluzii finale și contribuții originale	167
Cap.6 Perspective	171
Lista publicațiilor rezultate în urma tezei de doctorat, publicate sub afiliere UPT.....	173
Bibliografie.....	177

INTRODUCERE

În general, cavitația este cunoscută ca fenomen specific curgerii lichidelor, care se manifestă în echipamentele hidraulice prin următoarele efecte:

- reducerea performanțelor (reducerea bruscă a puterii, randamentului sau debitului absorbit);
- zgomote și vibrații;
- eroziunea frontierelor solide ce ghidează curgerea.

Primele două efecte pot fi substanțial reduse prin proiectare și exploatare corespunzătoare. Însă, din motive economice, eliminarea completă a cavitației este practic imposibilă. În consecință echipamentele hidromecanice vor funcționa, aproape întotdeauna, în așa zisa "cavitație admisă industrial", care înseamnă neafectarea parametrilor energetici, zgomote și vibrații de nivel scăzut și uzuri cavitaționale acceptabile, necesitând reparații după perioade lungi de funcționare (aproximativ după 2...4 ani [3], [13], [127])

În cazul microhidrocentralelor, ca urmare a numărului mic de unități montate într-o singură locație și a personalului de întreținere-reparație extrem de redus sau chiar inexistent, problema uzurilor cavitaționale capătă o mare importanță.

Eroziunea cavitațională se datorează concentrării energiei mecanice generată, pe arii extrem de mici, la impactul materialului cu undele de șoc și microjeturile, produse prin implozia bulelor de vapori. Această concentrare de energie determină valori ridicate ale solicitărilor mecanice, care, în general, depășesc limita de oboseală, limita de curgere și chiar rezistența de rupere a tuturor materialelor cunoscute de tehnica actuală [3], [12], [41].

Din cele expuse rezultă că uzura cavitațională este un fenomen complex ce implică studiere a două laturi distincte:

1. hidrodinamica fenomenului care implică: analiza atentă a câmpurilor hidrodinamice astfel încât să nu apară zone cu presiuni reduse generatoare de bule, studiul evoluției bulelor individuale și a norului de bule (mai cu seamă în perioada finală a imploziei), determinarea tensiunilor ce apar precum și analiza altor fenomene fizico-chimice (creșterea temperaturii, formarea radicalilor liberi care accentuează coroziunea etc.);

2. efectul imploziilor asupra materialelor care implică: studiul unor procese la nivelul structurii metalografice (comparații între rezistența diferiților constituenți structurali (martensită, austenită, ferită, etc.) și studiul proceselor care au loc la nivel microstructural (clivaje, modificări ale rețelei cristaline sau chiar transformări ale celulelor elementare, de exemplu din austenită în martensită ϵ).

Din punctul de vedere al proiectanților de turbine hidraulice, ar fi ideal ca rezultatul cercetărilor asupra eroziunii cavitaționale să se finalizeze într-un algoritm de calcul care, ținând seama de intensitatea cavitației și de proprietățile materialului utilizat, să se poată preciza valoarea uzurilor cavitaționale după o anumită perioadă de exploatare.

Din nefericire stadiul actual al cunoștințelor, pe plan național și mondial, este extrem de departe de acest deziderat.

Din acest motiv teza are ca obiectiv cercetarea rezistenței la cavitație a unei game de oțeluri inoxidabile cu conținut constant de nichel și variabil de crom, destinate fabricării rotoarelor de mașini hidraulice. Scopul este evidențierea factorilor ce conduc la diferențieri ale comportării la cavitație a oțelurilor inoxidabile a căror constituție structurală este modificată, conform diagramei Schäffler [13], prin variația conținutului procentual de crom, menținând constant conținuturile de carbon și nichel. Tot odată, ca o necesitate a proiectanților de mașini hidraulice, se construiește o metodă de ierarhizare a oțelurilor inoxidabile, după rezistența la cavitație.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT DE NICHEL FOLOSITE LA ECHIPAMENTELE HIDROMECHANICE

În ultimii 100 de ani, proiectanții, cercetătorii și constructorii de mașini hidraulice (în special turbine hidraulice și pompe) sunt preocupați, permanent, de găsirea unor soluții tehnologice de creștere a duratei de viață a componentelor acestor mașini ce funcționează în regim de cavitație, în deosebi rotoarelor și paletelor rotorice [3], [6], [12], [15], [18], [19], [20],[24], [25], [26], [36], [41], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [116]. Cum efectul cel mai nociv al cavitației este degradarea prin eroziune, dependentă de: constituția structurală, compoziția chimică, tehnologia de elaborare a semifabricatului, tratamentele termice, chimice și mecanice, etc., cercetările sunt tot mai mult orientate spre analiza rezistenței la eroziunea cavitațională prin fenomenele ce apar în structura materialelor, în urma atacului cavitațional [2], [3], [4], [13], [24], [41], [84].

Cercetările efectuate, timp de peste 50 de ani, pe turbinele hidraulice din România, de grupul de specialiști de la Catedra de mașini Hidraulice din Timișoara [23], [41], [97], [95], [117], [113], [124], [125], [5], precum și datele găsite în literatura de specialitate, arată că zonele în care se manifestă eroziunea cavitației depinde de tipul turbinei și regimul de funcționare. Ca regulă generală, la asemenea mașini, nu au fost făcute observații sistematice asupra uzurilor cavitaționale în special din cauza costului relativ mare al acestor studii și al austerității privind resursele financiare. În ceea ce privește unul și același tip de turbină, uzurile se vor manifesta preferențial în aceleași zone, indiferent de dimensiunea mașinii. În cele ce urmează se vor prezenta, pe scurt, observațiile privind plăgile cavitaționale, la diferite tipuri de turbine ținând seama de datele publicate în literatura cercetată și precizată și de experiența colectivului de cercetare de la Mașini Hidraulice din U.P. Timișoara precum și cercetările proprii în acest domeniu. Pentru simplitate analiza va fi făcută pe tipuri de turbine.

a) Turbinele Pelton și Banki

În cazul turbinelor Pelton, fig.1.1 și Banki, fig. 1.2 rotorul lucrează într-o carcasă care se află la presiunea atmosferică. Din acest motiv apariția cavitației este puțin probabilă.

12 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

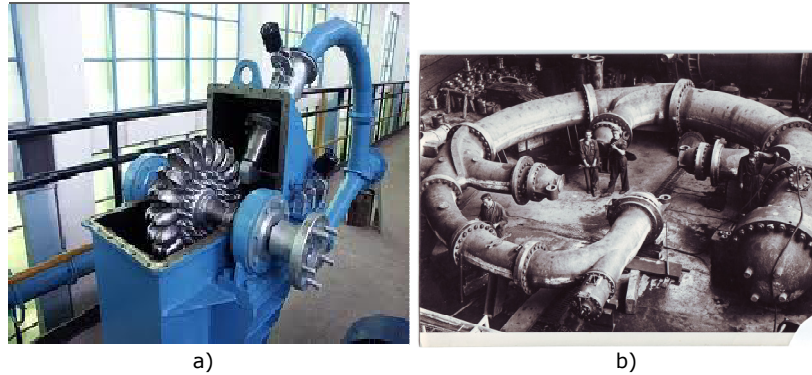


Fig.1.1 Turbina Pelton
a) vedere de ansamblu [152], b) dispunere injectoare (CHE Lotru-arhiva catedrei MH-UP. Timișoara)

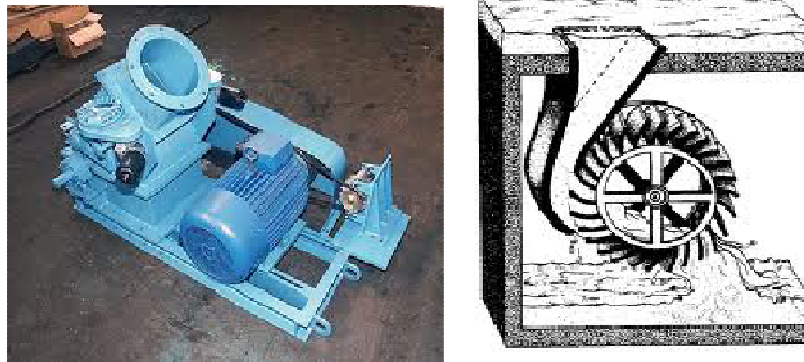


Fig.1.2 Turbina Banki [153]

La Pelton, viteza de curgere a apei are valori mari atât în duză cât și pe paletele rotorului. Dacă există configurații care oferă fluxului hidrodinamic posibilitatea desprinderii de pe frontiera ce ghidează curgerea, local, pe arii restrânse apare cavitația care poate provoca necazuri mari. Au fost observate asemenea plăgi pe acul injectorului, fig.1.b, pe spatele paletei, în zona muchiei de intrare și pe fața paletei în special în zonele unde curentul face întoarcerea de aproape 180° . La turbinele Banki este aceeași situație, cavitația putând să apară în eventualele zone cu desprinderi. Dacă această zonă este dispusă chiar pe paletă, această poate fi cu ușurință străpunsă, mai cu seamă că materialul din care sunt confecționate paletele nu are proprietăți anticavitaționale. La turbina Banki înlocuirea rotorului este facilă constructiv și nu foarte costisitoare economic. Din acest motiv nu se impun reparații, cauzate de eroziunea prin cavitație, ci înlocuirea rotorului. Problema este mult mai dificilă la turbinele Pelton, la care rotorul trebuie realizat din materiale costisitoare, capabile să reziste la eroziune abrazivă (fenomen frecvent la aceste turbine, în special în cazul viiturilor) material care de obicei rezistă bine și la

cavitație. Dezavantajul îl reprezintă prețul mare al rotorului, în special atunci când paletele sunt realizate monobloc cu discul.

b) Turbinele Francis.

La aceste turbine, fig. 1.3, organele cel mai frecvent uzate prin cavitație sunt: paletele rotorului, conul tubului de aspirație și uneori inelul inferior al aparatului director.

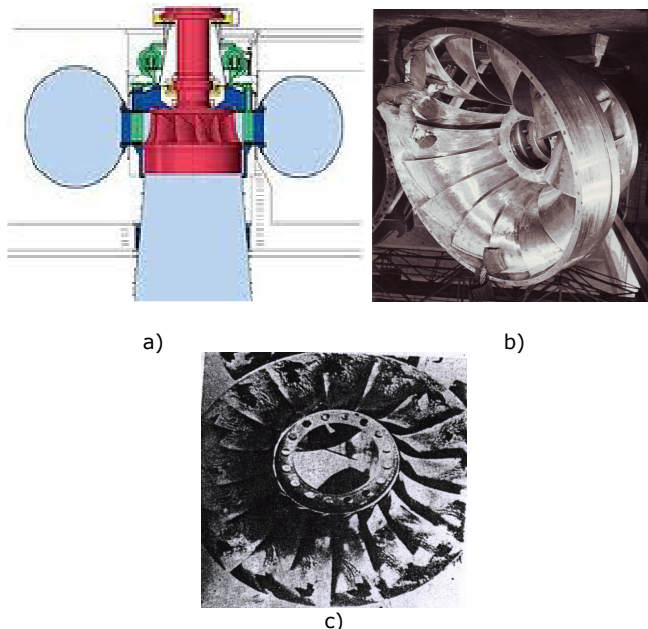


Fig.1.3 Turbina Francis
a-ansamblul turbină [154]
b-rotorul turbinei CHE Râu Mare-Retezat (arhiva catedrei MH-U.P. Timișoara)
c)Eroziuni pe paletele rotorului de turbina Francis [3]

Uzurile pe inelul inferior al aparatului director apar mai cu seamă la turbinele de înaltă cădere, ca urmare a curgerii prin rosturile dintre partea frontală a paletei și inelele aparatului director. La ieșirea din rost se formează un vârtej care determină eroziunile de cavitație. După opinia noastră, marea majoritate a uzurilor apar în faza funcțională când paletele directoare sunt în poziție închisă, vana sferică este și ea în poziție închisă iar by-pasul este deschis pentru echilibrarea presiunilor pe cele două fețe ale organului de obturare al vanei sferice. În aceste momente, de altfel foarte scurte, de ordinul a câteva minute diferența de presiune între extradusul și intradusul paletei aparatului director este extrem de mare iar prin rosturile dintre părțile frontale ale paletei și inele se formează un jet de mare viteză. Cu cât căderea turbinei este mai mare, cu atât viteza de curgere este și ea mai mare iar fenomenul eroziune mai puternică [6]. La căderi mici, în general, cavitația nu mai apare.

Uzurile în conul tubului de aspirație apar și ele ca urmare a vârtejurii de la ieșire din rotor și depind în principal de parametrii acestui vârtej [4], [95], [123]. Fenomenul trebuie atent monitorizat în special când tubul de aspirație este complet

14 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

îngropat în beton iar conul se realizează ca un blindaj din tablă subțire . Străpungerea blindajului prin cavitație permite infiltrarea apei în spatele tubului de aspirație și spălarea betonului, ceea ce provoacă uzura rapidă a părții metalice a aspiratorului.

Eroziunea cea mai frecventă este cea a paletelor rotorului în zona muchiei de ieșire. În funcție de modul de proiectare și de regimurile de funcționare ale turbinei, plăgile cavitaționale vor fi observate în apropiere de coroană, de inel sau în porțiunea mediană a muchiei de ieșire [3], [4], [13], [123]. Ca regulă generală aceste plăgi pot fi cu ușurință reparate, fără demontarea rotorului. Pentru turbine mari, exploatate în regimuri de tranziție (la căderi mai mici, dar la debite mai mari decât cele de proiectare) adâncimea uzurilor a atins uneori adâncimea de 10...16 mm [20], întinzându-se pe 80% din lungimea muchiei de ieșire [93]. Cu mai mică frecvență, au fost observate uzuri pe muchia de ieșire fie în apropiere de inel fie chiar în apropiere de coroană. Uzurile de acest fel sunt extrem de greu de reparat prin sudare mai cu seamă la turbinele cu turație specifică joasă și de dimensiuni reduse; aproape în toate cazurile rotorul trebuie scos din turbină pentru acces [3], [4], [13], [123].

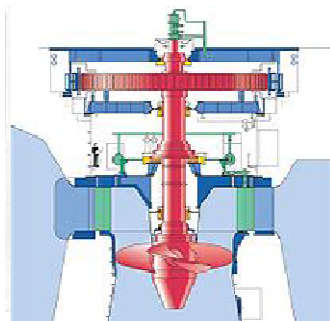
c) Turbinele Kaplan.

La turbinele de acest tip, fig. 1.4, indiferent de mărimea lor, uzurile cavitaționale apar frecvent pe [3], [4], [13], [123]: paletelor rotorului, blindajul camerei turbinei (în zona și în avalul rostului format între palete și blindaj) și pe butuc (în zona rostului dintre palete și butuc), fig.1.5.

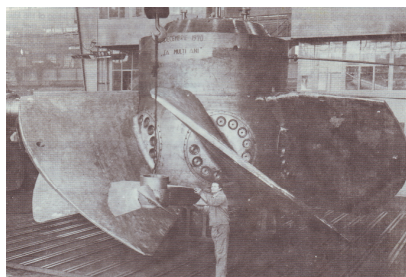
Plăgile cavitaționale de pe butuc apar din cauza cavitației de vârtej, în general sunt de mică intensitate și pot fi în mare măsură atenuate prin utilizarea la reparații a depunerilor de materiale cu mare rezistență la cavitație, în general materiale austenito-feritice cu aproximativ (18...22)% Cr și (8...12)% Ni.

Pentru blindajul camerei rotorului se utilizează în general materiale bimetalice (stratul exterior ceva mai gros este din oțel carbon și oferă structura de rezistență iar stratul interior, mai subțire, conferă ansamblului rezistența la cavitație).

Uzurile cavitaționale de pe paletele rotorice apar în general pe extradados paletei și sunt plasate în două zone distincte, fig. 1.6 [13], [113]: zona I: pe extradados, la muchia de la periferie a paletei unde aria preferențială a plăgilor se extinde între D și $0,8D$, (cu D s-a notat diametrul maxim al rotorului), zona II, pe extradados în apropiere de bordul de atac, în general în zona din apropierea periferiei și zona III, pe extradados în apropiere de bordul de fugă și de muchia periferică a paletei.



a)



b)



c)

Fig.1.4 Turbina Kaplan

a) ansamblul turbină [155]

b) rotorul turbină [CHE Porțile de Fier I-arhiva arhiva catedrei MH-U.P. Timișoara]

c) eroziuni pe paletelor rotorului de turbină Kaplan [3]

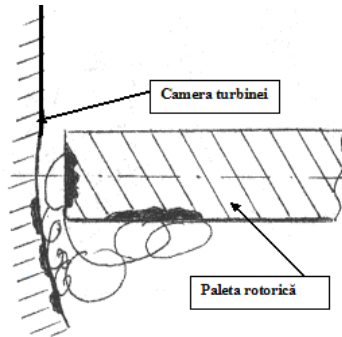


Fig.1.5 Eroziunea cavitațională a paletelor rotorice și camerei turbină prin cavitația de rost [13]

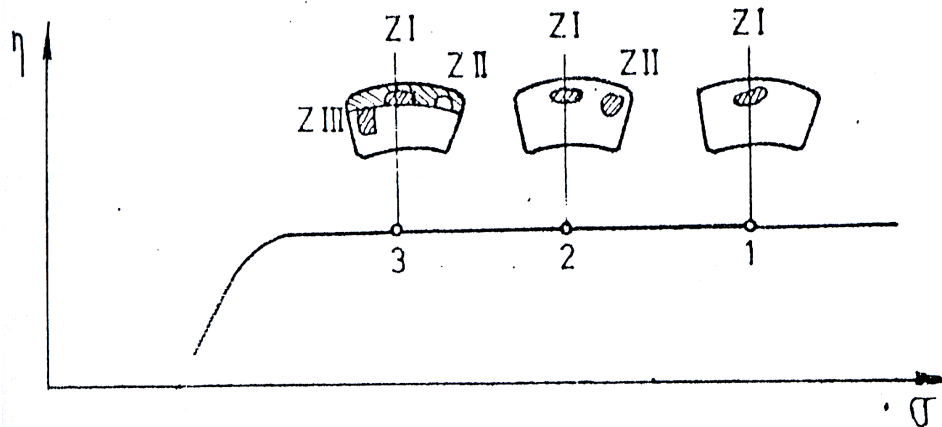


Fig.1.6 Caracteristica primară de cavitație și evoluția distrugerilor [13]

16 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

Eroziunea din zona I este produsă prin cavitația de rost și se prezintă sub forma unor plăgi bine delimitate care acoperă zona indicată anterior. Adâncimea eroziunilor este mare și foarte mare (poate atinge în cazuri particulare până la 0,3 din grosimea paletii). Numărul plăgilor, poziția lor și adâncimea depind de regimurile de funcționare ale turbinei și au aspecte diferite pentru una și aceeași paletă, între două intervale diferite de funcționare.

Eroziunea din zona II este produsă prin cavitație de profil. Aria plăgii este mare dar adâncimea ei este redusă (0,3...0,8 mm). Conturul și extinderea diferă în funcție de regimul de funcționare. Adesea, prin repararea cu electrozi austenitoferrici de bună calitate, eroziunile scad substanțial, dar nu pot fi complet eliminate.

În cazul turbinelor bulb, cum sunt cele de la CHE Porțile de Fier II eroziunea prin cavitație este nesemnificativă, motiv pentru care asupra acestora nu vom insista.

Din cele prezentate mai sus rezultă necesitatea continuării cercetărilor privind factorii dependenți de material, dar și cei care duc la modificarea soluției constructive a rotorului, respectiv paletii rotorice, astfel încât să se asigure o performanță energetică și o durată de viață a rotorului mașinii cât mai mari.

1.1. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan național

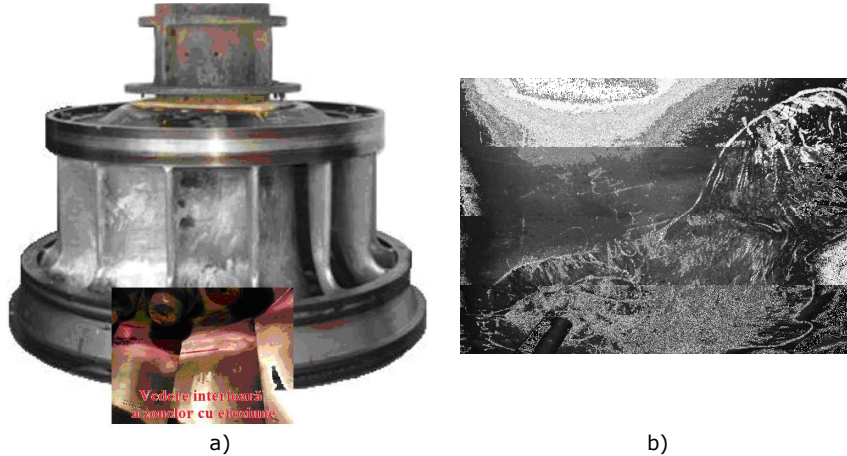
Ca urmare a programului național privind construirea de centrale hidroelectrice și de rețehnologizare a turbinelor din centralele cu vechime, în scopul creșterii puterii pe grup și a duratei de exploatare a dus, în mod obligatoriu, și la accentuarea cercetărilor privind crearea de noi oțeluri inoxidabile și identificarea factorilor ce contribuie la îmbunătățirea comportării lor la cavitației [6], [7], [8], [9], [12], [3], [41], [6], [15], [18], [19], [20],[24], [25], [26], [36], [72], [73], [74], [75], [76], [77], [78], [79], [80], [81], [82], [83], [84], [85], [86], [87], [88], [113],[150]. Cele mai cunoscute universități, centre și institute de cercetare cu activități consacrate în studierea cavitației și a efectelor acesteia, precum și a modelării fenomenelor hidrodinamice și a distrugerii în timp a materialelor expuse cavitației din țară sunt: Universitatea Politehnică din București (Catedra de Hidraulică, Mașini Hidraulice și Ingineria Mediului, Centrul de Cercetări Energetice și Protecția Mediului) [41-43, 46], Universitatea Politehnică din Timișoara (Catedra de Mașini Hidraulice, Centrul Național pentru Ingineria Sistemelor cu Fluide Complexe) [2, 4-6, 22-25, 29-32], Universitatea Dunărea de Jos din Galați (Departamentul Hidrodinamică Navală, Centrul de Cercetare Hidrodinamică, Structuri și Tehnologii Navale), Universitatea Eftimie Murgu din Reșița (Catedra de Discipline Fundamentale, Centrul de Cercetări în Hidraulică și Procese Termice) [150], [151], etc. Cea mai mare parte a cercetărilor din instituțiile menționate, pe domeniul cavitației, sunt orientate mai mult spre crearea unor modele de proiectare care să permită obținerea de componente ce determină cavitații de intensitate redusă, cu eroziuni accesibile, datorită programelor profesionale și performante cum este Fluent 6.3 și mai puțin spre crearea unor modele pentru evaluarea rezistenței la cavitație, funcție de intensitatea atacului cavitațional. Dar, având în vedere că rețehnologizarea echipamentelor din sistemul hidroenergetic național este în plină desfășurare, se observă că noile cercetări abordează obligatoriu și problema distrugerii prin eroziunea cavitației, a determinării factorilor care să permită crearea de noi materiale (oțeluri), pentru creșterea duratei de exploatare. Acest lucru

1.1. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan național 17

impune dezvoltarea de modele/relații pentru evaluarea comportamentului materialului la eroziune cavitațională, astfel încât să se poată anticipa rezistența la atacul cavitațional.

Pe plan național cele mai multe date oferite de literatură, se referă, la distrugerile cavitaționale și modalitățile de reparare de la turbinele Francis și Kaplan, fără a se prezenta analize de substanță. Trebuie făcută observația, că foarte multe date, cu privire la cavitație produsă în turbinele și pompele din România se află sub protecția dreptului de autor. Din acest motiv se vor prezenta doar date la care s-a avut acces și la care subsemnatul a participat ca membru al colectivelor din contractele de cercetare.

În fig.1.7 sunt prezentate eroziuni produse pe o paletă de turbină Kaplan și ale unui rotor de turbină Francis cercetate în cadrul unor contracte la care a participat și subsemnatul [150]. Cele mai ample studii pe mașina industrială sunt realizate pe turbinele Kaplan de la Porțile de Fier I și Francis, în special de la CHE râul Mare –Retezat și CHE Brădișorul.



a) rotorul turbinei Francis de la CHE Brădișorul
(material T08 cu $\approx 0.1\%C$, $\approx 4\%Ni$, $\approx 18\%Cr$ [150])
b) eroziune pe paleta turbinei Kaplan de la CHE Porțile de Fier I

Cercetările efectuate pe turbina Kaplan de la Porțile de Fier I au avut drept scop crearea unei nervuri anticavitaționale din diverse materiale precum: oțel inoxidabil austenitic 1.4571, oțel inoxidabil austenitic 1.4301 și oțel inoxidabil martensitic 1.4313. Pe acest oțeluri s-au depus, prin sudare, stratul de UTP 730, cu grosimi de la 7 mm la 20 de mm. Cercetările realizate au evidențiat capacitatea stratului depus de a rezista foarte bine la atacurile cavitaționale. Însă, problema nervurii anticavitaționale, este legată de soluția constructivă de montaj și nealterare a performanțelor energetice ale turbinei, precum și de deteriorarea nervurii sau a paletei, ca urmare a unor solicitări mecanice, de oboseală, suplimentare.

Soluția cercetată asigură o creștere a rezistenței la cavitație doar a nervurii și, din discuțiile purtate cu beneficiarii, au rezultat că se reduce foarte mult aria eroziunii cavitaționale de pe suprafața paletei. Dar, în plan industrial, preferabil este

18 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

să se găsească oțeluri cu capacități sporite la cavitație, fără a se interveni în forma geometrică a paletei, pentru a nu afecta câmpul hidrodinamic al curgerii, pe paletă.

În cadrul CHE Brădișor, analiza paletei rotorice a arătat că distrugerea cavitațională era foarte profundă în zona muchiei de ieșire, în apropiere de coroană, de inel și în porțiunea mediană a muchiei de ieșire. Cercetările metalografice și de cavitație au arătat că oțelul inoxidabil martensitic nu era omogen în structura sa, deoarece comportarea la cavitație a fost foarte diferită. Astfel, s-a constatat că cea mai bună rezistență la cavitație au avut-o cu probele prelevate din apropierea inelului (rezistență mai scăzută doar cu 30% față de OH12NDL-oțelul de referință, considerat cu bună rezistență la cavitație). Structura oțelului cercetat era una grosieră, cu foarte multe defecte, în special de tip pori, ceea ce a condus la scăderea rezistenței la cavitație, dar și la un comportament, pe timpul atacului, total atipic oțelurilor inoxidabile cu o astfel de constituție structurală.

Aceste rezultate sunt în concordanță cu cele afirmate anterior și confirmă necesitatea continuării cercetărilor pentru găsirea de tehnologii de turnare și de constituții microstructurale și chimice pentru a conferi rezistențe sporite la cavitație.

Cele mai ample cercetări de laborator, cu privire la deteriorarea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile, cu și fără tratamente de modificare structurală sau de suprafață sunt realizate în cadrul Universității Politehnica din Timișoara.

Cercetările realizate de Bordeasu, în cadrul tezei de doctorat [14] și în o serie de lucrări publicate [13], [16], [23], [27] abordează comportamentul la cavitație a diverselor tipuri de oțeluri (inoxidabile, aliate pentru construcții, carbon, etc.). Mai, toate cercetările vizează efectul constituției microstructurale, al proprietăților mecanice și constituției chimice asupra rezistenței și comportamentului la cavitație. De asemenea, autorul și colaboratorii caută să stabilească relații de legătură între diversele rezistențe la cavitație.

O serie de cercetări efectuate de Mitelea și colaboratorii [105], [106], [107] și continuate de Bordeasu și Mitelea [13], în Laboratorul de Mașini Hidraulice al Universității Politehnica din Timișoara, pe oțelurile cu conținut constant de Cr și variabil de Ni au evidențiat influența conținutului de nichel la oțelurile cu 13% crom asupra comportării la eroziunea cavitațională, având în vedere schimbările provocate de 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, autorii au cercetat oțelurile cu un conținut de 13 % crom și 4 ÷ 6% nichel, tabelul 1.1, fig. 1.8. Aceste oțeluri au fost promovate de S.C. UCM Reșița, pe baza unor cercetări anterioare [105], [106], [107], societatea respectivă participând la programul național de rețehnologizare a centralelor hidroelectrice românești și la producerea unor rotoare și palete de turbine hidraulice pentru alte țări. 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.

Tabelul 1.1 Compoziția chimică a șarjelor de oțeluri cercetate

Oțel	Compoziția chimică									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu
13Cr (13/10)	0,08	0,28	0,65	0,02	0,02	12,95	-	0,12	0,02	0,14
13Cr-1Ni (13/1)	0,08	0,31	0,63	0,02	0,02	12,86	1,12	0,22	0,08	-
13Cr-4Ni (13/4)	0,062	0,36	0,59	0,02	0,02	13,32	4,07	0,14	-	0,15
13Cr-6Ni (13/6)	0,07	0,34	0,60	0,02	0,02	13,09	6,11	0,20	0,06	-

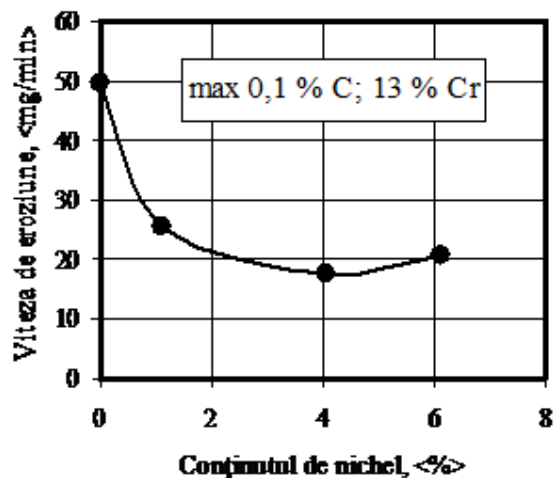


Fig.1.8 Variația vitezei de stabilizare a eroziunii cavitaționale cu conținutul de nichel

Concluziile autorilor, pe baza curbelor caracteristice și analizei efectuate cu microscopul optic, sunt:

- creșterea rezistenței la cavitație este favorizată de alierea cu nichel, cel mai bun rezultat obținându-se pentru oțelul 13/4;
- alierea cu 6 % nichel, deși provoacă o puternică reducere a proporției de ferită δ și obținerea celor mai ridicate valori pentru caracteristicile de tenacitate, conduce la pierderi masive (figura 1.8), 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;

20 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

- oțelul 13/4 constituie soluția optimă de material, dintre cele studiate, pentru execuția paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice, el reprezentând o structură omogenă de martensită revenită cu o cantitate redusă de ferită δ . O asemenea microstructură asigură o degradare uniformă a suprafeței materialului, prin formarea unor multitudini de cratere cu diametre de 3-10 μm . Amorsarea smulgerilor de material, prin implozia bulelor cavitaționale, are loc, în principal, pe particulele de faze fragile de carburi de crom și ferită δ , existente în matricea de bază de natură feritică;
- caracteristicile mecanice și implicit rezistența la eroziune cavitațională sunt afectate de cantitatea de ferită δ a oțelurilor inoxidabile cu 13 % crom, până la 0,1 % carbon și fără nichel, prezentă în proporție de 20÷30% în microstructura oțelurilor;

Pădurean Ioan, în teza sa doctorat [114], analizează efectul diverselor tratamente de durificare superficială și structurală asupra unei game de oțeluri martensitice și în special asupra oțelului GX5CrNi13.4 și constată că prin creșterea durtății se sporește rezistența la cavitație.

Toate studiile efectuate de autorii menționați arată că rezistența la cavitație poate fi îmbunătățită prin diverse tratamente termice, termochimice și acoperiri de suprafață, dar și că există oțeluri cu diverse combinații ale constituenților microstructurali, care pot oferi oțelurilor comportări cavitaționale similare.

Cercetările de eroziune cavitațională, realizate de Hrelescu [69], în laboratorul de cavitație din cadrul UP Timișoara, pe un aparat vibrator magnetostriktiv, pe oțeluri inoxidabile cu structuri combinate de martensită, austenită și ferită, arată că influența cromului, fig.1.9., asupra rezistenței la cavitație este de creștere sau scădere, funcție și de celelalte elementele de aliere (Ni, Mn, Mo, W, Ti, Va, No) și proporția acestora.

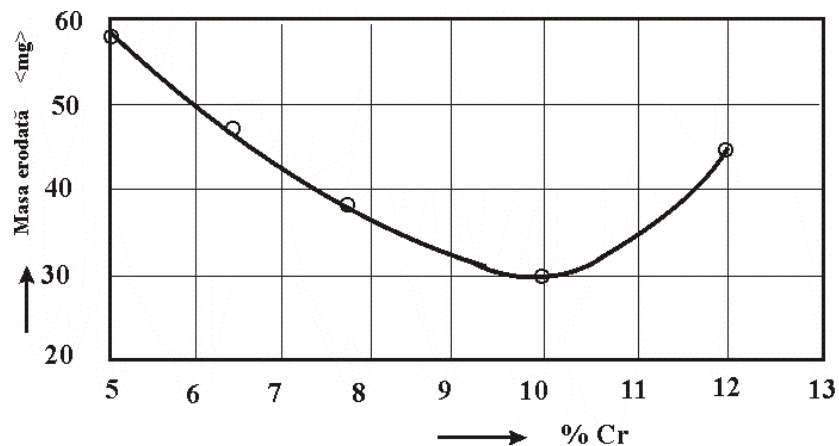


Fig.1.9 Influența conținutului de crom asupra pierderilor, realizate prin eroziune cavitațională (Prelucrare după Hrelescu [69]) Prin urmare cercetările realizate de Mitelea și colaboratorii [13], [105], [106], [107] și Hrelescu [69] arată că autorii nu au un punct de vedere similar cu privire la cea mai bună concentrație de crom, care poate conferi o rezistență sporită la cavitație. Efectul procentului de crom, asupra rezistenței la cavitație depinde și de proporția celorlalte elemente chimice constitutive și de aliere.

1.2. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan internațional

Cercetări efectuate pe plan internațional urmăresc determinarea cauzelor erodărilor produse în mașinile industriale (turbine hidraulice, pompe, elice navale) [3], [113], dar și realizarea unor relații de evaluare, pe baza corelării parametrilor specifici eroziunii cu caracteristici ale materialelor, ca: corelarea durtății Brinell și a rezilienței finale cu viteza adâncimii medii de pătrundere MDER [13], [14], [47], [48], [53], [54], [55], [56], [136], [137]; corelarea parametrului MDER cu diverse proprietăți ale materialului (rezistența mecanică la rupere, limita de curgere, reziliența finală, durtatea) [41], [53], [54], [55], [56], [136], [137]; corelarea parametrului MDER cu parametrii hidrodinamici ai stațiunii de încercare [41], [113], [141], [142], [144]. Scopul este multiplu: de identificare a cauzelor ce determină diverse modificări structurale prin atacul cavitațional [132] și de stabilire a tehnologiilor de fabricare a unor materiale cu componentă structurală și caracteristici fizico-mecanice capabile să le confere rezistență sporită la atacul cavitațional [2], [13], [113], stabilirea unor domenii de ierarhizare a oțelurilor după rezistența la cavitație [26], evidențierea efectului elementelor principale de aliere asupra rezistenței la cavitație [13], [14], [53], [54], [55], [56], [113], [136], [137], [144], etc.

a. Cercetări pe turbine hidraulice

Studiile făcute de cercetătorii ruși pe agregatele hidroelectrice din fosta URSS, tabelul.1.2, sintetizate și prezentate de Milecenco [103] arată că în centralele hidroelectrice de mare putere, cavitația are loc în funcționarea majorității turbinelor hidraulice, iar gradul acesteia depinde de specificul constructiv al traseului de curgere, calitatea confecționării pieselor, regimurile de lucru, condițiile de exploatare. De aceea, intensitatea distrugerilor eroziv-cavitaționale la diferite centrale hidroelectrice nu este identică și depinde, în afară de factorii amintiți, de durata de contact cu fluxul cavitațional, de natura, compoziția și proprietățile fizico-chimice ale materialelor care determină capacitatea de rezistență a acestora la eroziunea prin cavitație.

Tabelul 1.2 Caracteristicile turbinelor hidraulice produse în fosta U.R.S.S [103].

Centrala Hidroelectrică	Tipul turbinei hidraulice	Parametrii turbinei				Anul fabricației
		Puterea MW	Căderea de calcul m	Diametrul rotorului m	Turația rot/min	
Novosibirsk	Kaplan	58,6	14,3	8,0	68,2	1955
Kremensk	Kaplan	58,0	14,2	8,0	68,2	1958
Voljskaia – Congr. XXII	Kaplan	130,0	22,5	9,3	68,2	1954
Voljskaia – V.I.Lenin	Kaplan	118,2	20,0	9,0	68,2	1954
Buhtarminskaia	Francis	75,0	65,5	5,5	88,25	1958
Pliavinskaia – V.I.Lenin	Francis	85,0	34,0	6,0	88,25	1964
Bratsk – 50 ani Marea Revoluție din octombrie	Francis	230	96,0	5,5	125	1959

Concluzia generală a cercetătorilor ruși este că datorită hidrodinamicii de curgere a curentului în interiorul rotorului turbinei, pe suprafața pieselor metalice

22 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

(paletelor rotorice) se manifestă focare locale de distrugere sub formă de pete de coroziune (pittinguri), metalul devenind afânat, buretos (Fig. 1.10).

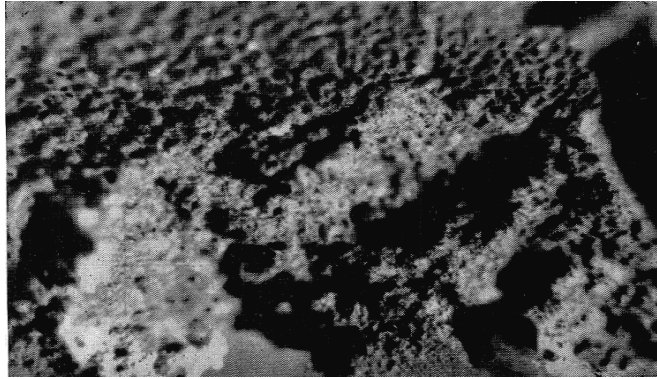


Fig. 1.10 Suprafața paletelor turbinelor hidraulice după acțiunea cavitației. Oțel 30L (Echivalentul oțelului românesc carbon turnat OT500)

Studiile prezentate în lucrarea lui Milicenco [103], Balazas [6], Galperin [46], Kreanin [94], Pîlaev [112], Anton [3] și Franc ș.a. [41] sunt o certificare a faptului că în problema eroziunii cavitaționale a materialelor, deocamdată, nu există o opinie unică în ceea ce privește natura și mecanismul acestui fenomen. Centralizând datele bibliografice existente privind eroziunea cavitațională a materialelor, vom remarca următoarele:

1. eroziunea prin cavitație se abordează ca un proces de microoboseală ca urmare a acțiunii de impulsuri multiple a undelor de șoc (șocuri hidraulice) asupra suprafeței corpului solid;

2. eroziunea prin cavitație se abordează ca o urmare a acțiunii de impact a microjeturilor de înaltă viteză ale lichidului, capabile să deformeze și chiar să distrugă materialul în punctul de contact la acțiune momentană.

Ca urmare a acestui lucru, pentru determinarea intensității și caracterului eroziunii cavitaționale, în ultimii 6 – 7 ani s-au supus testării multe agregate la diferite CHE atât direct în perioada de reparații capitale, cât și după formularele reparațiilor anterioare. Rezultatele, inspecțiilor, făcute în perioada 1961-1968, pe turbinele din centralele hidroelectrice rusești, arată că deteriorările prin eroziunea cavitațională pentru turbinele hidraulice de același tip și care se află cu aproximație în aceleași locuri. Volumul distrugerilor prin eroziune pe piesele din traseul de curgere al turbinelor hidraulice, confecționate din oțeluri carbon sau slab aliate, atinge, în perioada între reparații, valori considerabile (Tabelul 1.3). Compoziția chimică și caracteristicile mecanice ale oțelurilor utilizate în fabricarea rotoarelor și paletelor turbinelor rusești, din tabelul 1.2 sunt prezentate în tabelele 1.4 și 1.5

1.2. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan internațional 23

Tabelul 1.3 Caracterizarea distrugerilor erozive la turbinele hidraulice rusești [103]

Centrala hidroelectrică	Tipul turbinei hidraulice	Puterea, MW	Exploatarea medie (durata) între două reparații capitale, luni	Durata medie a reparației capitale, zile	Aria maximă a distrugerii de cavitație, m ²	Materialul
CHE de pe Nipru "V.I.Lenin"	Francis	86	24	25	8,5	30L
Cahovskaia	Kaplan	58,5	18	30	18	ST3, 18DGSL
Novosibirsk	Kaplan	58,6	24	30	12	ST3, 20GSL
Ĵimliansk	Kaplan	44,5	24	60	30,4	ST3
CHE "Volga", V.I.Lenin	Kaplan	11,2	20	45	18,5	ST3, 18DGSL
CHE "Volga", Congr. XXII	Kaplan	130	24	45	18	ST3, 20GSL
Bratsk 50 ani Marea Revoluție din octombrie	Francis	230	18	50	25	20GSL

Tabelul 1.4 Compoziția chimică a oțelurilor folosite pentru paletele și rotoarele turbinelor hidraulice [103]

Tipul oțelului	Marca oțelului	Compoziția chimică în procente %					
		C	Si	Mn	Cr	Ni	alte
oțel carbon	ST3	0,14 - 0,22	0,12 - 0,3	0,4 - 0,65	-	-	-
oțel carbon	30L	0,27 - 0,35	-	-	-	-	-
slab aliat	18DGSL	0,14 - 0,20	0,6 - 0,8	1,0 - 1,3	-	-	1,2 - 1,5 Cu
slab aliat	20GSL	0,16 - 0,22	0,6 - 0,8	1,0 - 1,3	-	-	-
cu crom	25H14NL	0,22 - 0,28	0,4 - 0,7	0,3 - 0,6	12,5 - 14,5	0,5 - 0,8	-
cu crom	20H13NL	0,17 - 0,22	≤0,7	0,3 - 0,6	11,5 - 13,5	0,6 - 1,0	-
cu crom	0H12NDL	≤0,1	≤0,4	0,3 - 0,6	12,0 - 13,5	1,0 - 1,5	1,0 - 1,5 Cu
cu Cr-Ni	1H18N9T	≤0,14	≤0,9	0,8	17 - 19	8,0 - 11	0,8 Ti

24 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

Tabelul 1.5 Proprietățile mecanice ale oțelurilor pentru paletelor și rotoarele turbinelor hidraulice [103]

Marca oțelului	Starea de livrare, regim de tratament termic	Proprietățile mecanice (minime)				Duritatea HB
		R _m , [MPa]	R _{p0,2} , [MPa]	A ₅ , %	KCU, J/cm ²	
ST3	Laminat	38	25	23	-	120 - 140
30L	Turnat, normalizat 930°C, revenire 600°C	40	23	25	6	130 - 160
18DGSL	Turnat, normalizat 900°C, revenire 600°C	55	30	14	3	170 - 220
20GSL	Turnat, recopt și normalizare 900°C, revenire 600°C	52	30	14	5	156 - 197
25H14NL	Turnat, recopt 880°C, normalizare dublă 1080 - 1050°C, revenire 760°C	55	30	14	3	180 - 219
20H13NL	Turnat, recopt 880°C, normalizare dublă 1080 - 1050°C, revenire 760°C	55	30	14	3	170 - 200
0H12NDL	Turnat, revenit 670°C normalizat 950°C, revenit 670°C	65	45	14	3	270 - 255
1H18N9T	Laminat, austenitizat, călit de la 1100°C în apă	56	25	45	10	145 - 180

Studiile metalografice, efectuate de cercetătorii ruși [6], [46], [94], [112], [113] pe epruvetele decupate din zona de eroziune, arată că în straturile superficiale ale metalului au loc, practic aceleași modificări, înregistrate în cavitățile produse în laborator [13]: au loc deformările plastice, durificările (ecruisările), formarea de crăpături micro și macroscopice (Fig. 1.12), desprinderi de particule de metal.

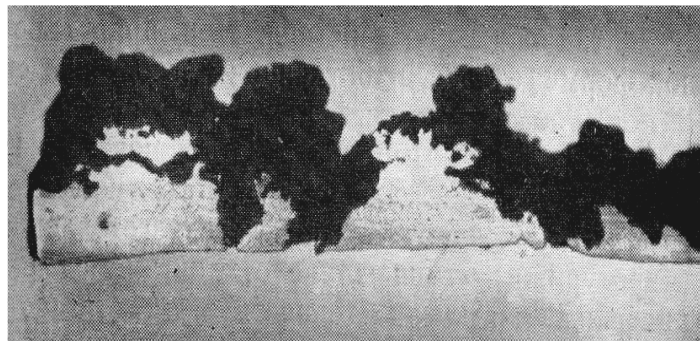


Fig. 1.11 Secțiunea transversală a paletei distrusă de cavitație [47]

1.2. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan internațional 25

Sintetizând datele despre comportarea la eroziunea cavitațională a oțelurilor centralizate în tabelul 1.4-1.5 se constată:

Oțelul 30L, a fost folosit la realizarea rotoarelor turnate monobloc, și a avut o rezistență, la coroziune prin cavitație, foarte slabă.

Oțelul ST3: a fost apreciat ca fiind cu rezistență slabă la coroziune prin cavitație.

Oțelul 18DGSL: folosit la turnarea paletelor de turbină Kaplan. A avut o rezistență comparabilă cu a oțelului ST3

Oțelul 20GSL: folosit, de asemenea la turnarea paletelor de turbină Kaplan, a fost caracterizat ca fiind tot cu rezistența scăzută la cavitație, dar ceva mai bună decât a primelor două oțeluri.

Pentru oțelurile carbon cercetătorii ruși considera ca după maxim 2 ani de funcționare, paletele și rotoarele fabricate din ele, necesitau reparații importante, motiv pentru care au fost impuse înlocuirea acestora cu oțeluri inoxidabile.

Oțelurile inoxidabile 20H13NL și 25H14NI folosite la turnarea paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice corespund cerințelor impuse, la solicitări cavitaționale de mică intensitate.

Oțelul 0H12NDL, cu o structură preponderent martensitică (74%M+26%F) folosit și la turnarea paletelor turbinelor Kaplan de la Porțile de Fier I [11], [13] și etalon pentru Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara [13], a fost și rămâne considerat ca fiind cu bună rezistență la cavitație, pentru un regim hidrodinamic de intensitate sporită.

Un alt oțel, cu calități apreciabile din punct de vedere al rezistenței la cavitație, elaborat de ruși în jurul anului 1967, pentru paletele și rotoarele turbinelor, este considerat oțelul inoxidabil **0H18N3G3D2L (T18CNMV)** [103], care are următoarea compoziție chimică: C sub 1%, Si sub 0,6%, 17,0 – 19,0% Cr, 2,3 – 3,0% Mn, 3,0 – 3,5% Ni și 1,8 – 2,2% Cu.

b. Cercetări în laborator

Cercetările de laborator prezentate în literatura de specialitate, ca și cele din România vizează aceleași obiective: cunoașterea factorilor ce influențează morfologia distrugerii structurale, corelarea proprietăților fizico-mecanice și constituției chimice cu parametrii eroziunii prin cavitație, stabilirea cauzelor ce duc la comportamente și rezistențe cavitaționale similare pentru oțeluri, în particular inoxidabile, cu constituții microstructurale diferite.

Semnificative, în acest sens, pentru stabilirea obiectivelor tezei de doctorat, privind oțelurile inoxidabile cu conținuturi constante de nichel și variabile de crom, sunt studiile efectuate, pe aparate vibratorii similare celor din Laboratorul de Cavitație din U.P. Timișoara, în următoarele laboratoare: Laboratorul Departamentului de metalurgie și ingineria materialelor de la Universitatea Politehnica din Sao Paolo [35], Laboratorul Universității din Fukui (Japonia) [58], Laboratorul Universității din Perugi (Italia) [29], Laboratorul Institutului de Cercetare a Metalelor din cadrul Academiei de Științe Chineze [147].

Cercetările efectuate de specialiștii din Universitatea din Sao Paolo, pe un grup de 8 oțeluri inoxidabile, folosind tot aparat vibrator ultrasonic, împărțite în două categorii, unul cu aproximativ 15% nichel și unul cu circa 25 % nichel, tabelul 1.6 arată că rezistența, respectiv evoluția comportamentului la atacurile cavitației depind de procentul de crom și carbon, dar și de proporția celorlalte elemente chimice de aliere, care definesc constituția microstructurală a oțelului, conform diagramei Schaffler [13], [105], [106], [107]. Rezultatele comportamentului la eroziunea cavitației sunt sintetizate în figurile 1.12-1.1.13

Tabelul 1.6 Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %)

ALIAJE	C	Ni	Cr	Si	Mn	Mo	W
Aliaj 2	1,97	14,85	35,37	1,55	1,57	3,12	1,32
Aliaj 4	1,85	15,39	24,25	1,22	1,56	3,06	1,41
Aliaj 5	1,21	24,84	35,61	1,23	1,55	3,05	1,25
aliaj 6	1,13	15,21	32,71	1,11	1,55	3,39	1,44
Aliaj 7	1,17	25,53	24,89	1,24	1,6	2,79	1,59
Aliaj 8	1,18	15,47	25,65	1,13	1,66	3,4	1,7
Aliaj 10	2,43	25,82	26,29	1,22	1,59	2,93	1,61
Aliaj 11	2,41	15,49	25,61	1,12	1,56	2,98	1,74

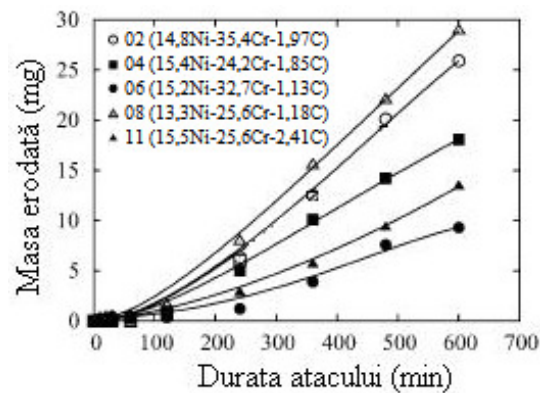


Fig. 1.12 Graficul de evoluție în timp a probelor cu 15% Ni. (Prelucrare, [35])

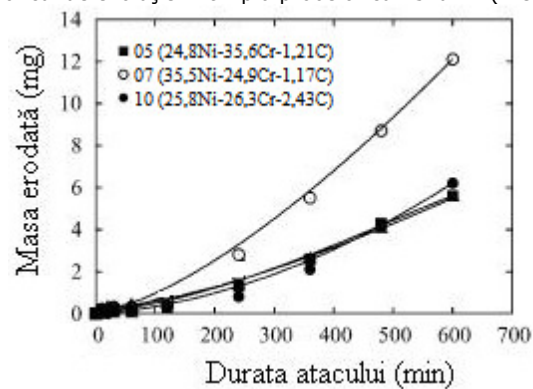


Fig. 1.13 Graficul de evoluție în timp a probelor cu 25% Ni. (Prelucrare, [35])

Cercetările realizate în laboratoarele Universității din Fukui [58] pe un aparat vibrator, care respectă norma ASTM G32 [148] pun în evidență rezistența la cavitație, similare pentru oțeluri inoxidabile cu structuri și tehnologii diferite, tabelul

1.2. Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan internațional 27

1.7, Teste au fost efectuate în apă deionizată la o temperatură de $25 \pm 2^\circ\text{C}$. Parametrii funcționali ai aparatului au fost menținuți constanți pentru toate testele.

Tabelul 1.7 Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %)

Structurile oțelurilor inoxidabile		C	Cr	Ni	Si	Mn	P	S
Laminate								
austenită	X5CrNi18-10	0,071	18,2	8,16	0,48	1,21	0,025	0,022
	X5CrNiMo17-12-2	0,08	16	10,1	0,31	1,26	0,038	0,023
ferită	X6CrAl13	0,05	13,1	0,28	0,44	0,44	0,024	0,011
martensită	X12Cr13	<0,15	13		<1	<1	0,04	0,03
	X10CrMo17	0,97	15,9	0,1	0,23	0,32	0,029	0,011
Turnate								
martensită	GX7CrNiMo12-1	0,1	12,8	1,38	0,73	0,55	0,037	0,005
	GX4CrNi3-4	0,06	13,5	4	1	1	0,04	0,04
	GX4CrNiMo16-5-1	0,04	12	3,6	0,49	0,78	0,02	0,01
austenită + ferită	X8CrNiMo27-5	0,052	23,4	5,98	1	0,67		
austenită	GX6CrNi6-9	0,07	18	8,72	1,16	0,85	0,03	0,006
	X2CrNiMo19-12	0,03	18,5	14	1,5	2	0,04	0,04

Testele de eroziune cavitațională realizate de cercetătorii italieni [29] pe două oțeluri inoxidabile, tabelul 1.8, cu structuri preponderent austenitice, în apă cu pH variabil, la temperatura camerei au avut drept scop evidențierea influenței dimensiunilor grăunților asupra rezistenței și gradului de deteriorare prin cavitație.

Tabelul 1.8 Compoziția chimică a oțelurilor studiate (Masa, %)

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

Concluzia principală este că rezistența la eroziunea cavitațională crește continuu cu scăderea dimensiunilor grăunților. De asemenea, s-a constatat că 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.

Cercetătorii chinezi [147] au realizat studii interesante privind comportarea la eroziunea cavitațională-coroziune a oțelului OCrNi15Mo acoperit superficial cu pulberi, în soluție de 0,5M NaCl și 0,5 HCl. Analiza la microscopul electronic cu baleiaj a suprafețelor distruse au dus la concluzia că rezistența la eroziunea cavitațională și coroziune a probelor tratate cu CrMnB, în soluții de NaCl, a fost de 14 ori mai mare decât a oțelului inoxidabil de bază OCr13Ni15Mo și de 5,7 ori mai mică în soluție HCl.

Prin urmare, aceste studii vin să demonstreze că se pot crea tratamente de suprafață cu diverse pulberi, care combinate cu tratamente termice adecvate pot duce la îmbunătățiri substanțiale ale rezistențelor la cavitație.

Multe dintre cercetările, începute după anul 1960 și continuate și azi [2, 8, 10-11, 14-16, 19, 20-21, 26, 34-36] urmăresc corelarea unor proprietăților mecanice (duritate, rezistența mecanică la rupere, reziliența finală) cu cel mai semnificativ parametru al eroziunii prin cavitație MDER (viteza adâncimii medii de eroziune) sau inversul acesteia $1/MDER$ (asimilat cu rezistența la cavitație). Cele mai semnificative rezultate, în acest sens, sunt date de Garcia [2, 8, 10-11] și Hammitt [2, 14-16] și Steller [2, 34-36].

Azi cercetătorii sunt orientați spre construirea de modele de evaluare și grupare a materialelor după rezistența la cavitație [41], [129] și corelarea energiei absorbite de material, în procesul cavitațional, cu parametrii semnificativi ai procesului hidrodinamic creat în stațiunea de cercetare [2, 8, 37-39].

Corelarea proprietăților mecanice și constituției chimice cu parametrul eroziunii cavitaționale, produsă în aparatul vibrator, va fi tratată în cadrul subcapitolului 1.3.2 și capitolului 4 din teză unde va fi mai dezvoltată.

1.3. Cercetarea eroziunii cavitației produsă în laborator

1.3.1. Obiective urmărite și aparatură utilizată

Cercetările realizate în laborator, privind eroziunea prin cavitație, au obiective dependente de cerințele de exploatare a echipamentelor hidromecanice. Cele mai semnificative sunt [2], [13], [41], [103]:

- identificarea de materiale cu rezistență suficient de mare la eroziunea cavitațională, materiale care să asigure o durată de exploatare cât mai mare a pieselor ce funcționează în regim de cavitație;
- stabilirea unui criteriu de ierarhizare a materialelor după rezistența la cavitație de către fiecare laborator;
- stabilirea unui material etalon, cu bună rezistență la eroziunea cavitațională, pentru fiecare stațiune;
- stabilirea tendințelor de influență a comportării cavitaționale a materialelor în funcție de tipul structurii și natura constituenților microstructurale, elementele chimice componente, proprietățile fizico-mecanice, tehnologia de elaborare, forma semifabricatului, natura și temperatura lichidului de încercare, parametrul tehnico-funcțional ai 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 instalații industriale;
- stabilirea unor criterii de similitudine în eroziunea cavitațională;
- stabilirea parametrului ce reflectă cel mai bine rezistența la eroziunea cavitațională.

Deoarece cavitația este un fenomen complex, cercetările efectuate în laboratoare se axează, de regulă, nu pe întregul fenomen al cavitației, ci pe anumite părți ale acestuia. Din acest motiv aparatele de cercetare a cavitației în laborator sunt construite în general pentru a studia fie influența cavitației asupra curgerii lichidului, fie efectele distrugerii cavitaționale asupra materialului. Principalele categorii de aparate de cercetare a cavitației în laborator sunt tunelele hidrodinamice, fig. 1.14 [92], aparatele cu disc rotitor imersat în lichid, fig. 1.15 [2] și aparatele vibratorii, fig. 1.16 [148].

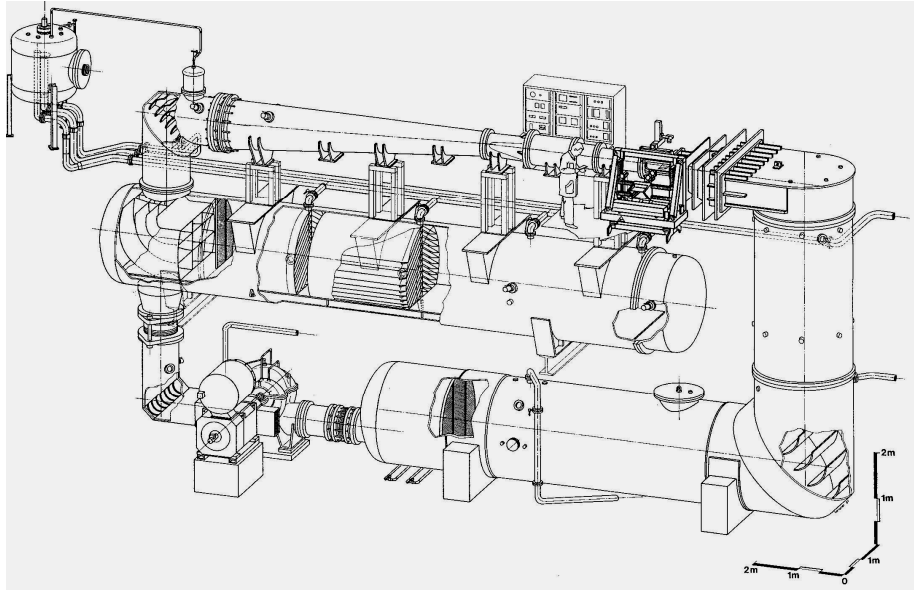


Fig.1.14 Tunelul hidrodinamic Knapp [92]

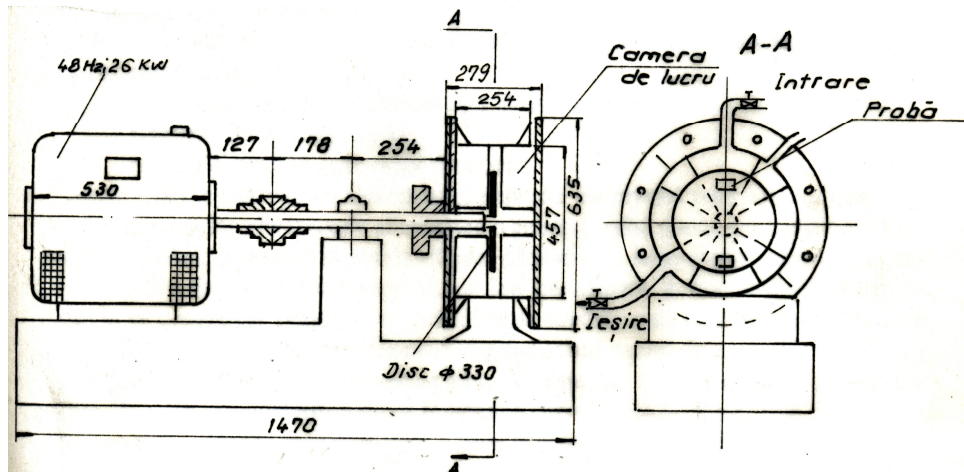


Fig.1.15 Aparatul cu disc rotitor [13]

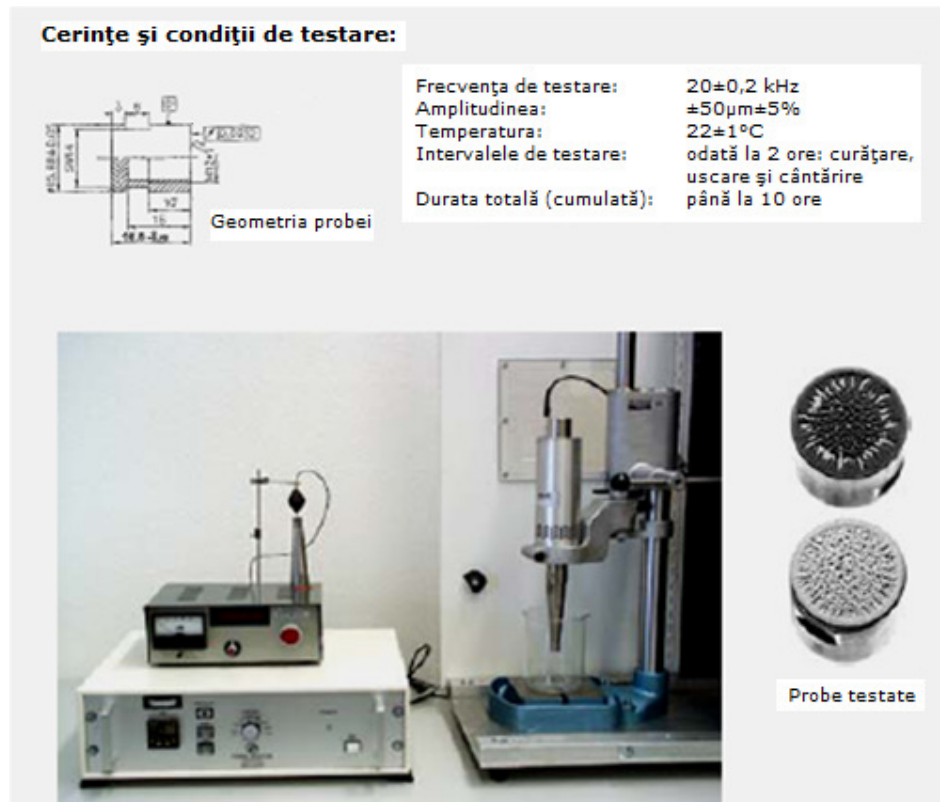


Fig.1.16 Aparatul vibrator standard [148]

Tunelele hidrodinamice sunt astfel realizate și concepute încât permit generarea unor fenomene cavitaționale similare celor din mașinile hidraulice [2], [47], [55], [56], [132], [141]. Pereții camerelor de lucru sunt transparenti și permit vizualizarea, fotografierea, filmarea și înregistrarea evoluției procesului de distrugere cavitațională. Model pentru această categorie de stațiune de laborator este tunelul hidrodinamic realizat de Knapp [92]. Utilizarea lor este costisitoare datorită duratelor foarte mari de testare pentru materiale cu rezistențe sporite la cavitație, cum sunt oțelurile inoxidabile și de tip Stellite. Aceste durate pot ajunge la sute de ore până se obțin eroziuni semnificative pentru evaluarea comportării oțelului.

Aparatele cu disc rotitor imersat în lichid simulează cel mai bine procesul cavitațional din mașinile hidraulice și elicele navale [2], [56], [67], [137], [144]. 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 [144]. În spatele orificiilor sunt montate probele de formă cilindrică a căror suprafață este distrusă prin eroziune cavitațională. Și la aceste aparate durata de testare pentru categoria oțeluri, în special pentru cele inoxidabile, este de ordinul zecilor și sutelor de ore.

1.3. Cercetarea eroziunii cavitației produsă în laborator 31

Avantajul acestor aparate este ca datorită pereților transparenti, procesul hidrodinamic poate fi filmat și fotografiat.

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 [14], [34], [51]. Aceste aparate sunt tot mai folosite, datorită intensității sporite de distrugere. Durata este de ordinul orelor pentru a produce eroziuni semnificative în cele mai rezistente materiale, cum sunt oțelurile de tip Stellite [47], [48], [53], [54], [55], [56].

Deși procesul cavitațional este diferit de cel din echipamentele industriale aparatele vibratorii sunt tot mai des folosite datorită următoarelor avantaje [2], [14], [148]:

- 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], [14],
- rezultatele obținute sunt acoperitoare pentru situațiile reale.

Aparatele vibratorii folosite în cercetarea eroziunii cavitaționale a materialelor sunt de două tipuri [2], [14], [55], [97], [136], [137]: magnetostrictive și piezoelectrice.

Cele mai uzuale aparate magnetostrictive folosesc traductoare feritice și tuburi de nichel [47], [55], [110], [137], [148]. Azi, majoritatea aparatelor cu această destinație se construiesc pentru funcționarea în domeniul ultrasonic [119] un accent tot mai ridicat punându-se pe utilizarea aparatelor vibratorii cu cristale piezoceramice datorită [1], [130], [148]:

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

Probele supuse atacului cavitațional pot fi staționare sau vibratorii (fixate de subsansamblu transductor) [47], [137], [148].

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 [1], [51], [130].

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

1.3.2. Metode de evaluare și prezicere a eroziunii produsă prin cavitație

a. Criterii de ordonarea rezistenței materialelor la eroziunea cavitațională

1. panta curbelor de pierdere masică $m(t)$ sau volumică $V(t)$, $tg\alpha$, în zona de stabilizare [2], [14], [136], [142], fig. 1.17;
2. viteza de staționare a eroziunii (de stabilizare, finală de palier) v_s [14], [121], [136], [142];
3. viteza maximă a eroziunii v_{max} [48], [55], [89], [136];
4. rezistența normalizată la cavitație R_n [14], [120], [141], [148];

32 Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea cavitațională 1

5. viteza adâncirii medii sau maxime de pătrundere a eroziunii, MDER respectiv $MDER_{max}$, sau inversul acestora, $1/MDER$ respectiv $1/MDER_{max}$, [41], [47], [54], [56], [122];
6. timpul de incubație t_i [2], [14], [53], [144], [148];
7. durata necesară obținerii unei pierderi volumice sau masice date [2], [56], [130];
8. durata necesară realizării unei anumite adâncimi de pătrundere [2], [47].

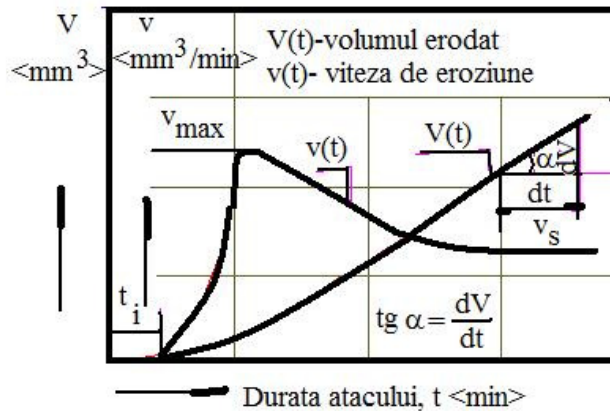


Fig. 1.17 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională.

De precizat că nici unul din parametrii menționați nu este acceptat ca unic de către cercetători, deoarece rezultatele experimentale sunt influențate de parametrii tehnico-funcționali ai stațiunii, permițând un grad de subiectivitate. Utilizarea unuia dintre parametrii menționați mai sus depinde de ce se urmărește a se pune în evidență prin cercetarea comportamentului materialului la cavitație.

În cadrul tezei se vor utiliza parametrii corespunzători criteriilor 2-5 pentru a permite discuții și evaluări de substanță ale rezistenței și comportamentului la cavitație, la oțelurilor cercetate.

b. Modele de evaluare și prezicere a eroziunii produsă prin cavitație

Modelele de evaluare și prezicere a eroziunii produsă de cavitație, dezvoltate de diverși cercetători, urmăresc corelarea unui parametru al eroziunii cavitației cu cei specifici hidrodinamicii cavitației și ai materialului cercetat. Deoarece, cercetările din cadrul tezei sunt realizate pe aparate vibratorii (magnetostrictiv cu tub de nichel Ti și piezoceramic, standard T2-aflate în dotarea Laboratorului de Cavitație, din cadrul Universității Politehnice din Timișoara), mai jos, se vor reda cele mai semnificative modele rezultate din cercetările realizate pe astfel de aparate.

Investigarea gradului și sensului de dependență al rezistenței materialelor la cavitație, în 1963, Thiruvengadam [141] definește intensitatea distrugerii cavitaționale pe baza energiei absorbite de material în timpul eroziunii:

$$I = \frac{Ea}{t \cdot Ae} = \frac{\Delta V \cdot Se}{t \cdot Ae} = i \frac{Se}{Ae} \quad (1.1)$$

1.3. Cercetarea eroziunii cavitației produsă în laborator 33

unde:

- Ea - energia absorbită de materialul erodat,
- 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 ΔV 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 [16] este prea puțin utilizată.

Printre relațiile remarcabile se află cele ale lui Hammitt [53], [54], [55], [56], care corelează parametrul $1/\text{MDER}$ cu duritatea materialului HB, indiferent de clasa de calitate, acceptată de majoritatea cercetătorilor în verificarea rezultatelor experimentale obținute, indiferent de tipul stațiunii de încercare:

$$\frac{1}{\text{MDER}} = C \cdot (\text{HB})^n \quad (1.2)$$

$$1/\text{MDER} \sim \epsilon = C_1 \cdot \text{UR} \quad (1.3)$$

unde $C = 0,734$ și $n = 1,8$. De menționat: constanta C are rolul unui parametru de scară.

Plecând de la aceste relații, Garcia [47], [48], Rao și alții [150] corelează parametrul MDER sau $1/\text{MDER}$ cu diverse proprietăți mecanice ale materialului. Însă niciuna dintre aceste relații nu duce la rezultate concludente, când testele sunt realizate în aparate cu parametrii diferiți și pe materiale din aceeași categorie, dar cu mici variații ale constituției microstructurale și compoziției chimice.

Pentru o mai bună ilustrare a relației dintre duritatea materialului și rezistența sa la eroziunea produsă prin cavitație Franc și colaboratorii [41] construiesc o diagramă (viteza de eroziune-duritatea Vickers), fig.1.18, 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 cavitație și de alți factori specifici lui (reziliența finală, rezistența mecanică la rupere, limita de curgere, microstructura, etc.), decât duritatea.

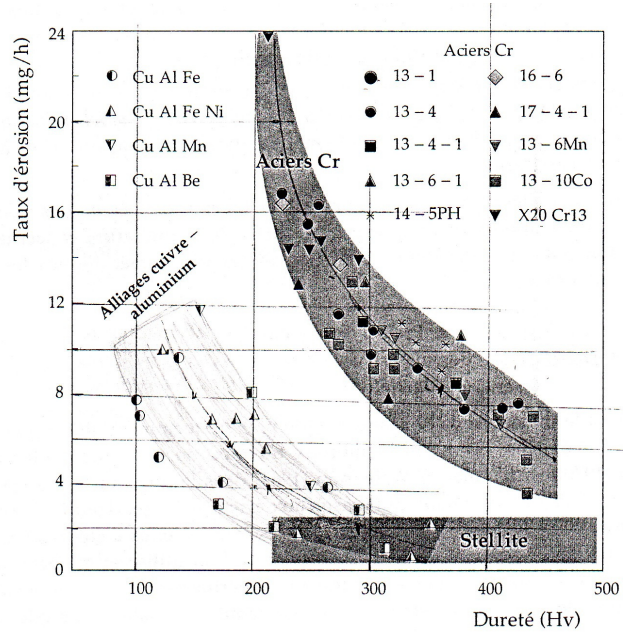


Fig.1.18 Relația dintre viteza de eroziune și duritatea HV, pentru trei categorii de materiale testate în aparat vibrator [41]

O relație interesantă, dar care poate fi îmbunătățită și extinsă la diferite categorii de oțeluri, este oferită de Sakai și Shima [129] și propusă ca efect de scară. Relația corelează rezistența la cavitație, exprimată prin $1/MDER$, cu principalele proprietăți mecanice ale materialului (reziliența finală UR, duritatea Brinell HB, limita de curgere $R_{p0.2}$ și modulul de elasticitate longitudinal E), sub forma:

$$1/MDER = A[1 - e^{-B\psi_n}] \quad (1.4)$$

Constantele A și B, obținute din prelucrarea statistică, caracterizează mediului cavitațional, tipurile de materiale și aparatele folosite în producerea cavitației.

Prin parametrul ψ_n se adimensionalizează proprietățile oțelului cercetat cu ale oțelului Stellite304 SS, etalon pentru aparatul vibrator din Michigan. Forma acestuia este:

$$\psi_n = UR_n \cdot HB_n \cdot (E_n / R_{p0.2n}) \quad (1.5)$$

unde:

$$U_n = UR / UR_{str} \quad HB_n = HB / HB_{str} \quad (1.6)$$

$$E_n = E / E_{str} \quad R_{p0.2n} = R_{p0.2} / R_{p0.2st} \quad (1.7)$$

Mărimile notate cu "st" se referă la oțelul Stellite304 SS, iar cele fără indice se referă la oțelul curent cercetat. Acest model va fi prezentat, mai detaliat, în **capitolul 4, unde se dezvoltă conceptul propus pentru evaluarea oțelurilor**

inoxidabile cercetate în Laboratorul de Cavitație din Universitatea Politehnica din Timișoara.

Un alt model de evaluare a comportării materialelor la eroziunea prin cavitație, apreciat de specialiști, este cel propus de către Steller în 1983 [136], care recomandă utilizarea durabilității cavitaționale medii:

$$\bar{\delta}_{\text{cav}} = \frac{1 + mk\tau - e^{-k\tau}}{kV\tau(m + e^{-k\tau})} \quad (1.8)$$

Recomandarea este argumentată de faptul că acest parametru caracterizează transformările interne și superficiale suferite de material în timpul distrugerii, efectele cavitației și lichidului în timpul eroziunii. În ultimul timp este abandonat și acest model datorită faptului că nu ia în considerare toți factorii ce definesc materialul; factori ce determină rezistența și comportamentul la cavitație.

O altă relație utilizată și dezvoltată de cercetători este cea prin care Steller propune legătura dintre parametrii fundamentali ai aparatului vibrator și parametrul eroziunii cavitaționale:

$$\text{MDER} \equiv A^\alpha f^\beta d^V \quad \text{cu } \alpha = 1,2 \text{ și } \beta = 0,8 \quad (1.9)$$

Această relație a fost utilizată de Bordeasu [14] în stabilirea unei legături între relația stabilită de Sakai -Shima și parametrii aparatului vibrator. Această relație va fi dezvoltată tot în **capitolul 4**.

O încercare de corelare a comportării materialului la eroziunea cavitației cu compoziția chimică este una empirică și a fost propusă de Pikinging, la studierea unei game mari de oțeluri austenitice și este prezentată de Lambert în teza sa de doctorat [98]. Forma relației este:

$$M_{D30} (\text{°C}) = 497 - 462 \cdot (C+N) - 9,2 \cdot Si - 8,1 \cdot Mn - 13,7 \cdot Cr - 20 \cdot Ni - 18,5 \cdot Mo \quad (1.10)$$

M_{D30} este temperatura la care 50% din transformarea martensitică $\gamma \Rightarrow \alpha'$ a fost realizată pentru o deformare de 30%, în timpul cavitației.

Deci, prin această relație se pune în evidență transformarea martensitică, ce are loc în timpul atacului cavitațional.

Concluzii parțiale

Analiza relațiilor de mai sus, considerate modele în evaluarea rezistenței și comportamentului materialelor la eroziunea prin cavitație arată că acestea nu cuprind în mod explicit caracteristicile materialului și parametrii hidrodinamici ai stațiunii de laborator utilizate. Ele sunt aplicabile pentru un material, cel mult pentru două materiale (vezi relațiile lui Hammitt, Steller, Sakai-Shima).

Cu excepția modelului propus de Lambert, compoziția chimică nu este reflectată deloc în relații. Este indicat să se facă un început cu evidențierea principalelor elemente chimice Cr și Ni, ce influențează substanțial comportamentul cavitațional al materialului.

Relația stabilită de Sakai și Shima poate fi substanțial îmbunătățită, la început pentru o clasă de materiale, cu introducerea microstructurii.

Relațiile lui Steller, constituie o îmbunătățire a relațiilor stabilite de Noskievič [110] și Heymann, dar nu evidențiază care este aportul caracteristicilor materialului și a parametrilor hidrodinamici la evaluarea gradului de distrugere prin eroziune.

Se impune un studiu al efectului compoziției chimice, microstructurii și caracteristicilor mecanice asupra comportamentului cavitațional, cel puțin pentru o categorie de materiale, cum este cea a oțelurilor inoxidabile.

1.4. Concluzii

Din studiile sintetizate mai sus se desprind următoarele concluzii:

1 - dintre toate echipamentele hidromecanice cele mai afectate de eroziunea cavitației sunt turbinele hidraulice de mare putere.

2 - investigarea eroziunii cavitaționale pe turbina hidraulică industrială, deși este foarte dificilă, costisitoare și necesită un timp mai mare ca urmare a operațiilor de montare și demontare, este necesară deoarece fenomenul se extinde și se manifestă foarte diferit, funcție de regimul de curgere [103], [6], [46], [94], [112];

3 - cercetarea eroziunii cavitaționale în condiții de laborator este necesară a se continua datorită multitudinii factorilor dependenți de marca de material/oțel, care-i influențează comportarea și rezistența la atacul cavitațional;

4 - pentru evaluarea și ierarhizarea oțelurilor inoxidabile după rezistența la cavitație se impune și utilizarea microfotografiilor realizate pe suprafețele degradate și în diverse secțiuni, realizate la timpi caracteristici sau la finalul atacului;

5 - oțelurile inoxidabile cu conținuturi bine corelate de Cr și Ni și $\leq 0.1\%$ C sunt recomandate în fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice, nu numai pentru rezistența la cavitație, dar și pentru capacitatea mai bună de sudare;

6 - necesitatea generării continue de noi oțeluri inoxidabile, cu constituții microstructurale și proprietăți fizico-mecanice care, prin tratamente termice adecvate, măresc rezistența la cavitație;

7 - modelele oferite la ora actuală de literatura de specialitate nu permit ordonarea materialelor și în special a oțelurilor inoxidabile folosite în fabricarea pieselor intens solicitate la cavitație; ele pot fi îmbunătățite prin introducerea în relații a compoziției chimice, sau generarea de alte corelații între proprietățile mecanice de bază.

8 - aparatele cu intensitate mare de distrugere cavitațională sunt preferate în detrimentul celor cu intensitate scăzută din următoarele motive: preț de achiziție redus, costuri de utilizare și întreținere scăzute, durata de încercare a materialului mai mică, necesită spațiu mai mic pentru instalare și utilizare.

Din punct de vedere al eroziunii cavitaționale se impune:

1 - continuarea cercetărilor, în condiții de laborator, a eroziunii prin cavitația produsă la oțelurile inoxidabile destinate fabricării mașinilor hidraulice, pentru identificarea modului în care fiecare factor caracteristic materialului și hidrodinamicii procesului, influențează comportarea acestora la cavitație;

2 - utilizarea aparatelor vibratorii, ca aparate cu cea mai mare intensitate de distrugere, care permit, într-un timp scurt, generarea de pittinguri similare celor produse de curentul cavitațional pe paleta și rotorul mașinii hidraulice;

3 - identificarea cauzelor și factorilor ce determină alura curbelor vitezelor de eroziune cavitațională și modului de distribuție al punctelor experimentale față de curbele de aproximație. Construirea unor relații adecvate pentru curbele analitice

de aproximație, astfel încât eroarea de aproximare să fie cât mai mică, iar descrierea comportării materialului cercetat, de acestea, să fie cât mai bună;

4 - utilizarea celui mai adecvat parametru al eroziunii care poate asigura cea mai bună evaluare a comportării și rezistenței la atacul cavităției

5 - continuarea cercetărilor privind crearea de relații/modele, pentru ordonarea oțelurilor inoxidabile după rezistența la eroziune cavităției creată în același aparat de testare (în particular aparate vibratorii).

1.5. Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele abordate și rezolvate în cadrul tezei sunt:

1 - cercetarea comportamentului și rezistenței la cavităție a unei game de opt oțeluri inoxidabile, cu structuri preponderent austenitice, cu conținut constant în nichel ($\approx 10\%$) și variabil în crom, destinate fabricării paletelor și rotoarelor pompelor și turbinelor hidraulice. Cele opt oțeluri sunt împărțite, după conținutul de carbon, în două grupe: una cu $\approx 0,1\%$ carbon și cealaltă cu $0,036\%$ carbon;

2 - realizarea testelor de eroziune prin cavităție în cele două aparate vibratoare cu parametri funcționali diferiți: magnetostrictiv cu tub de nichel, T1, (amplitudinea vibrațiilor = $47\ \mu\text{m}$, frecvența vibrațiilor = $7000 \pm 3\%$ Hz, diametrul probei = $14\ \text{mm}$) și standard, cu cristale piezoceramice, T2 (amplitudinea vibrațiilor = $50\ \mu\text{m}$, frecvența vibrațiilor = $20000 \pm 3\%$ Hz, diametrul probei = $15,8\ \text{mm}$), aflate în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara;

3 - analizarea influenței compoziției chimice și principalelor proprietăți mecanice (R_m , HB, $R_{p0,2}$) asupra comportării cavităționale a celor opt oțeluri inoxidabile nou construite. Această investigare aduce elemente noi față de cele prezentate de Garcia [47], [48], Hammitt [53], [54], [55], [56], și Steller [136], [137];

4 - construirea unei metode originale de ierarhizare, după rezistența la eroziunea cavităției, a oțelurilor inoxidabile cercetate în Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara. În construirea metodei, pentru rezistența la cavităție se utilizează parametrul $1/\text{MDER}$; Metoda permite clasificarea oțelurilor inoxidabile în 4 categorii de rezistență la cavităție (superrezistente, cu excelentă rezistență, foarte bună rezistență și bună rezistență).

Noutatea tezei de doctorat:

Noutatea tezei de doctorat constă în faptul că se studiază simultan efectul constituenților structurali și al principalelor elemente chimice de aliere asupra comportamentului la eroziunea produsă prin cavităție vibratoare asupra a 8 oțeluri inoxidabile, cu structură preponderent austenitică, cu conținuturi sub $0,1\%$ carbon, constant în nichel și variabil în crom. Cele 8 oțeluri sunt împărțite în două categorii: una cu aproximativ $0,1\%$ carbon și una cu aproximativ $0,036\%$ carbon. Tot odată se stabilește, o relație de corelare a parametrului de rezistență la cavităție ($1/\text{MDER}$) cu raportul constituenților structurali și principalelor elemente de aliere Cr și Ni. Această relație va permite o ordonare aproximativă, a oțelurilor inoxidabile cercetate în Laboratorul de cavitație din U.P. Timișoara, după rezistența la cavităție.

CAP. 2. CONSIDERAȚII PRIVIND PROCESUL DISTRUGERII METALELOR PRIN EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ

2.1. Generalități

Un mod sugestiv de descriere a procesului de cavitație este stabilit de Timo Koivula (Timo Koivula 2000) astfel: atunci când presiunea unui lichid scade suficient, aerul dizolvat în acesta începe să se separe de soluție. În acest proces, aerul difuzează prin peretele cavitații în interiorul acesteia. În momentul în care presiunea lichidului scade și mai mult, se atinge presiunea de vaporizare a lichidului. Când acest gen de cavitate este supusă unei creșteri a presiunii, dezvoltarea cavitațiilor este oprită și o dată cu creșterea și mai mare a presiunii cavitațiile încep să se diminueze ca dimensiune. Cavitațiile dispar datorită dizolvării aerului și a condensării vaporilor. Atunci când o cavitație este umplută în mare parte cu vapori și este supusă unei creșteri bruște de presiune, aceasta implodează violent și dă naștere unor vârfuri de presiune foarte mari [149].

Graficul din figura 2.1 prezintă, sugestiv, evoluția fenomenului cavitațional, descris de Koivula[149].

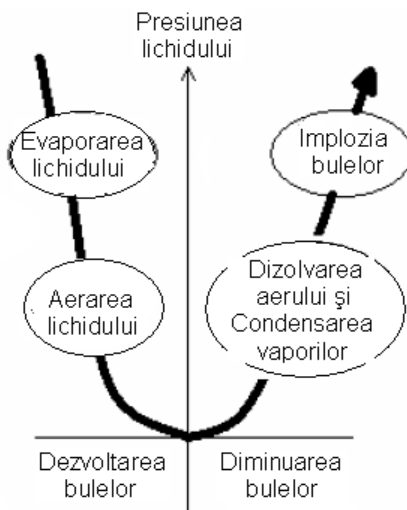


Fig. 2.1 Procesul de cavitație, după [149]

Difuzia vaporilor, difuzia termică, formarea ceții datorate condensării omogene și transferului masic termic prin pereții bulei sunt fenomene interne care influențează semnificativ procesul de cavitație. Fenomenul cavitațional poate genera schimbări importante ale microstructurii și ale nivelului de tensiuni intrinseci ale materialului. La nivel macroscopic, se constată, de multe ori, o schimbare a durtății; la nivel microscopic, apar planurile de alunecare și zonele de deformare, iar la aliajele instabile pot avea loc transformări de fază [149].

Eroziunea cavitațională reprezintă o pierdere progresivă de material din corpul solid, datorată impactului bulelor sau cavitațiilor din lichid care se surpă în vecinătatea suprafeței materialului. Eroziunea cavitațională se poate dezvolta atunci când implozia cavitațiilor este destul de violentă și are loc destul de aproape de materialul solid [149].

Eroziunea cavitațională depinde foarte mult de structura și proprietățile materialului (duritatea, rezistența mecanică la rupere și de curgere, dimensiunile grăunților, tipul constituenților microstructurali, etc.). Nivelul eroziunii cavitaționale este influențat de și de starea de tensiune indusă și rezistența la coroziune a materialului [149].

Indiferent de locul în care se manifestă, eroziunea cavitațională este un efect negativ al cavităției. Rezistența la eroziunea cavitațională a diferitelor materiale reprezintă una din preocupările oamenilor de știință, având în vedere faptul că această rezistență se manifestă diferit de la un material la altul. De asemenea, se dorește stabilirea elementelor ce influențează acest fenomen, deoarece s-a constatat faptul că rezistența la cavităție se modifică pe parcursul atacului cavitațional. Din aceste motive, analiza microstructurii materialului erodat cavitațional, considerată a fi una dintre principalele caracteristici ce influențează rezistența la eroziunea cavitațională, este o preocupare continuă a tot mai multor oameni de știință. Prin urmare, mai multe universități și laboratoare importante din lume au efectuat studii amănunțite asupra microstructurii materialelor solicitate cavitațional [13]. Printre acestea se numără laboratoarele și centrele de cercetare din: Gdansk (Polonia), Milano (Italia), Montreal (Canada), Timișoara și București (România), Grenoble (Franța), Hannover (Germania), Hiroshima (Japonia), Lausanne (Elveția) etc. Dintre cercetătorii cu rezultate notabile, în ultima perioadă, în domeniu îi putem aminti pe următorii: J. P. Franc [41] și A. Karimi [90] din Franța, R. Simoneau [133], P. Lambert [98] din Canada, F. Fujikawa și T. Akamatsu [43] din Japonia, A. Graham [52] și F.J. Heymann [64] din SUA. După publicarea rezultatelor celor menționați mai sus, tot mai mulți oameni de știință sunt atrași de studierea microstructurii materialului erodat cavitațional, concomitent cu analiza rezistenței acestuia pe baza curbelor și a parametrilor caracteristici de cavităție.

Procesul de distrugere a materialelor prin eroziunea cavitațională este unul foarte complex. Acest proces implică două fenomene fundamentale distincte, dar care se intercondiționează reciproc [2], [14]. Primul fenomen este de natură hidrodinamică și este specific fenomenului de cavităție. Al doilea fenomen este de natură fizico-mecanică, caracterizează materialul și depinde de parametrii săi specifici (proprietăți fizico-mecanice, constituție și omogenitate structurală, compoziție chimică, etc.).

Parametrii hidrodinamici caracteristici fenomenului cavitațional depind de tipul mașinii industriale și instalației de laborator. Viteza, presiunea, temperatura lichidului, turația și conținutul de aer sunt parametrii caracteristici pentru pompe și turbine hidraulice [2], [14]. În cazul elicelor navale, acești parametrii sunt viteza de înaintare, presiunea pe paletă, conținutul de gaz, temperatura și natura apei [37], [70]. La aparatele vibratorii, utilizate în studiul eroziunii cavităției în laborator, parametrii caracteristici sunt amplitudinea și frecvența vibrațiilor, temperatura și natura lichidului, diametrul probei, puterea acustică [14], [41], [47], [100].

Fenomenul de natură fizico-mecanică a eroziunii cavitaționale este puternic influențat de următorii parametrii caracteristici materialului: limita de curgere $R_{p0,2}$, rezistența mecanică la rupere R_m , modulul de elasticitate longitudinal E , alungirea A_5 , duritatea materialului, reziliența finală UR ($UR=R_m^2/2E$), energia de rupere KCU .

Practic, toate studiile realizate arată că procesul mecanic al distrugerii cavitaționale este dat de felul în care energia transmisă prin surparea bulelor cavitaționale este preluată de material.

2.2. Mecanisme ale ruperii prin eroziune cavitațională

Indiferent de tipul mașinii industriale (turbine, pompe, etc.) sau instalația de laborator utilizată [14], [41], în general, mecanismele de producere a eroziunii cavitaționale sunt aceleași. Singurul element influențat de acestea este viteza de manifestare. Fenomenul este cauzat de amplitudinea solicitării datorată impactului undă de șoc-solid, microjet-solid, care poate atinge valori de la câteva sute la mii sau zeci de mii de MPa [44], [91], timpul caracteristic de producere a fenomenului care poate fi de la 2 la 5 microsecunde [44], [54], respectiv viteza de producere a fenomenului, care variază de la 100 la 200 m/s pentru implozia bulelor de hidrogen în apă [31], până la 500 m/s în cazul imploziei unei bule de vapori [151].

În funcție de modul de distrugere a legăturilor structurale, cercetările în domeniu prezintă trei mecanisme principale de manifestare a ruperii prin eroziune cavitațională: ductilă, fragilă, prin oboseală. Ele arată că eroziunea se poate produce prin oricare dintre aceste mecanisme, sau printr-o combinație a două dintre ele, în funcție de caracteristicile materialului (structură cristalină, microstructură și proprietăți fizico-mecanice).

Figura 2.2 prezintă schematic fenomenul de cavitație. În figură se poate observa formarea bulei cavitaționale, implozia acesteia și apariția liniilor de alunecare, precum și începutul și propagarea fisurării.

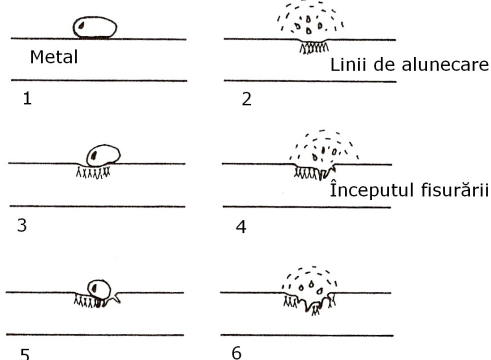


Fig. 2.2 Reprezentarea schematică a mecanismului fisurării, prelucrare după [149].

2.2.1. Influența perioadei de incubație și a vitezei de deformare

Pentru punerea în evidență a perioadei de incubație a cavitației, precum și a vitezei de deformare s-au realizat cercetări atât pe metale pure, cât și pe aliaje [127], care au permis facilitarea înțelegerii acestor aspecte. Aliajele folosite sunt rezultate din combinația mai multor metale cu structuri de cristalizare diferite (hexagonal compact, cubic cu volum centrat, cubic cu fețe centrate, etc.).

În urma unei serii de studii efectuate pe mai multe metale și aliaje, Preece și colectivul [127] au observat că, în cazul metalelor cu rețea cristalină cubică cu fețe centrate, cubică cu volum centrat și hexagonală compactă, există o relație strânsă

între perioada de incubație și mărimea grăunților. Într-unul din aceste studii, Preece și colectivul [127] au cercetat comportarea nichelului și al alamei 70-30 la atacul cavitațional, în funcție de mărimea grăunților. La nichel, autorii au constatat că alunecarea deviatoare se face ușor. La eșantioanele care au avut grăunți de dimensiuni mari (750 μm), acest fenomen a avut ca efect o repartitie a deformației în toți grăunții, lucru care favorizează concentrații de tensiuni locale ridicate și formarea de cratere la suprafața eșantionului. O altă constatare a autorilor a fost că, pentru eșantioanele la care mărimea grăunților a fost mai mare de 50 μm , deformarea macroscopică a unui număr foarte mic de grăunți a fost suficientă pentru formarea de cratere. Astfel, caracteristicile de deformare individuală a fiecărui grăunte sunt singurul factor determinant pentru rezistența la formarea acestui tip de asperități [127]. În cazul eșantioanelor la care mărimea grăunților s-a situat sub valoarea de 50 μm , Preece și colectivul [127] au constatat o creștere rapidă a rezistenței la eroziunea cavitațională proporțională cu scăderea mărimii grăunților. La aceste eșantioane, pentru a se constata producerea unor cratere asemănătoare celor constatate în cazul eșantioanelor cu grăunți de dimensiuni mari, este necesară deformarea unui număr mai mare de grăunți.

Ca și în cazul nichelului, aliajul Cu-30 Zn (alamă α), cu o rețea cubică cu fețe centrate, are un comportament dependent de mărimea grăunților, dimensiunile mici ale grăunților îmbunătățind rezistența la eroziunea cavitațională a acestui aliaj. În urma expunerii alamei α la cavitație, perturbații ale suprafeței se produc în special la îmbinarea grăunților, interiorul rămânând neted.

Un studiu efectuat de Vyas și Preece [146] pe nichel, cupru și aluminiu, arată că, pentru creșterea perioadei de incubație și reducerea vitezei de eroziune, este necesară repartizarea energiei de deformare într-un volum foarte mare, astfel încât deformația plastică în apropierea suprafeței să fie redusă cât mai mult.

În cadrul unui alt studiu, în care Preece și colectivul [127] au studiat comportarea fierului pur la cavitație, s-a constatat faptul că, la fel ca în cazul materialelor cu structură cubică cu fețe centrate, perioada de incubație crește cu scăderea dimensiunilor grăunților. În plus, odată depășită perioada de incubație, nu s-a găsit nici o legătură între mărimea grăunților și viteza de eroziune. Autorii asociază această lipsă de corelație cu mecanismul de eroziune prin clivaj, a cărui dimensiuni variază de la probă la probă, funcție de natura semifabricatului, respectiv a dimensiunii grăunților.

Rao și colectivul [128] au studiat comportarea aluminiului, a două aliaje de oțel și două de cupru în primele stadii ale cavitației. Ei au arătat că rezistența la eroziunea cavitațională este direct proporțională cu timpul de incubație (perioada în care pierderile masice sunt negliabile). Acești autori subliniază faptul că proprietățile mecanice (tensiunea limită) și proprietățile energetice (reziliența limită) au o influență semnificativă asupra perioadei de incubație.

Studiile lui Heathcock ș.a. [62] au fost efectuate pe mai multe tipuri de materiale ca fierul pur, oțeluri inoxidabile feritice, cobalt, și aliaje de nichel. Ei vorbesc în studiile lor despre materiale care au fost supuse atacurilor cavitaționale în tunele hidrodinamice, aparate cu disc rotitor și mașină industrială. Asemenea celorlalți cercetători, ei au constatat că în perioada de incubație au loc doar deformări plastice și formarea rețelelor de microfisuri, asociate fenomenului de oboseală datorat contracțiilor ciclice care se manifestă în timpul atacului cavitațional. Ei au observat că, după această perioadă, pierderile masice sunt rezultatul ruperilor ductile sau fragile prin propagarea fisurilor deja existente, simultan cu fisurarea produsă prin oboseală.

În urma cercetărilor efectuate pe oțelurile inoxidabile austenitice AISI 409, AISI 430 și aliajul simbolizat 2Cr12, Heathcock ș.a. [62] constată că slaba rezistență la eroziunea cavitațională este determinată de sensibilitatea la viteza de deformație. Ei demonstrează că viteza ridicată de deformație, tipică fenomenului de cavitație, conduce la o rupere fragilă în suprafața atacată. În același timp, ei au observat că oțelul cu cel mai mic conținut de crom a prezentat ruperea cea mai puțin fragilă dintre oțelurile testate. Binder și Spindelow au ajuns la aceleași concluzii pe care le-a expus Heathcock [62]. În plus, ei au mai arătat că efectul sinergic al prezenței cromului, în special la concentrații de 15-18%, combinat cu concentrațiile critice de azot și carbon accentuează sensibilitatea la deformație a metalelor cu structuri cubic centrate. În paralel s-a studiat și aliajul 3Cr12 a cărui compoziție este apropiată de cea a oțelului AISI 509. Aliajul a fost recopt la o temperatură de peste 750°C, tratament ce a transformat microstructura materialului într-una cu grăunți fini de ferită și martensită. Autorii au constatat o rupere, aproape în totalitate, fragilă în structura feritică a aliajului 3Cr12, în timp ce structura fină a altor aliaje le ajută pe acestea să devină tot mai ductile și mai rezistente la cavitație, cu creșterea fracțiunii volumice de martensită [62].

2.2.2. Mecanismul ruperii prin oboseală

Cel mai sugestiv model de inițiere a fisurii prin oboseală, în procesul cavitațional, este cel propus de Simoneau [133] astfel: în primă fază apar fisurile datorită unui mecanism asociat fenomenului de oboseală. Apoi are loc unirea fisurilor apărute și propagarea cristalografică a acestora în suprafața materialului sub efectul unei solicitări ciclice de forfecare. În momentul în care fisura devine suficient de adâncă, apa care pătrunde în fisură și solicitările ciclice de forfecare tind să lărgescă fisura expulzând partea de material dintre fisură și suprafața liberă, după cum se poate observa în Fig. 2.3 (poziția 6).

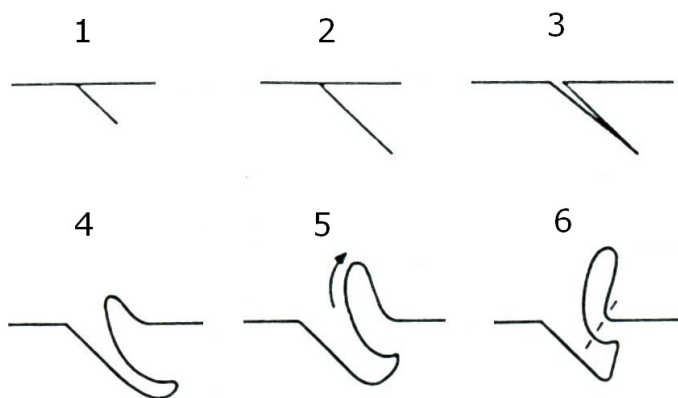


Fig. 2.3 Mecanismul de inițiere a eroziunii prin germinarea și propagarea prin oboseală a cavitației, redare după [133].

Heatcock ș.a. [61] studiind mecanismele eroziunii mai multor tipuri de materiale ca: fierul pur, oțeluri inoxidabile feritice, aliaje de nichel și cobalt, accentuează importanța divizării curbei de pierdere masică în două părți distincte, în funcție de timpul de atac cavitațional (fig. 2.4).

Prima parte a curbei corespunde perioadei de incubație. Această parte se regăsește la testele realizate în aparate cu disc rotitor și în tunele hidrodinamice, precum și în situația reală. A doua parte a curbei corespunde unor pierderi masice cu viteze relativ constante. Heatcock și colaboratorii recunosc, la fel ca restul cercetătorilor din domeniu, că pe durata perioadei de incubație au loc doar deformări plastice și formarea rețelelor de microfisuri, asociate fenomenului de oboseală datorat contracțiilor ciclice ce se manifestă pe durata atacului cavitațional. După perioada de incubație, pierderile masice cresc cu o viteză aproximativ constantă. Cauza acestor pierderi sunt ruperile ductile sau fragile provocate de propagarea fisurilor deja existente, simultan cu fisurarea produsă prin oboseala locală [151].

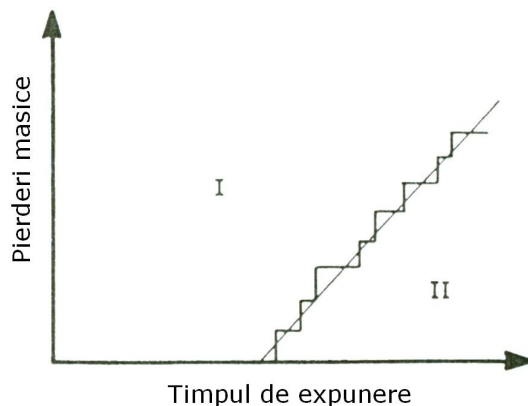


Fig. 2.4 Curba teoretică de pierdere masică în funcție de timpul de atac (redare după [39])
I – Perioada de incubație; II – Perioada de avans a eroziunii.

Aluminiul, zincul și fierul Armco au reprezentat subiectul unui studiu efectuat de Erdmann-Jesnitzer și Louis [39] în care aceștia au urmărit comportamentul cavitațional al acestor materiale. Secvența de deteriorare identificată de aceștia pentru fierul Armco și pentru aluminiu este asemănătoare cu cea expusă de Heatcock [62]. Curba teoretică de eroziune cavitațională a unui element din suprafața unui material asemănător celui considerat de Erdmann-Jesnitzer și Louis [39] este prezentat în Fig. 2.4. În plus, ei arată că oboseala materialului și formarea fisurilor, la începutul cavitației, sunt provocate de deformările plastice ale materialului. Primele expulzări de material sunt determinate de propagarea, în timp, a acestor fisuri. Acest mecanism, de producere a deformărilor, fisurilor și expulzărilor de material, se continuă pe tot parcursul atacului cavitațional. De menționat este faptul că, pe perioada atacului cavitațional apar și deformări elastice datorate forțelor de legătură intercristalină [41], însă acestea nu sunt sesizate ca și deformări plastice sau formări de fisuri.

Metalele cubice cu fețe centrate (c.f.c.) sunt izotrope și puțin sensibile la viteze de deformare [127]. Mecanismul eroziunii nichelului și alamei 70-30 prin rupere ductilă a fost analizat de Preece ș.a. [127]. Același mecanism a fost analizat

și în cazul aluminiului [39], [143], [145]. În cazul aluminiului, Erdmann și Louis [39] au remarcat deformații plastice semnificative ale suprafeței atacate, în primele faze ale cavitației. Aceste deformații provoacă, în timp, fisuri prin oboseală. Propagarea fisurilor are ca rezultat, în timp, ruperea ductilă a materialului. [151].

Studiile lui Vaidya și Preece [143] s-au concentrat pe diferite aliaje de aluminiu, dintre care și unele durificate structural, arătând că o cauză a eroziunii, prin mecanismul oboselii, o reprezintă consolidarea limitelor grăunților la suprafața materialului. Ei au constatat că aliajele de aluminiu cu un conținut redus de elemente de aliere (de exemplu Al cu 1% Cu) prezintă un mecanism al eroziunii asemănător cu cel al metalelor pure (c.f.c.), de rupere ductilă. Pierderea de material provocată de acest mod de eroziune este relativ uniformă pe toată suprafața materialului. Cei doi mai arată că, pe măsură ce crește durata de atac cavitațional, durificarea structurală rezultată duce la diminuarea adâncimii de pătrundere datorită schimbării mecanismului eroziunii, prin trecerea dintr-o rupere ductilă într-o fisurare de oboseală locală, asemănătoare celei observate la oboseala materialelor [143].

Vaidya și Preece observă că, în cazul aliajelor de aluminiu bogat aliate (ex: Al-9%Mg și AlZnMgCu), eroziunea cavitațională se produce prin propagarea fisurilor de oboseală, la scară microscopică, în toată suprafața. Ei au mai constatat o creștere a concentrațiilor amorsoare datorită densității ridicate a surselor de dislocații și a prezenței unui număr mare de precipitate, care limitează mișcarea dislocațiilor aproape de suprafața atacată. Astfel, amorsa devine suficient de mare și inițiază fisura la suprafața materialului. Simultan, fisurile apărute ca urmare a acestui fenomen sunt umplute imediat cu apă, la fiecare ciclu de deformare-tensionare, împiedicându-se închiderea lor. Așadar, după formarea fisurii, solicitarea repetată devine responsabilă de propagarea laterală, similară solicitării de oboseală.

În cazul aliajelor de aluminiu mediu aliate (ex. Al-4%Cu), Vaidya și Preece au observat că eroziunea cavitațională se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere izolate și dispersate pe toată suprafața.

Distrugerea fierului Armco este caracterizată prin deformația plastică ciclică la suprafața materialului, ca și în cazul aluminiului, fenomen ce provoacă fisurarea materialului [39]. Eroziunea suprafeței are loc atât printr-un mecanism de clivaj, cât și prin intermediul unei ruperi ductile [39], [127]. Deși fierul a fost studiat și de Preece ș.a. [127], aceștia nu au explicat mecanismul oboselii. Ei au precizat, însă, că maclarea este principala cauză a deformării materialului. Așadar, expulzarea de material este inițiată printr-un mecanism de rupere ductilă care pornește simultan la nivelul maclelor și al granițelor dintre grăunți. Autorii mai constată că formarea craterelor are loc datorită unui mecanism de clivaj. Matsumura [102] observă la rândul său această tranziție în mecanismul eroziunii fierului. El atribuie acest mecanism sensibilității fierului la viteza de deformație [127], sensibilitate atribuită structurii cubice centrate (c.c), precum și creșterii durității și fragilității datorită consolidării materialului în urma atacului cavitațional [102].

Cercetările efectuate pe diverse oțeluri și fonte, în diverse stațiuni de laborator, de către Anton [3], Bordeasu [14], Frank [40], Garcia [47], Hammitt [54] și alții, arată că oboseala apare pe tot parcursul atacului cavitațional.

2.3. Influența tratamentului de modificare a constituției microstructurale și caracteristicilor mecanice

Toate cercetările efectuate în laboratoarele de specialitate [12], [114], [49], [21], [24], [73], [84] sugerează că o creștere substanțială a rezistenței la cavitație are loc prin diverse tratamente, care duc fie la durificarea suprafeței expuse fie la creșterea caracteristicilor de rezistență mecanică din structura materialului, simultan cu creșterea gradului de finisare și omogenizare structurală Shongzhou și Herman [134] au efectuat cercetări asupra distrugerii cavitaționale a titanului pur și a aliajului bifazic după diverse tratamente de nitrurare. De asemenea, aceste materiale au fost studiate și în stări nenitrate și s-a constatat că în primă fază apare o deformație plastică, deformație ce este urmată de apariția fisurilor verticale, asimilate fisurilor de oboseală. Autorii au concluzionat că, în cazul aliajelor nenitrate, rezistența la cavitație este mai mică decât cea obținută la aliajele nitrurate. Totodată ei susțin că la aliajele ce nu au fost nitrurate eroziunea se manifestă printr-o rupere ductilă la suprafața craterelor formate, pe când la aliajele nitrurate eroziunea are loc printr-un mecanism fragil. De asemenea, cei doi cercetători sunt de părere că ruperea prin oboseală joacă un rol important doar în prima parte a procesului de cavitație.

Cercetările realizate de colectivul condus de Bordeășu [22], fig. 2.5, în Laboratorul de Cavitație al U.P. Timișoara, pe oțelul naval D-32 (supus nitrurării ionice și sablării) și 41Cr4 (supus tratamentului termic de călire în ulei) sugerează clar o creștere a rezistenței la cavitație, destul de importantă în raport cu oțelul netratat (fără durificare superficială)

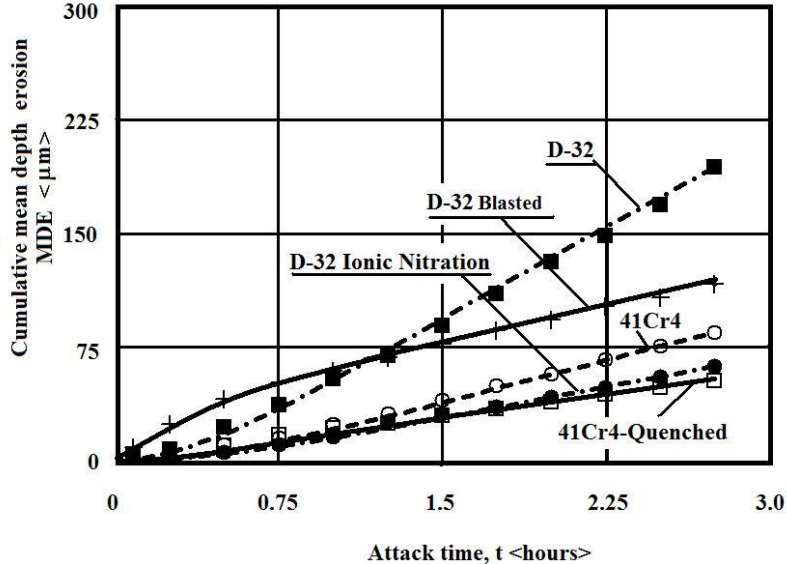


Fig.2.5 Variația adâncimii medii de eroziune cu timpul de atac al cavitației pentru două oțeluri aliate supuse unor tratamente specifice [22]

Bordeașu și colaboratorii arată că prin aceste tratamente se obțin creșteri ale rezistenței la cavitație de circa 1.8 ori prin nitrurare, circa 2,3 ori prin sablare și aproximativ 4 ori prin călire.

La concluzii similare ajung și Pădurean I [114] și dr.ing. Georgevici [49] prin cercetările realizate pe diverse oțeluri inoxidabile destinate fabricării și reparării rotoarelor și paletelor mașinilor hidraulice, supuse celor mai diverse tratamente termice aplicate la suprafața expusă atacului cavitației, respectiv pe întreaga structură a probei.

Problema principală a tratamentelor, descrise în acest subcapitol, care aduc spor de rezistență la cavitație este dimensiunea piesei, deoarece nu toate pot fi aplicate unor piese de mari dimensiuni cum sunt paletele și rotoarele pompelor și turbinelor hidraulice de mare putere.

2.4. Influența condițiilor de testare asupra începutului fisurării

Printre factorii care influențează eroziunea cavitațională se numără și mediul în care se produce fenomenul precum și tipul de solicitare ce apare în timpul procesului. În acest sens, Mustapha Ait Bassidi [109] a studiat în cadrul tezei sale de doctorat mecanismul fisurării prin oboseală și coroziune pe trei tipuri de oțeluri inoxidabile (KCR, CA 15, 304), în apă distilată, în apă potabilă și în aer. Cercetările lui Mustapha nu sunt strict legate de eroziunea prin cavitație, dar obiectivele atinse de acesta pot explica multe din fenomenele legate de eroziunea cavitațională a oțelurilor inoxidabile, mai ales cele realizate în apă distilată și în apă potabilă. Din acest motiv se va face referire la rezultatele considerate ca având impact asupra procesului de eroziune cavitațională. În urma examinărilor, autorul a observat că fisurarea în medii corosive generează striiațiuni fragile. În faza feritică a oțelului KCR 171, autorul a constatat faptul că fațetele rupturii asociate striiațiunii fragile au o orientare de tip {100}, dar și că striiațiunile evoluează cu amplitudinea intensității contracțiilor solicitării de oboseală. Astfel, pentru ciclurile de solicitare cu amplitudine redusă a contracțiilor striiațiunile au fost de natură fragilă, pentru ciclurile de solicitare cu amplitudine medie și înaltă a contracțiilor striiațiunile au fost de natură semi-fragilă, pentru ciclurile de solicitare cu amplitudine foarte mare a contracțiilor striiațiunile au fost de natură ductilă.

Cercetările lui Man ș.a. [100] și Brigham ș.a. [30], realizate pe diferite metale, i-au condus pe aceștia la concluzia că numărul de ciupituri din zona solicitată la oboseală crește odată cu creșterea temperaturii.

Rezultatele obținute de Manning ș.a. [101] pe oțelul inoxidabil 304 L bifazic (cu 5% ferită δ) arată că potențialul ciupiturii nu este influențat de rugozitate. În schimb, cercetările efectuate de aceștia asupra oțelului 304 L monofazic au arătat o descreștere monotonă a potențialului ciupirii în funcție de rugozitatea crescândă. Autorii explică acest fenomen prin faptul că, în cazul aliajului monofazic unde amorsatul ciupiturilor rezultă din disoluția incluziunilor, o rugozitate mare dezvoltă o creștere a numărului de incluziuni expuse efectului mediului [13].

Testele de ciupire (piquration) sub tensiune efectuate de Chasttel ș.a. [33] pe un oțel martensitic într-o soluție conținând 5 mol/kg de hidroxid de sodiu și 0,5 mol/kg de clorură de sodiu, contracția fiind aplicată printr-o flexiune în 4 puncte, au arătat că susceptibilitatea la ciupitură crește la tensiunile de întindere și scade la compresiuni. Astfel, autorii ajung la concluziile la care au ajuns și Stefec ș.a. [135]

și Poyet [126], concluzii conform cărora contractia are efecte notabile doar atunci când ciupiturile se amorsează la microcavitățile existente între incluziuni și matrice. Tensionările tind să deschidă aceste microcavități, favorizând astfel amorsarea ciupiturilor, în timp ce comprimările au un efect invers, tinzând să îmbunătățească rezistența la ciupituri prin închiderea microcavităților la interfața matrice-incluziuni [13].

Efectul PH-ului asupra ciupiturilor produse prin solicitarea de oboseală a fost studiat de Scott ș.a. [131]. Aceștia au observat că ciupiturile sunt favorizate de scăderea PH-ului și că în cazul în care valoarea PH-ului este mai mică decât PH-ul de depasivizare, diametrul ciupiturilor tinde să crească.

2.5. Concluzii

Distrugerea materialului prin eroziunea cavitației depinde de parametrii hidrodinamici ai procesului și de caracteristicile structurale și mecanice ale materialului.

Studiile realizate în domeniu eroziunii cavitaționale evidențiază trei mecanisme principale de manifestare a ruperii prin eroziune cavitațională: ductilă, fragilă și prin oboseală.

Cercetările efectuate de o serie de cercetători, pe mai multe metale și aliaje, au arătat că, funcție de structura cristalină a metalului/aliajului, există o relație strânsă între perioada de incubație și mărimea grăunților. Astfel, cu cât dimensiunile grăunților sunt mai mici, cu atât este mai mare perioada de incubație și rezistența la eroziunea cavitațională.

Cercetătorii din domeniu cavitației sunt de acord că pe durata perioadei de incubație au loc doar deformații plastice și formarea rețelelor de microfisuri, asociate fenomenului de oboseală datorat contracțiilor ciclice ce se manifestă pe durata atacului cavitațional. După perioada de incubație, pierderile masice cresc cu o viteză aproximativ constantă. Cauza acestor pierderi sunt ruperile ductile sau fragile provocate de propagarea fisurilor deja existente, simultan cu fisurarea produsă prin oboseala locală.

Mecanismul eroziunii cavitaționale al aliajelor poate varia în funcție ponderea elementelor de aliere. Aliajele cu un conținut redus de elemente de aliere prezintă o rupere ductilă, la aliajele bogat aliate eroziunea cavitațională se produce prin propagarea fisurilor de oboseală, la scară microscopică, în toată suprafața, iar în cazul aliajelor mediu aliate, eroziunea cavitațională se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere izolate și dispersate pe toată suprafața.

Procedeu de durificare structurală și superficială (termic, chimic, sau de altă natură), în general, aduce un spor rezistenței materialului la atacurile cavitației. Alegerea acestui procedeu depinde de dimensiunile piesei ce urmează a funcționa în regim cavitațional.

CAP. 3. CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A UNEI GAME DE OȚELURI INOXIDABILE CU CONȚINUT CONSTANT ÎN NICHEL ȘI VARIABIL ÎN CROM

În cadrul acestui capitol se prezintă și discută rezultatele cercetărilor experimentale realizate pe o gamă de opt oțeluri inoxidabile, cu microstructuri preponderent austenitice. La baza optării pentru oțeluri cu o astfel de microstructură stă dorința proiectanților și exploataților de echipamente hidromecanice, în special turbine hidraulice, de reparare, prin sudare rapidă și fără prea mari dificultăți, a zonelor degradate prin eroziunea cavitației. Cum sudarea zonelor cavitate, în toate cazurile, se face cu electrozi austenitici, a rezultat și necesitatea cercetării comportării și rezistenței la atacurile cavitației a oțelurilor cu o microstructură în care austenita este constituentul majoritar, dar în diverse proporții și în combinații cu ceilalți constituenți, specifici oțelurilor inoxidabile (martensită și ferită).

De asemenea, este cunoscut că soluțiile mai vechi de palete și rotoare de turbine hidraulice au folosit oțeluri cu un conținut de carbon de până la 2 %. În timp, datorită dificultăților create la sudare, de procentul ridicat de carbon, proiectanții și tehnologii specializați în oțeluri inoxidabile, destinate fabricării pieselor puternic solicitate la cavitație, au generat oțeluri cu un conținut sub 0,1 % C, mergând chiar și sub 0,05 % carbon [2], [13] [19], [27]. În acest sens, în cadrul tezei și al acestui capitol, se vor pune în evidență diferențele, din punct de vedere al comportării și rezistenței la cavitația produsă în aparate vibratorii, dintre oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil în crom, împărțite, după conținutul de carbon, în două grupe: una cu un conținut de circa 0,1 % C, iar alta cu un conținut de circa 0,036 % C.

3.1. Oțelurile cercetate

Oțelurile cercetate fac parte din categoria oțelurilor inoxidabile, destinate turnării paletelor și rotoarelor de pompe și turbine hidraulice ce funcționează în condiții de cavitație intensă. Semifabricatele lor au fost obținute prin turnare după rețete stabilite de specialiștii de la Centrul de Expertizări Materiale Speciale, al Universității Politehnica din București și de la SC. Prod SRL din București, în urma discuțiilor privind scopul și perspectiva utilizării acestora și propuse de specialiștii de la U.P Timișoara.

După mai mult discuții specialiștii în metalurgie, pe baza actualelor tendințe, de fabricație a unor palete și rotoare, din oțeluri inoxidabile, cu conținut de austenită, ca element microstructural majoritar, s-au decis compozițiile chimice și realizarea a două grupe de oțeluri, în care nichelul să fie în proporție de circa 10 %, iar cromul variabil. Astfel s-au realizat 8 semifabricate împărțite, după conținutul în carbon, în două grupe: 4 cu $\approx 0,1\%$ carbon, $\approx 10\%$ nichel și variabil de crom ($\approx 6\%$; $\approx 10\%$; $\approx 18\%$; $\approx 24\%$) și 4 cu $\approx 0,036\%$ carbon, $\approx 10\%$ nichel și variabil de crom ($\approx 13\%$; $\approx 14\%$; $\approx 16\%$; $\approx 18\%$). Semifabricatele, de formă cilindrică, cu diametrul de

3.1. Oțelurile cercetate 49

aproximativ 30 mm și lungime de aproximativ 170 mm, au fost turnate 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.

Din fiecare semifabricat au fost prelevate probe pentru determinarea compoziției chimice, tabelul 3.2 și analiza metalografică, cu evidențierea constituției microstructurale, fig.3.6, care a stat la baza stabilirii tratamentului termic de călire de punere în soluție. 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°C cu răcire în aer (pentru cele cu conținut de martensită), respectiv în apă (pentru cele care cu structuri de austenită, sau austenită și ferită). Astfel pregătite, semifabricatele au servit la realizarea probelor pentru încercări mecanice, teste cavitaționale și alte analize metalografice.

Cum oțelurile cercetate nu sunt mărci standardizate, pentru simplificarea identificării s-a conceput o notație, Tabelul 3.1, în a cărei structură intră:

- simbolul elementului chimic de bază Ni, urmat de cifra 10, care reprezintă valoarea aproximativă (în procente), aceeași pentru toate cele opt oțeluri;
- simbolul elementul chimic variabil Cr, ce asigură natura de oțel inoxidabil, urmat de cifra sau grupul de cifre, ce reprezintă conținutul său, în procente, aproximativ;
- litera C, simbolul chimic al carbonului, urmată de cifra 1 sau grupul de cifre 036, care reprezintă conținutul său în compoziția chimică (0,1 % sau 0,036 %);
- simbolul T1 (pentru oțelurile testate în aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel), sau T2 (pentru oțelurile testate în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice).

Tabelul 3.1 Notarea probelor studiate

Notația	Nichel ≈ [%]	Crom ≈ [%]	≈ Carbon ≈ [%]	Aparatul de încercare
Ni10Cr6C1T1	10	6	0,1	T1
Ni10Cr10C1T1	10	10	0,1	T1
Ni10Cr18C1T1	10	18	0,1	T1
Ni10Cr24C1T1	10	24	0,1	T1
Ni10Cr13C036T1	10	13	0,036	T1
Ni10Cr14C036T1	10	14	0,036	T1
Ni10Cr16C036T1	10	16	0,036	T1
Ni10Cr18C036T1	10	18	0,036	T1
Ni10Cr6C1T2	10	6	0,1	T2
Ni10Cr10C1T2	10	10	0,1	T2
Ni10Cr18C1T2	10	18	0,1	T2
Ni10Cr24C1T2	10	24	0,1	T2
Ni10Cr13C036T2	10	13	0,036	T2
Ni10Cr14C036T2	10	14	0,036	T2
Ni10Cr16C036T2	10	16	0,036	T2
Ni10Cr18C036T2	10	18	0,036	T2

Compoziția chimică (Tabelul 3.2) 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

50 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

de Raze X (LISEOFRX), din cadrul Centrului de Expertizare a Materialelor Speciale din Universitatea Politehnica București.

Tabelul 3.2 Compoziția chimică a oțelurilor cercetate [%]

Simbolul oțelului	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	0,119	1,45	3,06	0,013	0,018	6,48	10,06
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	0,115	1,72	2,620	0,016	0,012	10,620	10,080
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	0,097	1,55	2,45	0,015	0,018	17,91	9,97
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	0,118	2,32	2,890	0,013	0,007	23,860	10,090
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	0,036	0,201	0,489	0,006	0,017	12,705	10,105
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	0,036	0,357	0,548	0,005	0,016	14,208	10,105
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	0,036	0,689	0,591	0,009	0,015	16,515	10,105
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	0,036	0,689	0,591	0,010	0,016	18,275	10,105

Tabelul 3.2 Compoziția chimică a oțelurilor cercetate [%] (Continuare)

Simbolul oțelului	Mo	Al	Cu	Co	Ti	Nb	V
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	0,095	1,12	0,057	0,026	0,83	0,004	0,345
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	0,037	1,190	0,032	0,028	0,017	0,040	0,043
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	0,1	0,67	0,168	0,066	0,64	0,035	0,069
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	0,038	1,180	0,050	0,052	0,850	0,041	0,071
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	0,039	0,061	0,184	0,049	0,002	0,013	0,009
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	0,105	0,008	0,156	0,069	0,005	0,031	0,023
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	0,106	0,027	0,165	0,069	0,012	0,019	0,025
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	0,049	0,025	0,012	0,055	0,010	0,020	0,024

3.1 Oțelurile cercetate 51

Tabelul 3.2 Compoziția chimică a oțelurilor cercetate [%] (Continuare)

Simbolul oțelului	W	Pb	B	Sb	Sn	As
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	0,007	0,0280	0,0037	0,1200	0,0670	0,0670
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	0,007	0,0056	0,0045	0,1200	0,0073	0,0190
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	0,037	0,0037	0,0026	0,1200	0,0083	0,0230
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	0,007	0,0022	0,0013	0,0390	0,0044	0,0200
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	0,083	-	0,0000	-	-	0,0080
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	0,090	-	0,0200	-	-	0,026
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	0,084	-	0,0010	-	-	0,0260
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	0,174	-	0,0000	-	-	0,025

Tabelul 3.2 Compoziția chimică a oțelurilor cercetate [%] (Continuare)

Simbolul oțelului	Bi	Ta	Ca	Se	N	Fe
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	0,0060	0,0790	0,0036	0,0056	0,0280	75,9081
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	0,0010	0,0015	0,0015	0,0500	0,0380	73,1746
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	0,0010	0,0100	0,0006	0,0490	0,0410	65,9458
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	0,0010	0,0100	0,0010	0,0360	0,0800	58,2180
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	-	-	-	-	-	75,9930
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	-	-	-	-	-	74,1920
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	-	-	-	-	-	71,5060
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	-	-	-	-	-	69,8836

Determinarea densităților, celor opt oțeluri cercetate (Tabelul 3.3), s-a făcut analitic, pe baza compoziției chimice, cu relația:

$$\rho = \sum (A_i \cdot B_i) \quad (3.1)$$

unde: i – elementul chimic aflat în compoziția oțelului;

A – densitatea elementului chimic „i”;

B – ponderea de element chimic „i” din compoziția oțelului.

Tabelul 3.3 Densitatea oțelurilor încercate

Simbolul oțelului	Densitatea, [kg/m³]
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	7722,68
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	7711,88
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	7682,26
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	7560,09
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	7869,79
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	7852,96
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	7817,93
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	7814,21

Elaborarea oțelurilor inoxidabile experimentale s-a realizat în cadrul S.C. Zirom S.A., din Giurgiu cu ajutorul Cuptorului de topire în vid cu flux de electroni EMO 1200 R (Fig. 3.1).



Fig. 3.1 Cuptorul 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:

- Blocul tun KEN 1200/50
- Liftul de capac
- Dispozitivul de pivotare a pupitrului de comandă

- Vizorul 80 x 40°
- Instalația de vid pentru recipient
- Instalația de vid pentru tun electronic
- Cristalizatorul Φ 500 cu dispozitiv de extracție Φ 500
- Cristalizatorul Φ 420 cu dispozitiv de extracție Φ 420
- Supraveghetorul de apă
- Instalația de înaltă tensiune
- Instalația de joasă tensiune pentru instalația de vid
- Dispozitivul de ghidaj al fasciculului
- Camera de topire
- Trapa de vapori
- Deflectorul de picături
- Căruciorul port-capac
- Dispozitivul de șarjare, dreapta-stânga
- Construcția metalică
- AMC pentru circuitul de apă
- Instalația de joasă tensiune
- Instalația 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.

Caracteristicile tehnice ale cuptorului EMO 1200 R sunt:

- | | |
|---|----------------------|
| a) Tipul cuptorului | EMO 1200 R |
| - Puterea nominală (puterea fasciculului generat de tunul de electroni) | 1200 KW |
| - Domeniul de reglare a puterii fasciculului (reglare continuă) | 100 ÷ 1200 KW |
| - Tensiunea de accelerare | ≤ 50 KVcc |
| - Intensitatea fasciculei | ≤ 27 A la 45 KV |
| - Tensiune de racord (tensiune medie) | 3 N 6 KV, 50 Hz |
| - Puterea de racord | 1600 KVA |
| - Tensiunea de racord (tensiune joasă) | 3 N, 380 V, 50 Hz |
| - Puterea de racord | ~ 400 KVA |
| b) Dimensiunile de gabarit | |
| - Lungimea maximă 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: Lingou de oțel inoxidabil | |
| - Diametrul | ≤ 500 mm |
| - Lungimea maxim posibilă | ≤ 3000 mm |
| e) Capacitatea de topire | ~ 400 Kg/h |
| f) Consumul specific de energie | ~ 2 Kw/h/Kg |
| g) Vid | |
| - Vid final realizabil cu instalația curată | $3 \cdot 10^{-2}$ Pa |

54 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

- Vid în sistemul catodic	$3 \cdot 10^{-2}$ Pa
Capacitate nominală a pompelor de vid înaintat pentru aer:	
- Recipientul (la 10^{-2} Pa)	6 x 50 Kl/s
- Tunul electronic ($10^{-1} \div 10^{-3}$ Pa)	3 x 3 Kl/s
Rata de scurgere:	
- Recipientul	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	$\leq 28^{\circ}$ C
- Presiunea	0,4 \div 0,6 MPa
- Necesarul de apă caldă	~ 300 l/min.
- Temperatura la intrare	50° \div 60° C
i) Calitatea apei	apă curată
Particulele filtrabile:	
- Dimensiunea	≤ 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

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

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.

Materialul supus topirii (deșeurile de titan) sunt încărcate manual în două instalații de șarjare dotate cu jgheaburi vibratoare ce asigură înaintarea materialului spre cristalizator. Materialul de topire se introduce simultan sau pe rând din două jgheaburi de șarjare opuse unul față de celălalt, în spațiul de acțiune a fasciculului de electroni (cristalizator). Întreruperea procesului de topire poate conduce la formarea unor defecte în bloc. Energia fasciculului de electroni este repartizată asupra băii topite astfel încât să se mențină la o valoare constantă adâncimea dorită a 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 lingoului.

Tratamentele termice aplicate oțelurilor inoxidabile au fost realizate cu ajutorul cuptorului UTTIS din cadrul Universității Politehnica București.

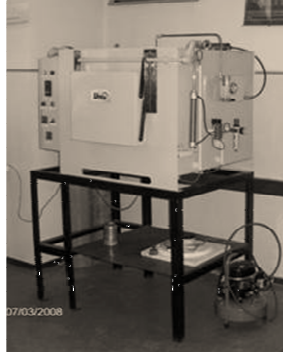


Fig. 3.2 Cuptorul de tratamente termice cu atmosferă controlată UTTIS. Temperatura maximă de lucru: 1150 °C. Încărcarea maxima: 50 kg. Programare digitală. Atmosfera: amestec de gaz inert și hexafluorură de sulf la o presiune de 5-10 mbar

Tratamentul s-a aplicat pentru a corecta unele defecte provenite de la prelucrări anterioare (turnare, deformare plastică) și pentru a pregăti semifabricatele pentru prelucrările ulterioare.

Pentru probele din oțel inoxidabil s-a aplicat tratamentul termic de recoacere pentru omogenizare.

Structura pieselor turnate din materiale metalice s-a caracterizat printr-o puternică neomogenitate chimică (segregație), care se datorează faptului că răcirea a avut loc cu viteză mare iar procesele de difuziune nu au avut timp să se producă.

Ciclogramele de tratament termic pentru oțelurile austenitice, respectiv martensitice sunt redată în Fig.3.3 și 3.4.

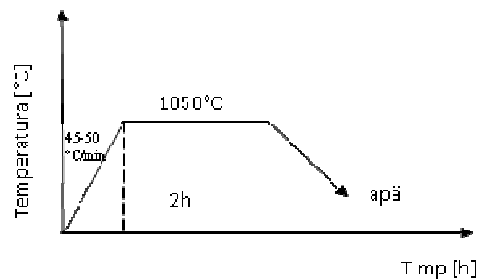


Fig. 3.3 Tratamentul de călire de punere în soluție pentru oțelurile austenitice

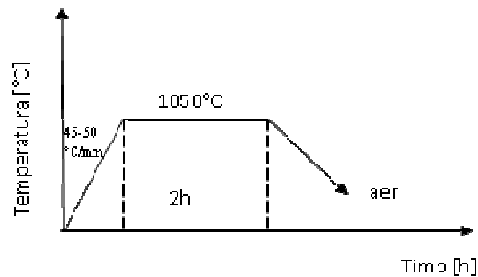


Fig. 3.4 Tratamentul de călire de punere în soluție pentru oțelurile martensitice

Determinarea caracteristicilor de rezistență mecanică (rezistența la rupere R_m , limita de curgere $R_{p0,2}$, alungirea la rupere A_5 , gătuirea Z) testele de eroziune a cavitației au fost realizate pe câte trei probe. Duritatea suprafețelor, expuse la atacul cavitației, a fost determinată ca o medie a trei măsurători realizate în trei puncte diferite din suprafață.

Toate determinările de caracteristici mecanice au fost realizate în cadrul laboratorului CEMS al Universității Politehnica din București. Duritatea s-a determinat în Laboratoarele de Rezistență Materialelor și Știința Materialelor ale Universității Politehnica din Timișoara. Valorile acestora sunt prezentate în Tabelul 3.4.

Tabelul 3.4 Proprietățile mecanice ale oțelurilor încercate

Simbolul oțelului	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	HRC	Z [%]	A_5 [%]
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	1550	1120	48,3	26,7	7
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	1450	1020	45	25,8	7,3
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	1335	934	38	29,7	8,6
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	1280	901	30	28,5	8,4
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	856	618	26,5	29,4	10
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	341	240	35,2	35,2	18
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	996	700	30,9	28,5	8,5
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	527	369	38,3	38,3	15

Microstructura oțelurilor a fost stabilită pe baza diagramei Schöffler, fig.3.5, folosind conținuturile de crom echivalent (Cr_e) și nichel echivalent (Ni_e), calculate cu relația:

$$Cr_e = \%Cr + 1,5 \cdot \%Si + \%Mo + 0,5 \cdot (\%Ta + \%Nb) + 2 \cdot \%Ti + \%W + \%V + \%Al \quad (3.2)$$

$$Ni_e = \%Ni + 30 \cdot \%C + 0,5 \cdot \%Mn + 0,5 \cdot \%Co$$

În tabelul 3.5 sunt afișate constituțiile microstructurale cu proporțiile aproximative ale constituenților rezultați din diagrama Schöffler.

Tabelul 3.5 Conținuturile de crom echivalent și nichel echivalent.
Constituția microstructurală a oțelurilor cercetate

Simbolul oțelului	Cr _e [%]	Ni _e [%]	≈ Martensită [%]	≈ Austenită [%]	≈ Ferită [%]
Ni10Cr6C1T1 Ni10Cr6C1T2	11,924	15,173	32	68	-
Ni10Cr10C1T1 Ni10Cr10C1T2	14,919	14,854	-	100	-
Ni10Cr18C1T1 Ni10Cr18C1T2	22,414	14,138	-	98	2
Ni10Cr24C1T1 Ni10Cr24C1T2	30,362	15,101	-	81	19
Ni10Cr13C036T1 Ni10Cr13C036T2	13,209	11,454	55	45	-
Ni10Cr14C036T1 Ni10Cr14C036T2	15,022	11,4935	30	70	-
Ni10Cr16C036T1 Ni10Cr16C036T2	17,824	11,515	-	100	-
Ni10Cr18C036T1 Ni10Cr18C036T2	19,610	11,508	-	93	7

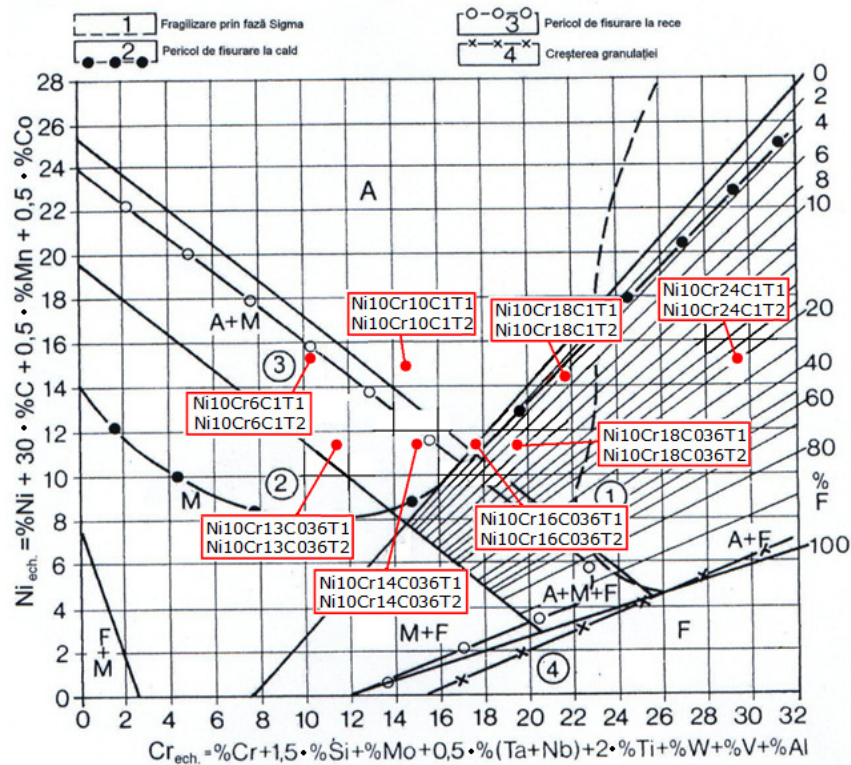


Fig. 3.5 Diagrama Schäffler [3]

58 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

După cum s-a precizat anterior, după turnarea semifabricatelor și înainte de începerea testelor mecanice și de cavitație s-au realizat analize de microstructură, pentru toate cele opt oțeluri. În imaginile din figura 3.6 se pot observa constituțiile microstructurale, care confirmă cele stabilite prin diagrama Schöffler, fig.3.5. La fiecare imagine este precizat tipul atacului metalografic folosit pentru fiecare tip de oțel și microstructura rezultată din diagrama Schöffler.

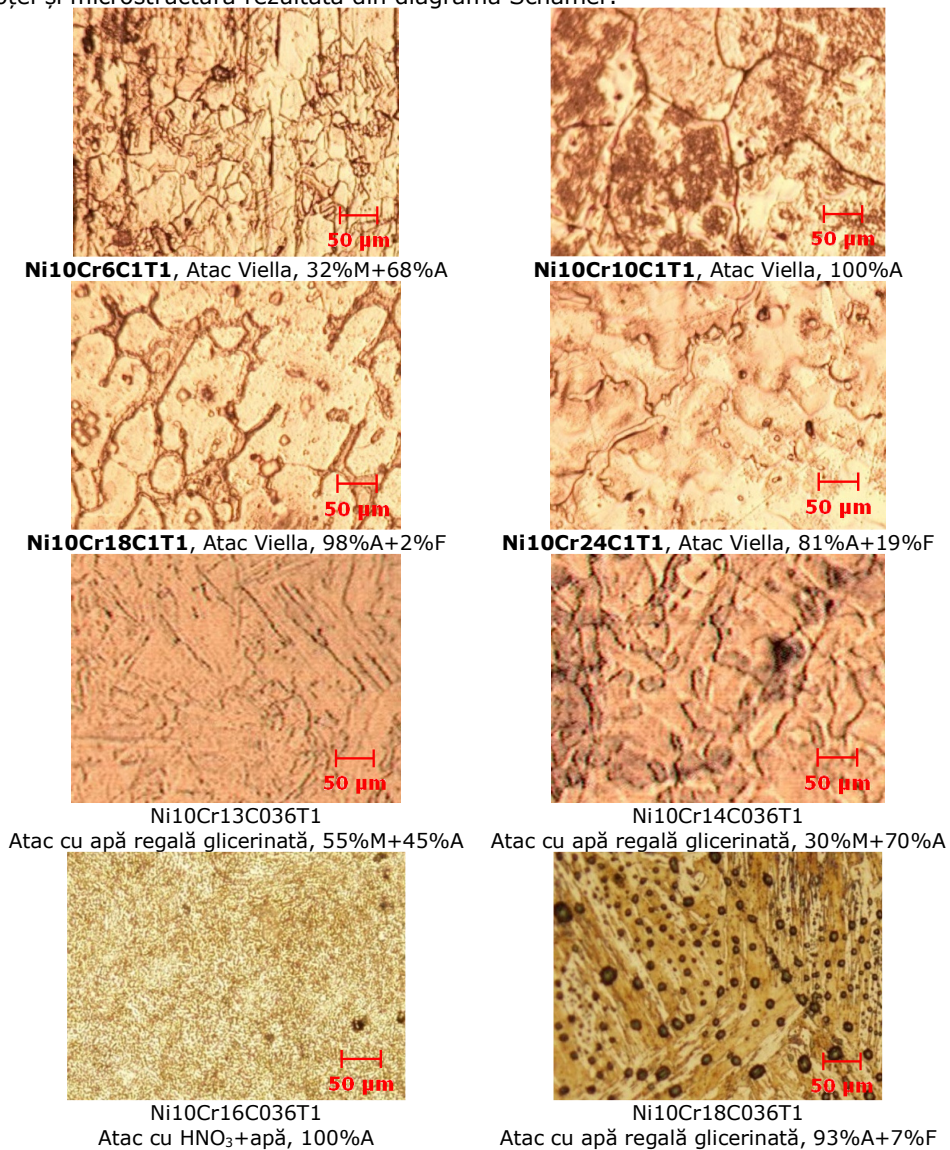


Fig. 3.6 Microstructura oțelurilor cercetate (500x).

Legendă: M – martensită, A – austenită, F- ferită

Precizare: Pentru evaluarea comportamentului și rezistenței la atacul cavitației ultrasonice, pe baza curbelor caracteristice și a parametrilor specifici, recomandați de normele ASTM G32-2010 [148], utilizați în Laboratorul de Cavitație, din cadrul U.P. Timișoara, sunt folosite ca oțeluri de comparație 41Cr4 (oțelul etalon pentru Laboratorul de Cavitație) și OH12NDL (oțelul etalon pentru paletetele și rotoarele turbinelor hidraulice, aflate în exploatare la noi în țară, în special la Porțile de Fier I și II). Ambele oțeluri sunt apreciate ca fiind cu bună rezistență la cavitația ultrasonică, produsă în aparatele vibratorii, aflate în Laboratorul de Cavitație [13], [96], [108], [19], [27].

3.2. Testarea la cavitație vibratorie

3.2.1. Aparatura și metoda de testare

Aparatura folosită pe parcursul cercetărilor cuprinde atât aparatele vibratorii, pe care s-au efectuat testele de cavitație, cât și aparatele folosite pentru efectuarea măsurărilor.

Pentru producerea eroziunii prin cavitație ultrasonică au fost utilizate aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1 și aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, construit după normele ASTM G32-2010.

Aparatul T1 (Fig. 3.7), construit de I. Potencz [2], [13], a fost performant, de colectivul condus de prof. dr. ing. Ilare Bordeasu, din care am făcut și eu parte, prin folosirea unor componente electronice performante. Parametrii funcționali ai aparatului sunt:

- puterea: 500 W;
- frecvența vibrațiilor: $7000 \pm 3\%$ Hz;
- amplitudinea dublă vibrațiilor: 90 μm ;
- diametrul probei: 14 mm;
- tensiunea de alimentare: 220 V/50 Hz;
- mediul lichid (orice natură);
- temperatura lichidului, pe perioada testelor de cavitație: $22 \pm 1^{\circ}$ C;

Mediul de lucru folosit ca lichid pentru cavitație a fost apa potabilă de la rețea, pe considerentul că este apropiată chimic de mediul hidraulic în care funcționează pompele și turbinele hidraulice.

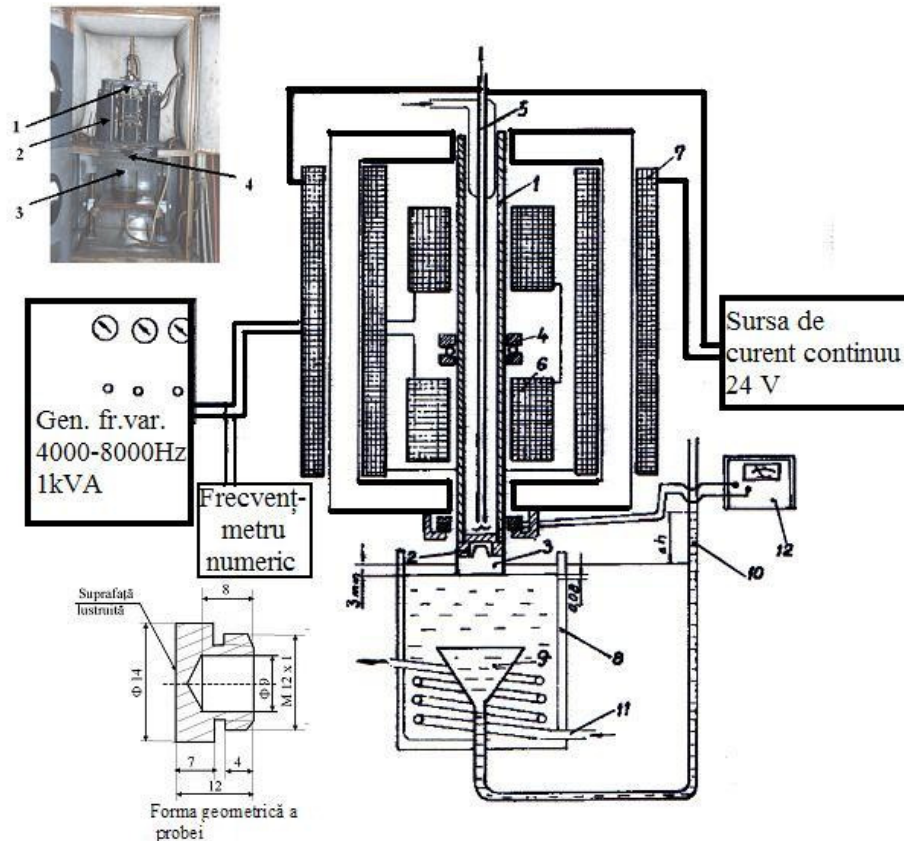


Fig. 3.7 Aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1

1- tubul de nichel; 2 - piesa - fixare probă; 3 - proba; 4 - sistemul inelar fixare tub nichel; 5 - sistemul răcire tub nichel; 6 - bobinele de curent alternativ; 7 - bobinele de curent continuu; 8 - vasul cu lichid de lucru; 9 - pâlnia de captare a undei sonice; 10 - piezometrul; 11 - serpentina de răcire; 12 - aparatul electric (voltampermetrul)

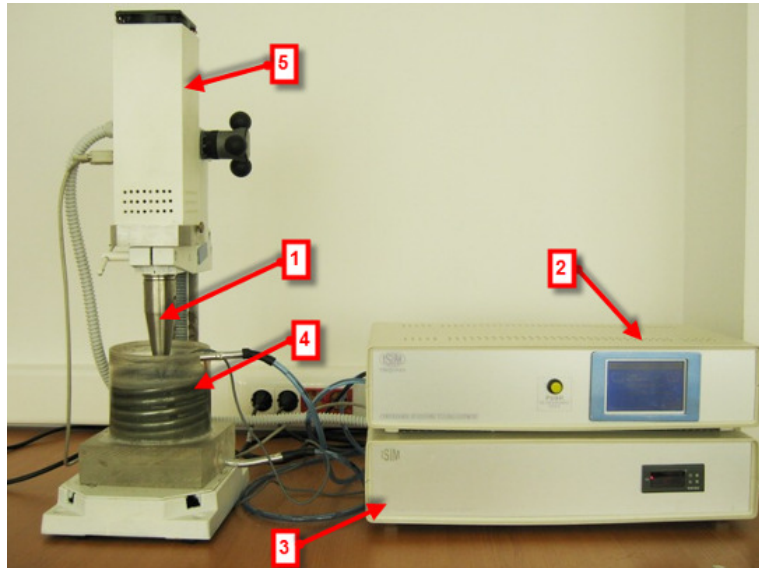
Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, prezentat în Fig. 3.8, este construit după cerințele normelor ASTM G32-10 [148].

Parametrii funcționali ai aparatului:

- puterea 500 W
- frecvența vibrații 20 kHz
- amplitudinea vibrații 50 μm
- diametrul probei 15,8 mm
- tensiunea de alimentare 220 V/50 Hz
- mediul lichid (orice natură);
- temperatura lichidului, pe perioada testelor de cavitație: $22 \pm 1^\circ \text{C}$;

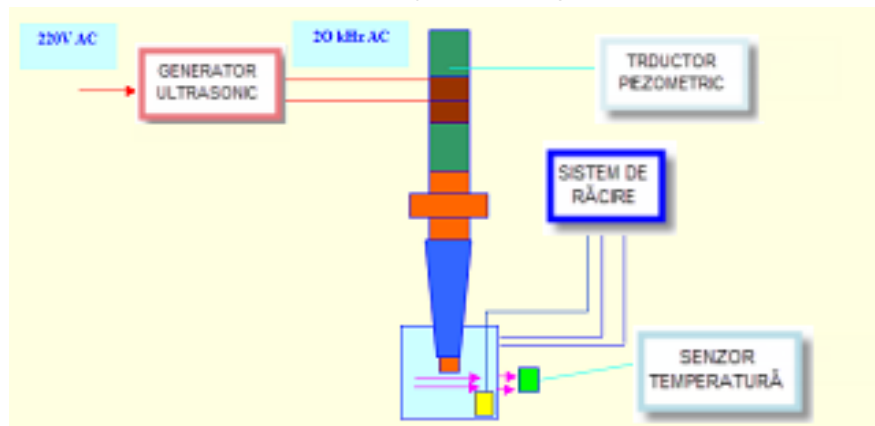
Testarea celor opt oțeluri inoxidabile, în ambele aparate, s-a făcut în apă dublu distilată, iar temperatura acestora a fost păstrată permanent la valoarea de $22 \pm 1^\circ \text{C}$.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 61



imaginea de ansamblu

1-sonotroda, 2-generatorul electronic de ultrasunete, 3-regulatorul de temperatură a apei, 4-vasul cu lichid și serpentina de răcire, 5-sistemul de ventilație (răcire a transductorului cu cristale piezoceramice)



b) schema funcțională

Fig. 3.8 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, standard

Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice oferă posibilitatea schimbării sonotrodei. Vârful acesteia poate fi cu filet interior sau cu filet exterior. În fig. 3.9a prezintă forma geometrică a probei pentru sonotroda cu filet exterior, iar Figura 3.9b prezintă forma geometrică a probei pentru sonotroda cu filet interior.

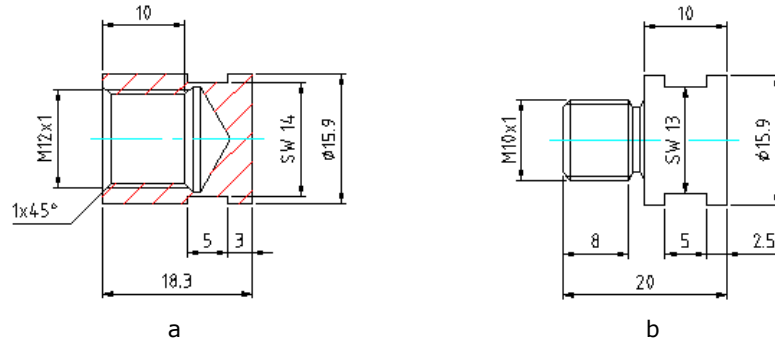
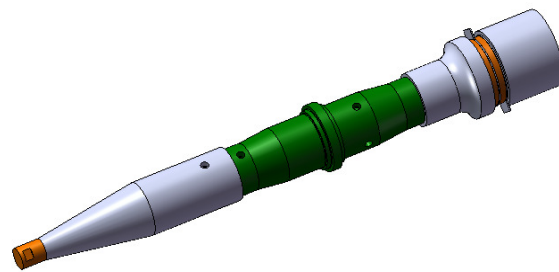


Fig. 3.9 Forma geometrică a probei: a) probă cu filet interior, b) probă cu filet exterior

În fig. 3.10 sunt prezentate elementele componente ale sistemului mecanic vibrator al aparatului T2.



Ansamblul sistem mecanic vibrator

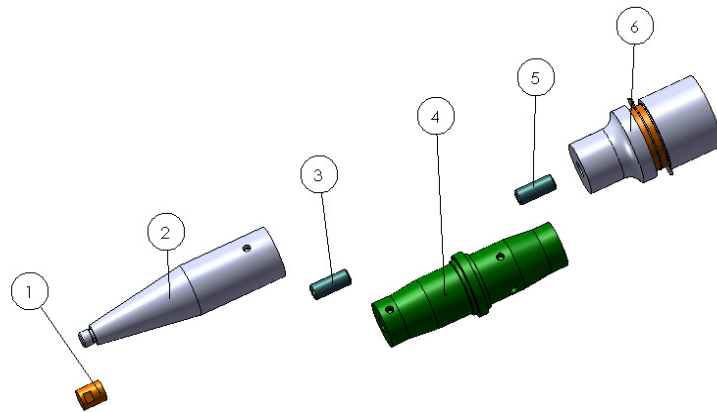


Fig. 3.10 Elementele componente ale sistemului mecanic vibrator:
 1 – epruveta pentru testare; 2 - sonotroda din titan gr.2; 3 - niplu sau prezonul de interconectare mecanică; 4 - amplificatorul intermediar de undă – booster (factor de amplificare 1:1); 5 - niplu sau prezon de interconectare mecanică; 6 - transductorul piezoceramic

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 63

Determinarea maselor pierdute prin eroziunea cavitației, în perioadele specifice de atac, a fost realizată prin cântărirea probelor la o balanță analitică marca Zařklady Mechaniki Precyzyjnej (fig. 3.11), modelul WP-11, aflată în dotarea laboratorului. Masa maximă ce poate fi cântărită cu această balanță este de 100 de grame. Precizia balanței este de 5 zecimale semnificative (până la 0,00001 grame).



Fig. 3.11 Balanța analitică

Încercările la eroziune cavitațională, conform procedurii impuse în cadrul Laboratorului de Cavitație al U.P. Timișoara și prevederilor normelor ASTM G32, sunt întrerupte la intervale regulate de timp în vederea examinării suprafețelor atacate cavitațional. Examinarea acestora se face cu ajutorul microscopului optic (fig. 3.12) și pe baza microfotografiilor realizate cu aparatul de fotografiat (Canon). 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 conectarea la calculator, ceea ce permite realizarea unor imagini de tipul celei prezentate în fig. 3.13 (mărire 10x), care permite o profundă analiză a evoluției distrugerii suprafeței expuse atacului cavitației.

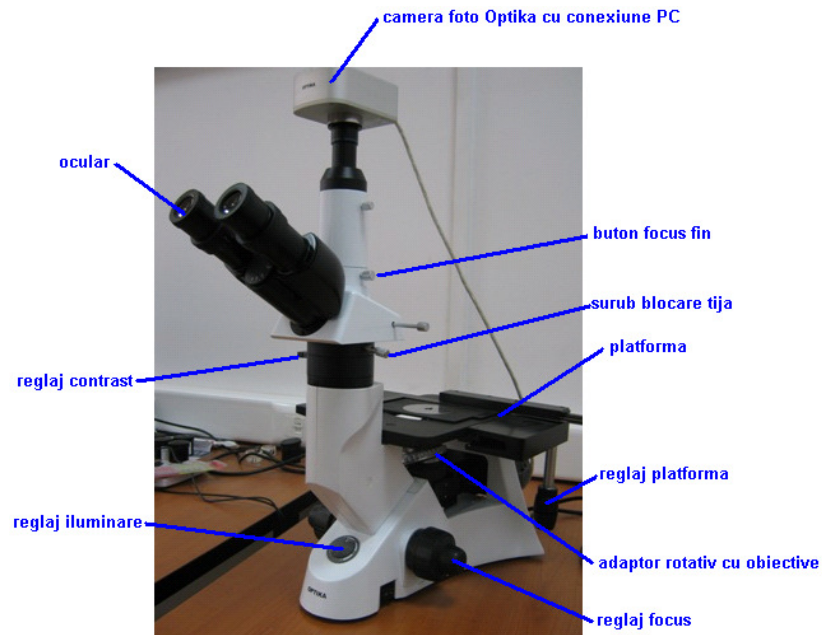


Fig. 3.12 Microscopul optic model Optika

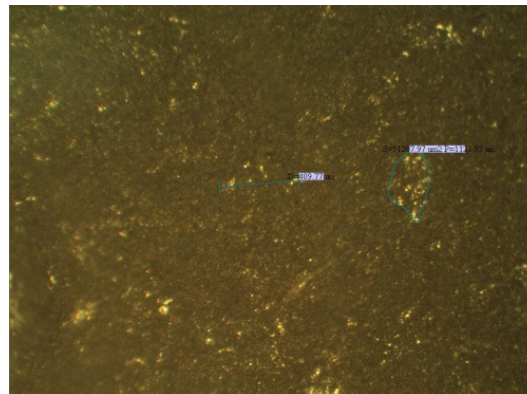


Fig. 3.13 Imagine obținută cu ajutorul microscopului Optika (10x)

Metoda de testare

Metoda de testare folosită în cercetarea eroziunii cavitaționale este în conformitate cu norma ASTM G32-2010 [148].

Pentru fiecare tip oțel s-au încercat câte trei probe (care provin din același semifabricat). Probele, prelevate din semifabricatele turnate după tratamentele termice descrise mai sus, au fost realizate în cadrul Laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara. Pentru fiecare probă suprafața de atac a fost lustruită la o rugozitate de $R_a=0,2\div 0,8 \mu\text{m}$.

3.2. Testarea la cavitatie vibratorie 65

Înainte de începerea testelor, fiecare probă a fost curățată și cântărită pentru determinarea masei inițiale. Curățarea constă în spălarea probei sub jet de apă pentru îndepărtarea impurităților, degresarea probei în baie de spirt medicinal sau acetonă și uscarea sub jet de aer cald.

Cântărirea probelor s-a făcut pe balanța analitică prezentată anterior.

Probele din fiecare tip de oțel au fost încercate pe cele două aparate vibratorii T1 și T2.

În total au fost testate 48 de probe.

Mediul de lucru folosit pentru încercări a fost apa potabilă de la rețea, care a fost menținută la o temperatură constantă de $22 \pm 1^\circ\text{C}$. Durata totală a încercărilor pentru o probă a fost de 165 de minute. Aceasta a fost împărțită în mai multe intervale de timp în vederea înregistrării pierderilor masice. Intervalele de întrerupere a încercărilor în vederea prelevării măsurătorilor intermediare au fost următoarele:

- primul interval de atac a fost de 5 minute
- al doilea interval de atac a fost de 10 minute
- celelalte 10 intervale de atac au avut o durată de câte 15 minute.

După înregistrarea pierderilor masice, suprafața erodată a fost analizată cu ochiul liber și fotografiată cu aparatul foto CANON, de mare rezoluție, pentru urmărirea evoluției petei de eroziune. De asemenea, suprafața deteriorată prin cavitatie a fost fotografiată și analizată la microscopul optic aflat în dotarea laboratorului, la diferite grade de mărire.

Precizare: Durata de încercare depinde de aparatul de testare, materialul și de timpul la care se stabilizează viteza de eroziune cavitatională, astfel încât după testare curba vitezei să aibă o formă asemănătoare celei stabilite de Thiruvengadam (Fig. 3.14) [2],[142],[14], considerată model de către specialiști. Cercetările efectuate în decursul a peste 65 ani în cadrul Laboratorului de Mașini Hidraulice din Timișoara, pe aparatul magnetostriktiv T1 și cele de aproape 3 ani realizate în aparatul cu cristale piezoceramice T2, au demonstrat că durata de 165 minute este suficientă pentru atingerea palierului curbei vitezei de eroziune.

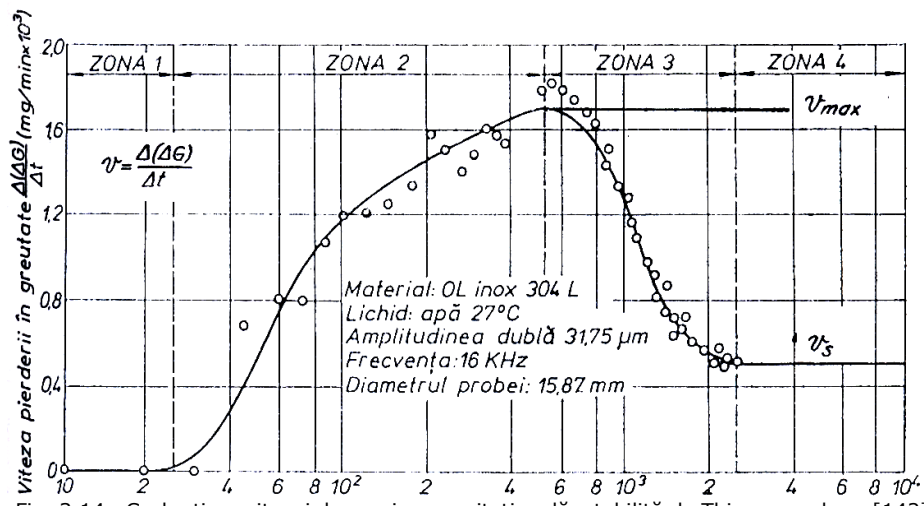


Fig. 3.14 Curba tip a vitezei de eroziune cavitatională stabilită de Thiruvengadam [142]

În timpul atacului cavitațional amplitudinea și frecvența vibrațiilor, fiecărui aparat, au fost menținute constante la valorile precizate anterior.

Temperatura lichidului de lucru, pentru toate cercetările, s-a menținut în jurul valorii de $22 \pm 1^\circ\text{C}$, conform cerințelor ASTM G32.

3.2.2. Rezultate experimentale. Discuții

3.2.2.1. Curbele caracteristice. Modelul analitic

Modelul analitic

Pe baza pierderilor masice Δm_i , înregistrate la finalul fiecărei perioade intermediară de testare, "i", s-au determinat pierderile masice cumulate m , cu relația:

$$m = \sum_{i=1}^{12} \Delta m_i \quad (3.3)$$

În conformitate cu procedurile de analiză a evoluției comportamentului și rezistenței la cavitația vibratoare a oțelurilor testate, stabilite în Laboratorul de Cavitație al U.P. Timișoara, cu pierderile masice s-au determinat valorile experimentale pentru adâncimile medii de pătrundere a eroziunii MDE și vitezele acestora MDER

Relațiile de calcul ale acestor mărimi sunt:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, cumulată

$$\text{MDE}_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) [\text{mm}] \quad (3.4)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii

$$\text{MDER}_i = \Delta \text{MDE}_i / \Delta t_i \quad (3.5)$$

unde:

i - reprezintă perioada de testare

Δm_i - este pierderea de material în perioada i , în grame,

ρ - densitatea oțelului, în grame/mm³,

Δt_i - durata cavitației corespunzătoare perioadei "i" (5 minute, 10 minute sau 15 minute)

d_p - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ($d_p = 15,8$ mm - deoarece, diferența dintre diametrul suprafeței erodate efective și cea a suprafeței atacate este foarte mică, peste 90 % din suprafață este erodată-vezi paragraful 3.5.1), pentru probele testate în aparatul T2, respectiv diametrul mediu al petei eroziunii ($d_p = 9,8$ mm-deoarece din suprafața expusă eroziunea ocupă circa 60 % - vezi paragraful 5.1), pentru probele testate în aparatul T1.

ΔMDE_i - valoarea adâncimii medii de pătrundere realizată prin cavitație în perioada Δt_i

Aproximare valorilor experimentale este realizată prin curbe analitice construite cu relațiile stabilite pe baza modelului prezentat de dr.ing. Alin dan Jurchela în teza sa de doctorat [71], construit de echipa coordonată de prof. Bordeășu și matematician dr. C. Pătrășcoiu, de la Universitatea din Craiova.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 67

Formele relațiilor analitice sunt [71]:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii

$$\text{MDE}(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (3.6)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii

$$\text{MDER}(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (3.7)$$

unde: 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

Utilizarea curbelor de aproximație este foarte importantă în analiza rezultatelor experimentale, deoarece, funcție de forma curbei și dispersia punctelor experimentală față de aceasta, se pot face aprecieri pentru comportarea la cavitație și rezistența oțelului pe durata atacului.

Precizare: funcție de ce se dorește a se pune în evidență, în cadrul tezei, în ce urmează, pentru unitatea de lungime se va utiliza mm sau μm .

Curbe caracteristice

Pentru facilitarea calculelor, s-a folosit valoarea medie a pierderilor masice, obținută ca medie aritmetică a pierderilor masice înregistrate pentru cele 3 probe testate din fiecare categorie de oțeluri. Cu ajutorul pierderilor masice cumulate medii obținute au fost determinate valorile experimentale ale adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii (MDE), cu relația (3.4) și ale vitezelor adâncimilor medii de eroziune MDER, cu relația (3.5).

În continuare se prezintă și discută rezultatele testelor de cavitație exprimate prin punctele experimentale și curbele caracteristice de eroziune, de aproximare ale acestora, obținute prin testarea în cele două aparate T1 și T2.

Oțelul Ni10Cr6C1T1

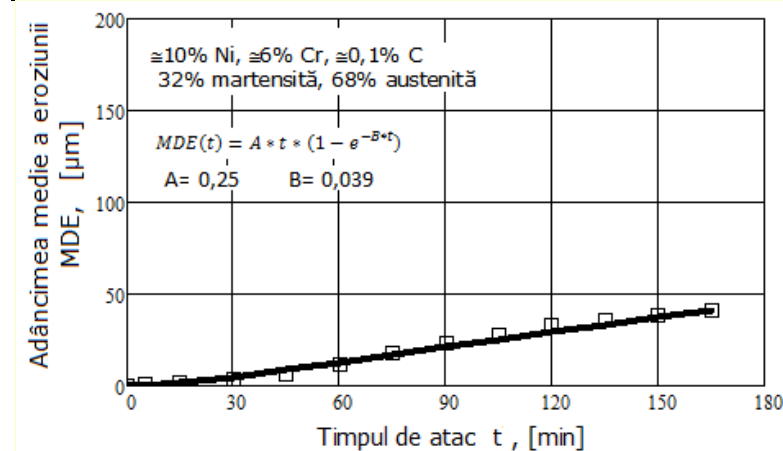


Fig. 3.15 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

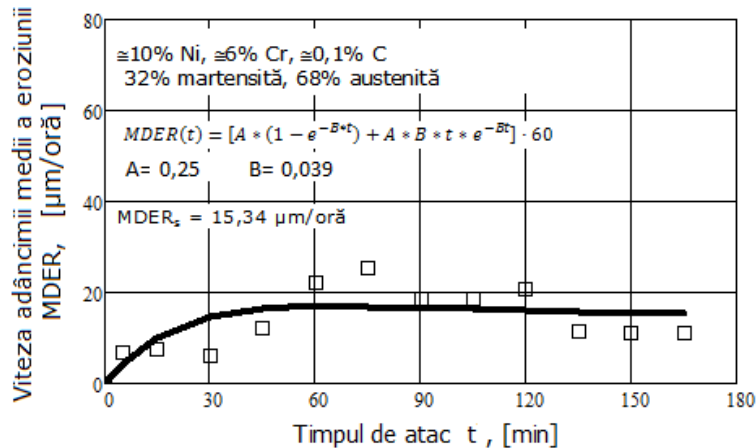


Fig. 3.16 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Din analiza graficelor, prezentate în fig. 3.15 și 3.16, se observă că:

- dispersia punctelor experimentale față de curba de aproximație a adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, MDE, este ușor neuniformă, cu mici abateri, în prima parte a atacului, până la minutul 60; după minutul 90 dispersia este mult mai uniformă, abaterile reducându-se substanțial, ducând la o dispunere aproximativ liniară;
- dispersia punctelor experimentale, față de curba de aproximație a vitezei adâncimii medii de eroziune, MDER, este mult mai bine pusă în evidență. Neuniformitatea din prima parte (până la minutul 60) este firească ca urmare a distrugerii vârfului rugozităților și eliminării prafului abraziv din suprafața atacată. După minutul 60, curba de aproximație tinde spre stabilizarea vitezei de eroziune, la o valoare aproape de valoarea maximă **15,34 $\mu\text{m/oră}$,.**

Consider că viteza redusă din primele 60 minute se datorează inițierii fisurilor, la granița dintre austenită și martensită, cu evoluție spre grăunții de austenită și în jurul acelor de martensită, constituentul cu rezistența cea mai mare la cavitație. Prin urmare, în acest interval sunt distruse vârfurile rugozităților (nesemnificative ca pierderi masice) și mai puțin expulzări de grăunți sau părți din ei, ai austenitei și martensitei. Acumularea fisurilor se face simțită în perioada imediat următoare când pierderile cresc, urmând ca procesul să se reia după minutul 120.

Apreciez că modul de dispersie a punctelor experimentale și de evoluție a curbelor de aproximație sunt caracteristice oțelurilor cu rezistențe deosebite la atacurile cavitației, caracterizate de proprietăți mecanice superioare (vezi tabelul 3.4).

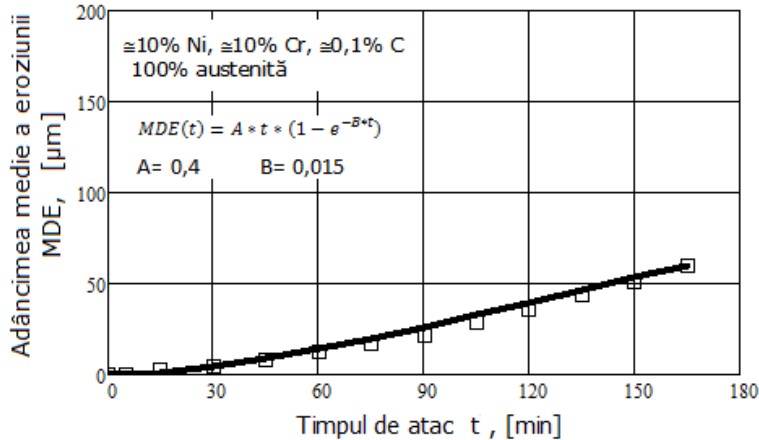
Otelul Ni10Cr10C1T1

Fig. 3.17 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

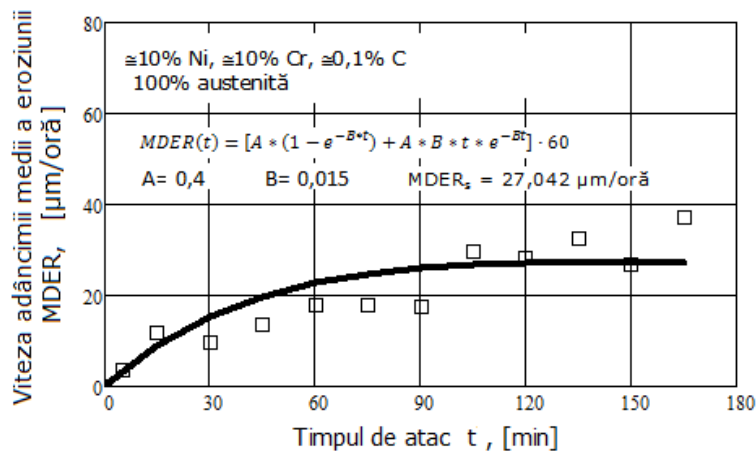


Fig. 3.18 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Dispersia punctelor experimentale și forma de evoluție a curbelor de aproximație, pentru adâncimea medie a eroziunii, fig.3.17 și viteza adâncimii medii de eroziune, fig. 3.18, arată o comportare constantă la atacul cavitației, după minutul 90, cu pierderi masice diferențiate, pe duratele intermediare. Dispersia punctelor experimentale, față de curba de aproximație a vitezei de eroziune, din perioada, 30-90 minute, arată că prin impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate de implozia bulelor cavitaționale, odată cu pierderile masice, în structura austenitică, se produc deformații și multe fisuri, care după minutul 90, fac ca aceste pierderi, respectiv viteze să crească (probabil că grăunții expulzați sau părțile din aceștia sunt în număr mai mare). Stabilizarea vitezei de eroziune, la valoarea maximă, $MDER_s = 27,042 \mu\text{m/oră}$, după minutul 90, arată că stratul superficial

70 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

s-a durificat mecanic. Dispersia punctelor, față de curba teoretică de aproximație $MDE(t)$, sugerează o eroziune neuniformă a suprafeței atacate.

Oțelul Ni10Cr18C1T1

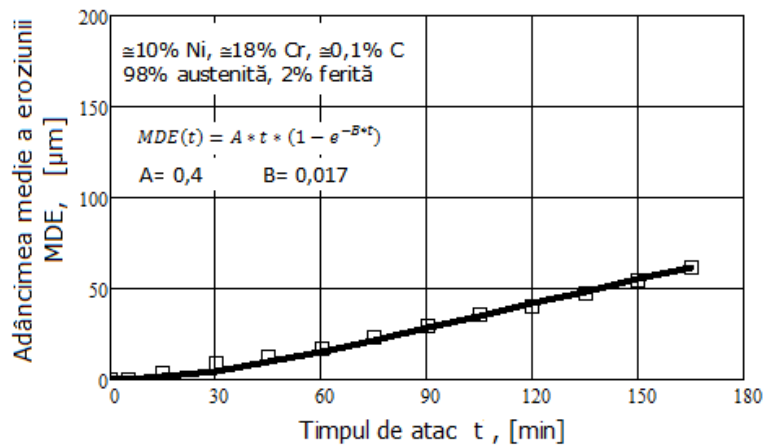


Fig. 3.19 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

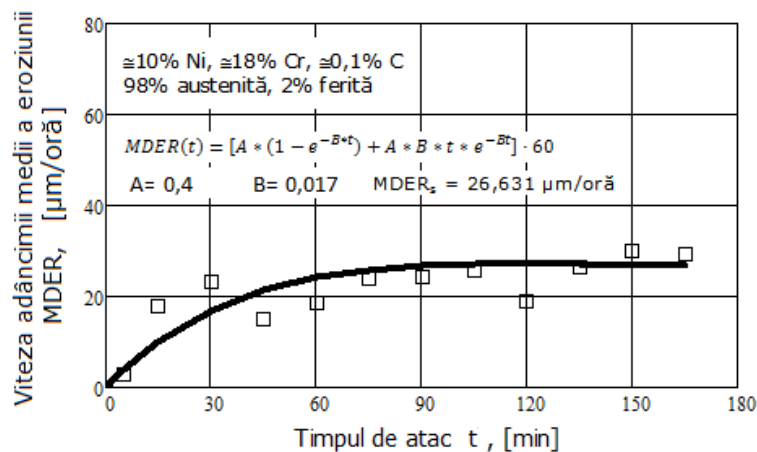


Fig. 3.20 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

După evoluția curbelor de aproximație a punctelor experimentale și după dispersia acestora față de curbele analitice, fig. 3.19 și 3.20, rezultă că eroziunea suprafeței atacate de cavitație se produce uniform și cu o viteză aproximativ constantă pe intervalul 60-165 minute. Abaterea mai mare, a vitezei experimentale, de la minutul 120, o apreciez ca firească și normală pentru procese de complexitatea cavitației [2], [13], [71], deoarece constanța vitezelor, din perioada 60-105 minute, exprimă și produceri de fisuri care, în această perioadă intermediară, s-au unit și au permis expulzarea unei cantități mai mari de material; cel mai probabil de ferită.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 71

De asemenea, banda de dispersie, față de curba MDER(t), relativ redusă, exprimă și gradul ridicat de tasare, durificare, a stratului cavitat, care conduce și la stabilizarea vitezei de eroziune la valoarea maximă, **MDER_s = 26,631 μm/oră**.

Oțelul Ni10Cr24C1T1

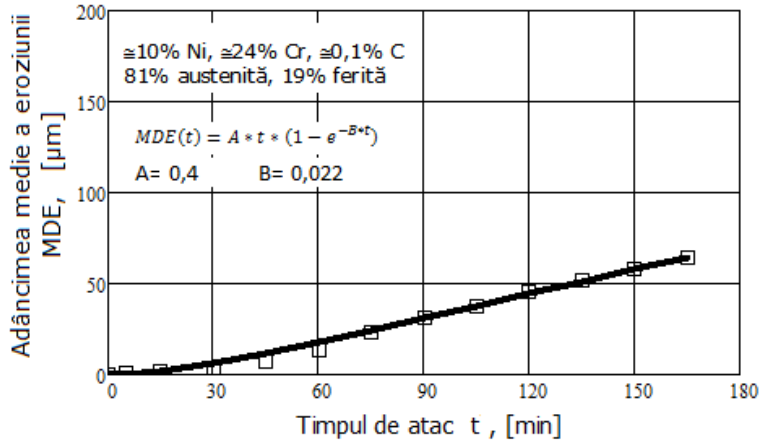


Fig. 3.21 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

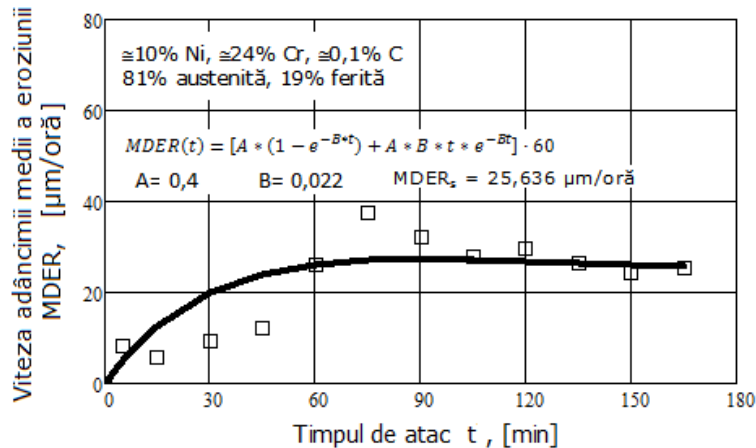


Fig. 3.22 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Diagrama prezentată în fig. 3.21 arată o creștere a pierderilor masice cumulate aproximativ liniară, cu pierderi reduse în intervalul 15-60 minute. Însă datele din fig. 3.22, arată că în perioada 60-105 minute pierderile sunt cele mai importante. Explicația este dată prin unirea fisurilor, generate în prima parte a atacului cavitației, în grăunții de ferită, respectiv la granițele dintre grăunții de ferită și austenită. La impactul microjeturilor și undelor de șoc cu acești grăunți, cu legăturile inter și transcristaline slăbite, evident, aceștia, au fost ușor expulzați din

suprafața probei. Cel mai probabil, după experiențele și datele oferite de specialiștii în cavitația materialelor, comportarea din perioada 60-105 minute, este generată de ferita din structură, în proporție de 19 % (componenta care se distruge cel mai ușor prin cavitație). După minutul 120, eroziunea cavitațională are o evoluție relativ constantă, materialul suferind atât deformații plastice cât și pierderi de material. Viteza de eroziune stabilizându-se la valoarea $MDER_s = 25,636 \mu\text{m/oră}$.

Oțelul Ni10Cr13C036T1

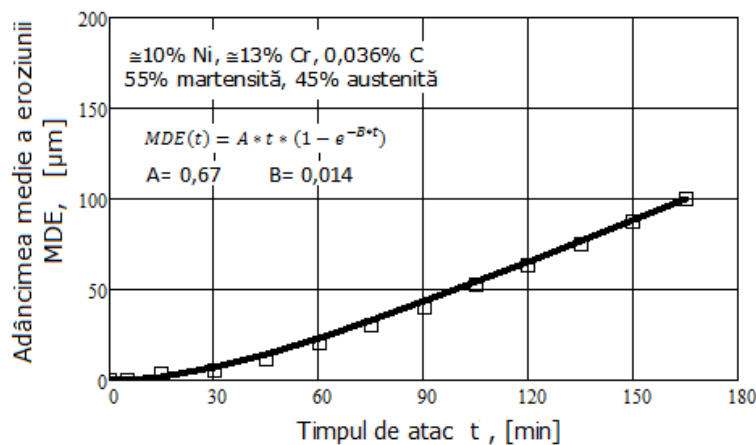


Fig. 3.23 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

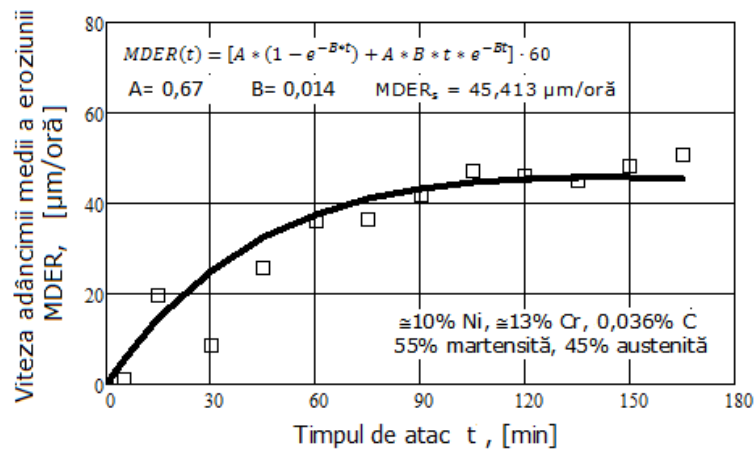


Fig. 3.24 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Din figura 3.23 și 3.24 rezultă că oțelul Ni10Cr13C036T1, după minutul 45, prezintă o eroziune cavitațională uniformă. Se observă perioade dominate de deformații plastice (minutul 30, minutul 45), dar care nu au o influență semnificativă asupra evoluției eroziunii cavitaționale.

Viteza se stabilizează la valoarea maximă $MDER_s = 45,413 \mu\text{m/oră}$.

Apreciez că dispersia uniformă și aproximativ constantă, după minutul 60, este cauzată și de prezența, în proporție importantă (45 %), a martensitei, componenta structurală cu cea mai mare rezistență la cavitație. Totuși, proprietățile mecanice, reduse valoric (Tabelul 3.4), față de cele analizate anterior, precum și cantitatea mai mică de carbon (care scade duritatea [104]) a dus la o valoare mai scăzută a rezistenței la cavitație.

Oțelul Ni10Cr14C036T1

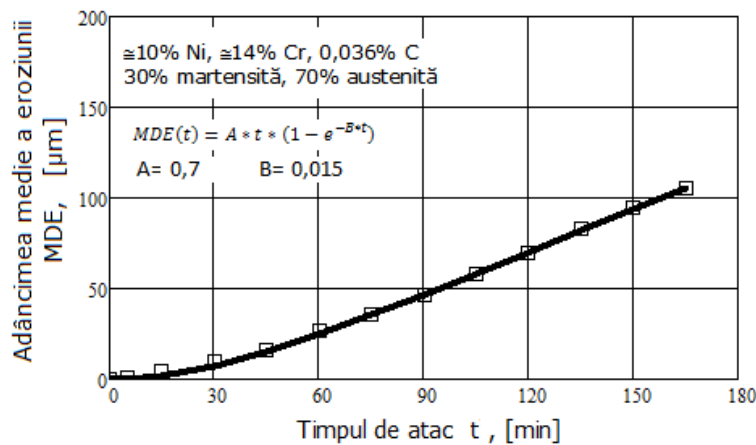


Fig. 3.25 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

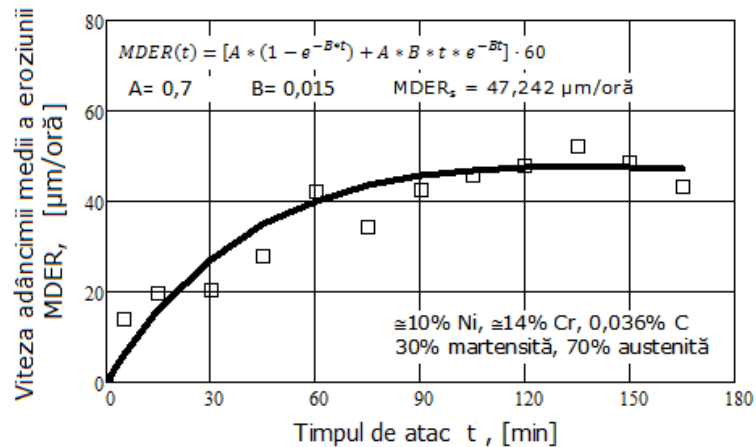


Fig. 3.26 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

După dispersia punctelor experimentale și formele de evoluție a curbelor de aproximație, fig.3.25 și 3.26, rezultă că oțelul Ni10Cr14C036T1, se comportă și rezistă la atacul cavitației foarte asemănător oțelului Ni10Cr13C036T1. Acest aspect este o certitudine că efectul este generat de prezența, în structura oțelurilor, a martensitei.

74 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

Viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii se stabilizează la valoarea maximă **MDER_s = 47,242 μm/oră**.

Otelul Ni10Cr16C036T1

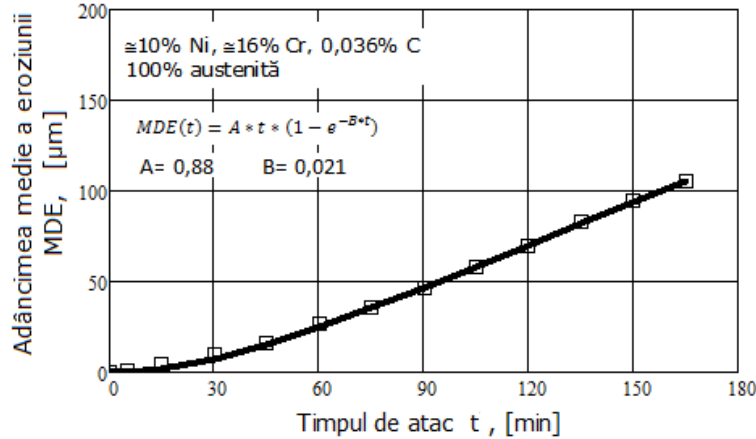


Fig. 3.27 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

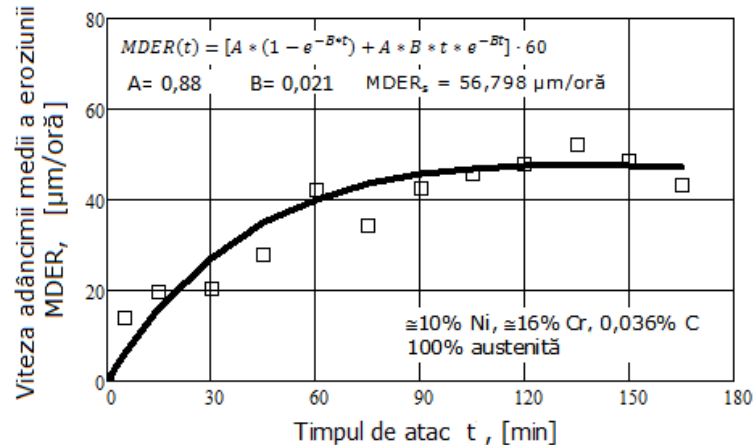


Fig. 3.28 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Analizând datele din diagramele prezentate în fig. 3.27 și 3.28 se constată că, după minutul 60 pierderea masică are o variație liniară, iar viteza de eroziune MDER se stabilizează la valoarea maximă, **MDER_s = 56,798 μm/oră**.

Deși microstructura este doar de austenită, o componentă cu bună rezistență la cavitație, pierderi semnificative se înregistrează pe toată perioada atacului cavitației. Pierderile din primele 15 minute ale atacului sunt afectate, în primul rând, de praful abraziv din suprafața atacată și de distrugerea vârfurilor rugozităților. Dispersia punctelor experimentale față de curba de aproximație a vitezei de eroziune, fig. 3.28, sugerează că eroziunea cavitațională este dominată și de un puternic proces de fisurare și deformații plastice în suprafața atacată [13].

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 75

Stabilizarea vitezei de eroziune, încă din minutul 75-90, arată că în stratul superficial s-a realizat o durificare ce duce la expulzări de grăunți, sau părți din aceștia, aproximativ constante [13].

Oțelul Ni10Cr18C036T1

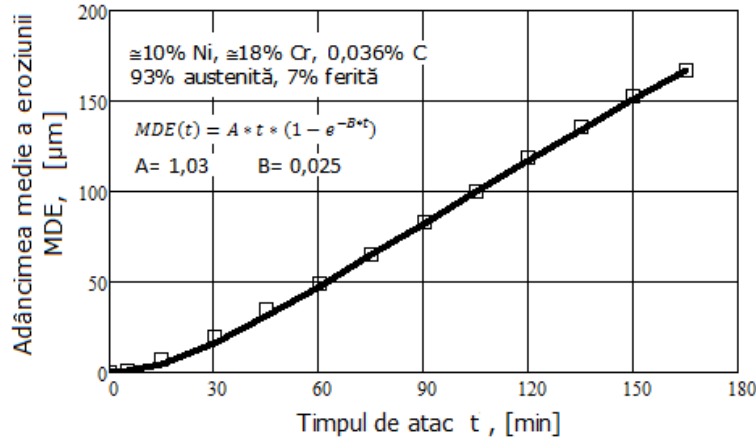


Fig. 3.29 Variația adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

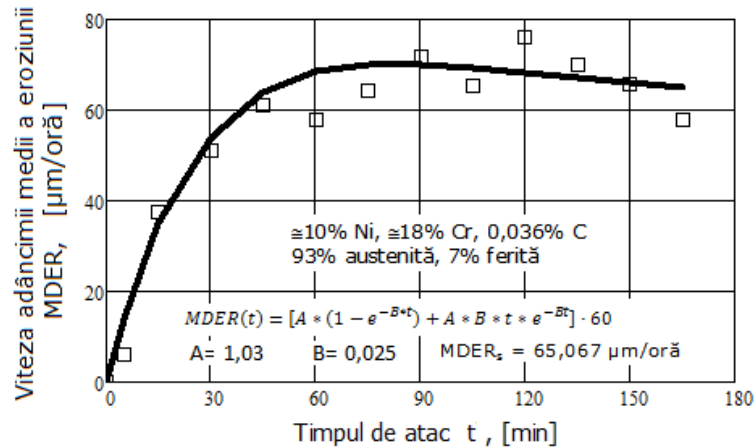


Fig. 3.30 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii cu durata atacului cavitației

Forma curbelor de aproximație și dispersia punctelor experimentale față de acestea, pentru adâncimea medie de pătrundere, fig. 3.29 și viteza adâncimii medii de pătrundere, fig. 3.30, duc la următoarele constatări:

- după minutul 60 al atacului cavitației pierderea masică cumulată are o variație liniară (cu pierderi aproximativ constante pe perioadele intermediare de atac);

76 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

- dispersia aproximativ simetrică, a punctelor experimentale față de curba de aproximație a vitezei medii de eroziune, după minutul 60, arată că eroziunea produsă este una uniformă, cu o viteză ce tinde să se stabilizeze la valoarea $MDER_s = 65,067 \mu\text{m/oră}$;
- încă din primele minute ale atacului cavitației pierderile sunt semnificative; Acestea sunt datorate în primul rând feritei, care se distruge cel mai ușor sub impactul cu undele de șoc și microjeturile, generate la implozia bulelor cavitaționale.

Consider că acest mod de dispersie a punctelor experimentale și de evoluție a curbelor de aproximație este cauzat de valorile scăzute ale proprietăților mecanice (valorile măsurate sunt cele mai scăzute, dintre toate oțelurile (vezi tabelul 3.4)). Ușoara scădere a vitezei de eroziune, spre valoarea de stabilizare, arată că durificarea stratului superficial, a început încă după primele expulzări, după minutul 60 gradul de tasare fiind tot mai redus.

Deoarece, probele testate pe aparatul T2 sunt din aceleași oțeluri, testate pe aparatul T1 graficele ce reprezintă variația parametrilor MDE și MDER, cu durata atacului, sunt prezentate succesiv, fără comentarii, concluziile fiind descrise la final.

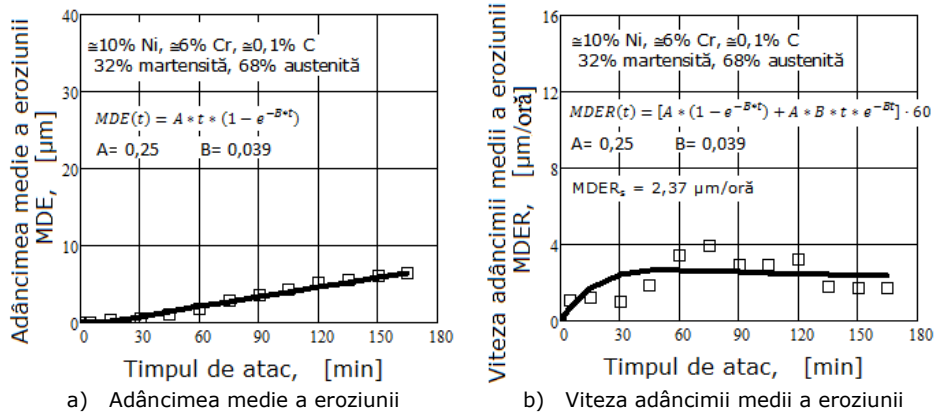
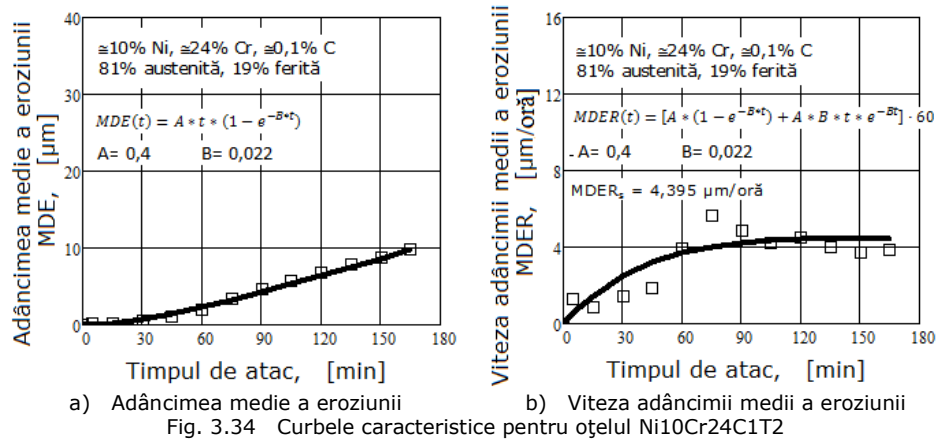
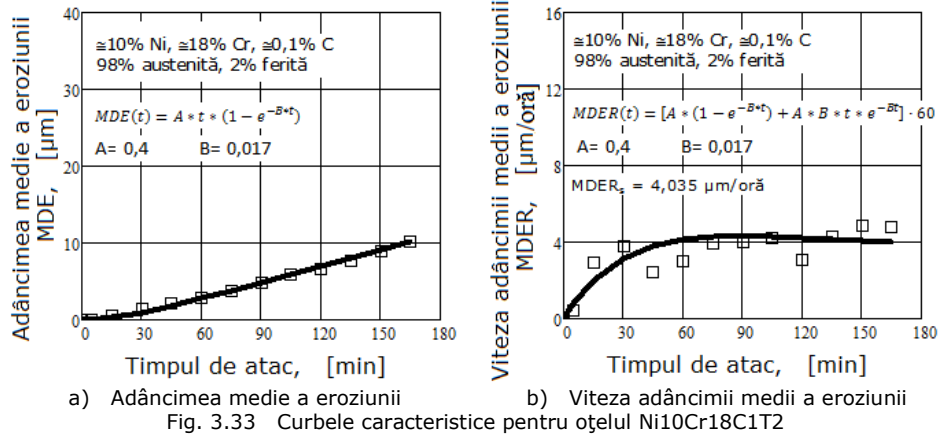
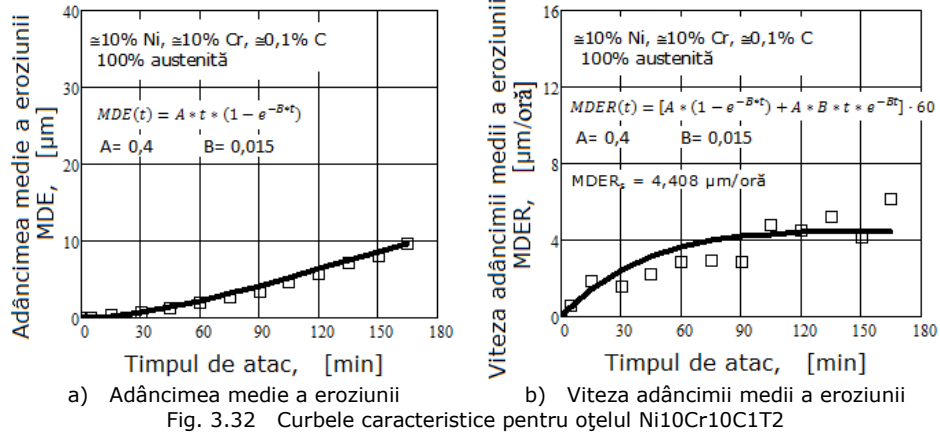
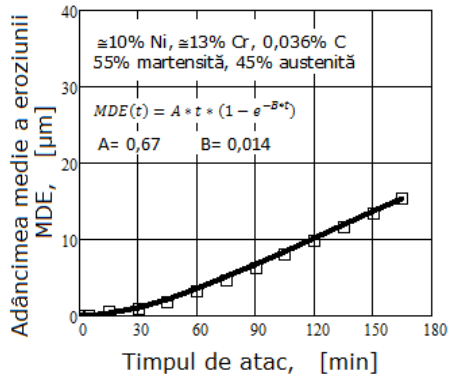


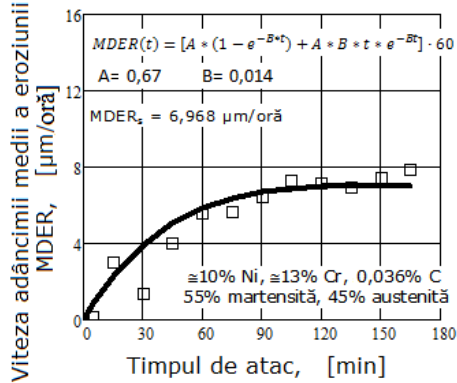
Fig. 3.31 Curbele caracteristice pentru oțelul Ni10Cr6C12

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 77



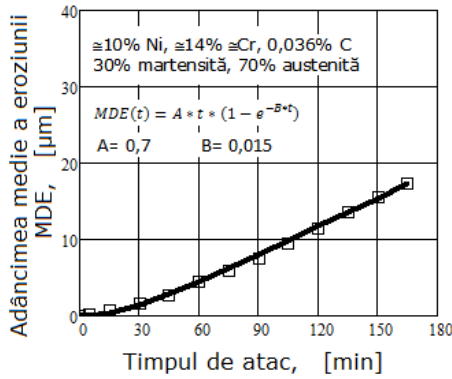


a) Adâncimea medie a eroziunii

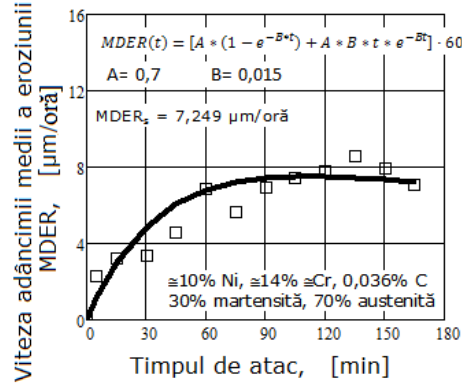


b) Viteza adâncimii medii a eroziunii

Fig. 3.35 Curbele caracteristice pentru oțelul Ni10Cr13C036T2

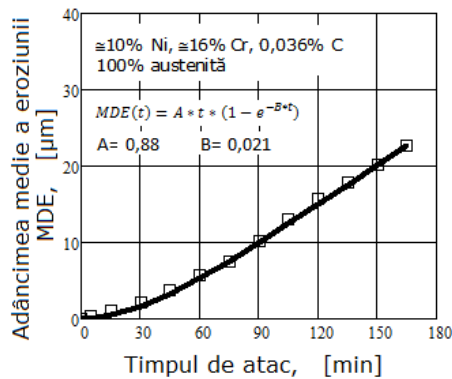


a) Adâncimea medie a eroziunii

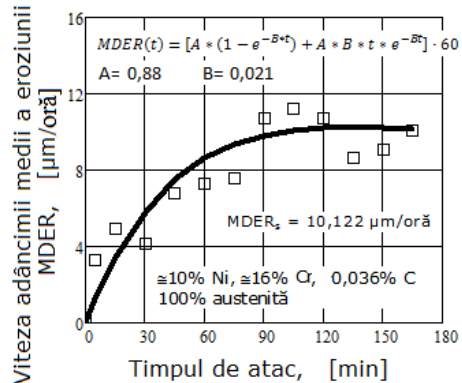


b) Viteza adâncimii medii a eroziunii

Fig. 3.36 Curbele caracteristice pentru oțelul Ni10Cr14C036T2



a) Adâncimea medie a eroziunii



b) Viteza adâncimii medii a eroziunii

Fig. 3.37 Curbele caracteristice pentru oțelul Ni10Cr16C036T2

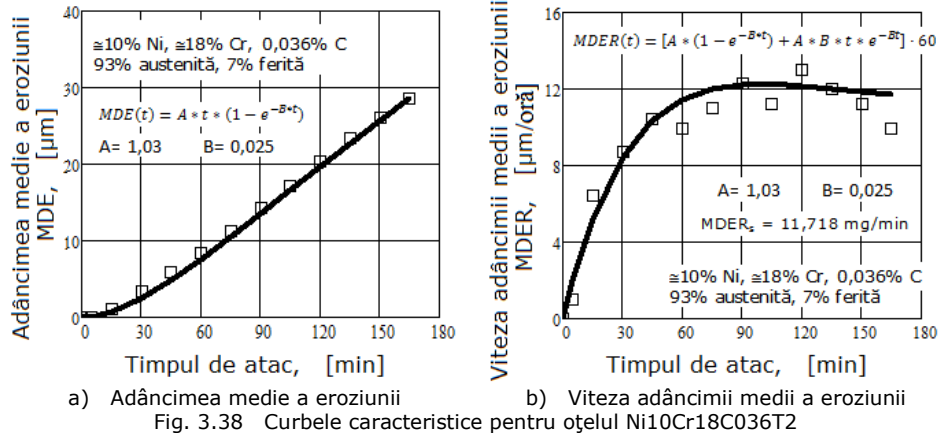


Fig. 3.38 Curbele caracteristice pentru oțelul Ni10Cr18C036T2

Analizând datele din diagramele aferente cercetărilor efectuate pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (fig. 3.31 – 3.38) se desprind concluzii similare celor prezentate la diagramele testelor din aparatul T1 (fig.3.15 – 3.30), cu privire la dispersia punctelor experimentale și forma de evoluție a curbelor de aproximație. Consider normală această asemănare, deoarece probele provin din aceleași semifabricate, diferența fiind legată doar de parametrii funcționali ai celor două aparate (amplitudinea, frecvența vibrațiilor și diametrele probelor), restul condițiilor de testare (mediul lichid și temperatura sa), pregătirea probelor, etc. fiind aceleași.

Diferențele de viteze de eroziune, realizate prin cavitatie vibratorie, produsă în cele două aparate T1 și T2, sunt analizate, în subcapitolele ce urmează, din punct de vedere al compoziției chimice, proprietăților mecanice și constituției microstructurale.

3.2.2.2. Prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale

Pentru reducerea erorilor de experiment (cum ar fi defecte de material, erori de cântărire, abateri de la valorile prestabilite ale parametrilor funcționali ai aparatului, etc.) s-a recurs la prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale, cu verificarea nivelului erorilor. În această prelucrare sau utilizat rezultatele obținute pe cele trei probe ale fiecărui oțel testat la cavitatie.

Prin utilizarea metodelor de statistică moderne se poate obține un rezultat 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 [38]. În acest scop am inclus în lucrare un capitol de prelucrări statistice.

Pentru verificarea statistică a rezultatelor experimentale obținute în laborator, s-a dorit construirea unei benzi de dispersie pentru fiecare oțel în parte. Benzile de dispersie au fost construite cu ajutorul erorii standard de estimare și al unor curbe de regresie polinomiale. Avantajul utilizării curbelor de regresie constă în faptul că aceste curbe oferă o imagine mai exactă asupra rezultatelor experimentale. Benzile de dispersie prezentate mai jos au fost obținute pentru pierderile masice cumulate ale oțelurilor studiate. În calcule s-au folosit valorile

medii ale pierderilor masice. Pe grafice au mai fost prezentate și valorile înregistrate pentru cele trei probe confecționate din același oțel.

Curbele de regresie au fost obținute cu ajutorul programului Microsoft Excel. După introducerea datelor de intrare (în cazul nostru pierderile masice cumulate și timpul), programul trasează automat curba de regresie care aproximează cel mai bine punctele de pe grafic. În plus, programul mai afișează ecuația curbei de regresie și coeficientul de corelare al acesteia. Ecuația generală a curbei de regresie polinomiale de ordinul II este:

$$Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (3.8)$$

unde: - Y este funcția 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.

După stabilirea curbei de regresie, se calculează valoarea medie pentru aceasta, precum și mediile pentru pierderile masice cumulate și pentru timp. Tot aici se calculează dispersia cu ajutorul formulei:

$$s^2 = \frac{1}{1-n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (3.9)$$

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. Următorul pas este calcularea erorii standard de estimare. Aceasta este necesară pentru construirea benzii de dispersie. În cazul nostru, formula de calcul a erorii standard de estimare este:

$$s_{xy} = \left[\frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n-2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

unde: - y_i este pierderea masică experimentală la timpul i

- Y_i este eroarea de estimare la timpul i
- n este numărul de încercări

Ultima etapă constă în stabilirea intervalului de toleranță. Acesta reprezintă numărul de puncte experimentale ce trebuie să se regăsească în banda de dispersie pentru ca această bandă să poată fi considerată bună. Limita superioară a intervalului de toleranță, notată cu S, se obține adunând 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 intervale de toleranță de 95% sau 99%, limitele intervalului se calculează după cum urmează:

- Intervalul de toleranță 95% - $S = y' + 2s_{xy}$; $I = y' - 2s_{xy}$;
- Intervalul de toleranță 99% - $S = y' + 3s_{xy}$; $I = y' - 3s_{xy}$.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 81

Notațiile utilizate în figuri sunt:

- y - pierderile masice cumulate medii pentru oțelul respectiv;
- YP - curba de regresie polinomială;
- S - limita superioară a intervalului de toleranță;
- I - limita inferioară a intervalului de toleranță;
- N1, N2, N3 - pierderile masice ale celor trei probe confecționate din oțelul respectiv.

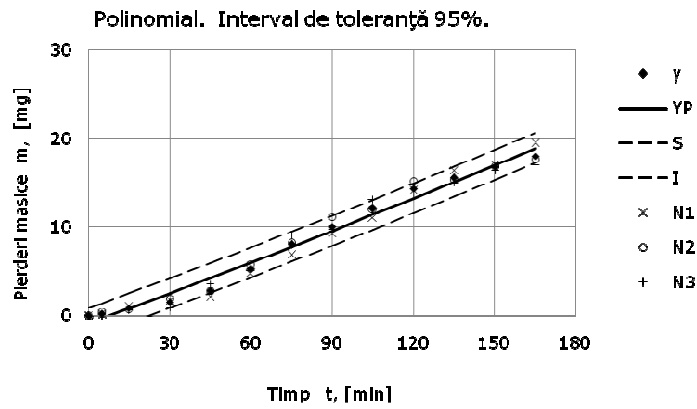


Fig. 3.39 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr6C1T1.

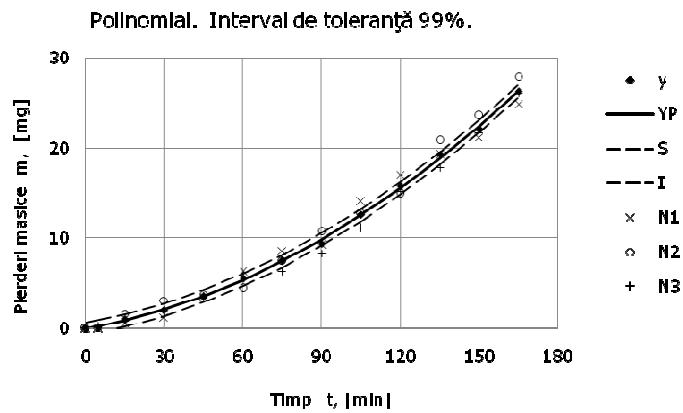


Fig. 3.40 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr10C1T1.

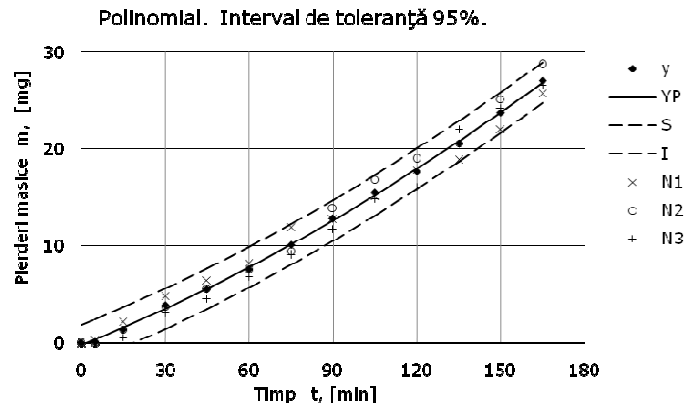


Fig. 3.41 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr18C1T1.

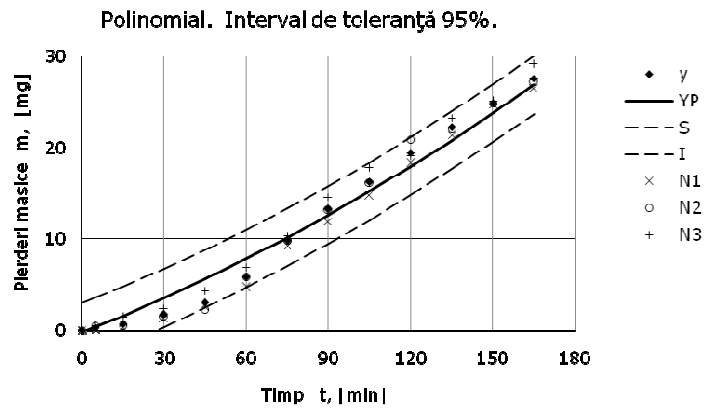


Fig. 3.42 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr24C1T1.

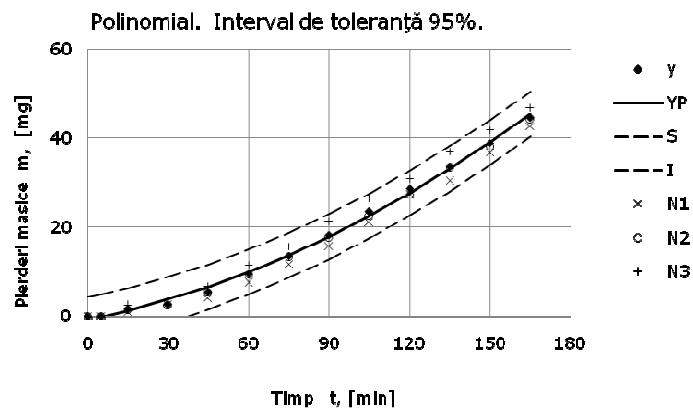


Fig. 3.43 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr13C036T1.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 83

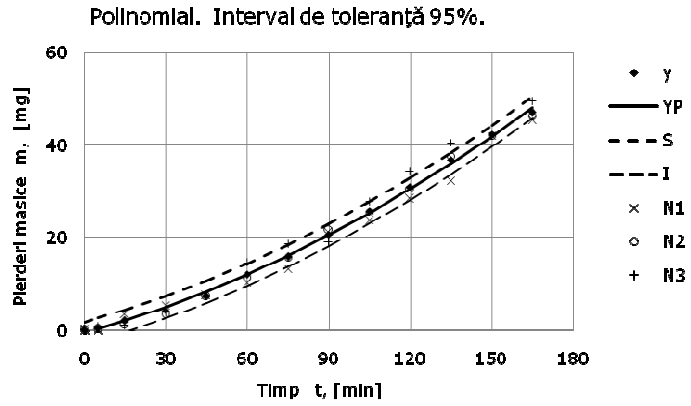


Fig. 3.44 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr14C036T1.

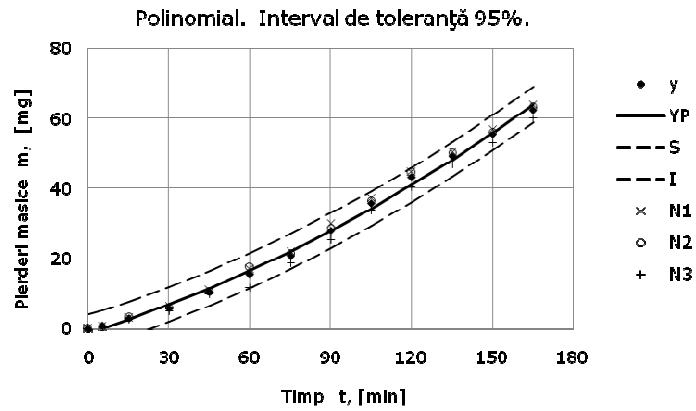


Fig. 3.45 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr16C036T1.

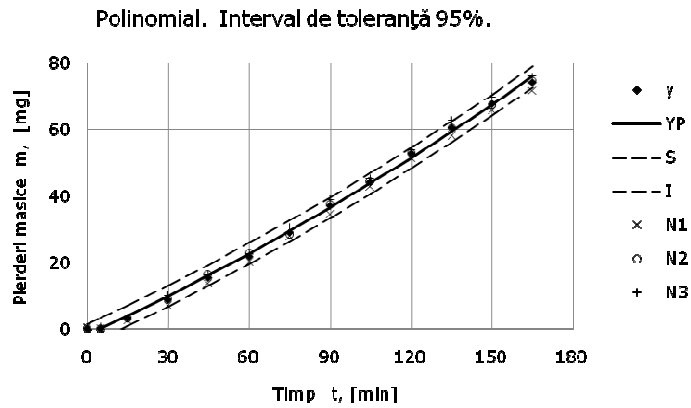


Fig. 3.46 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr18C036T1.

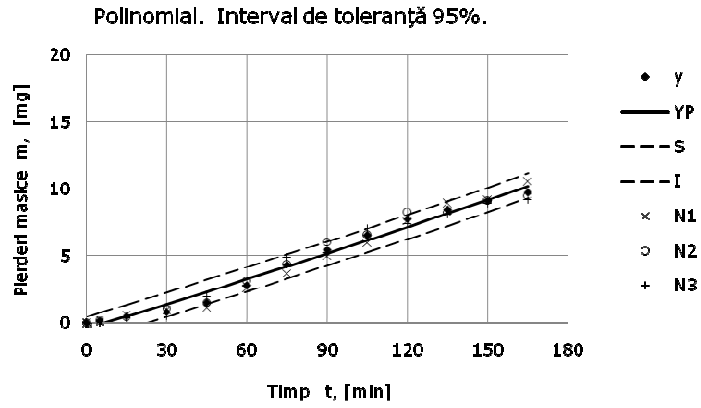


Fig. 3.47 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr6C1T2.
Polinomial. Interval de toleranță 95%.

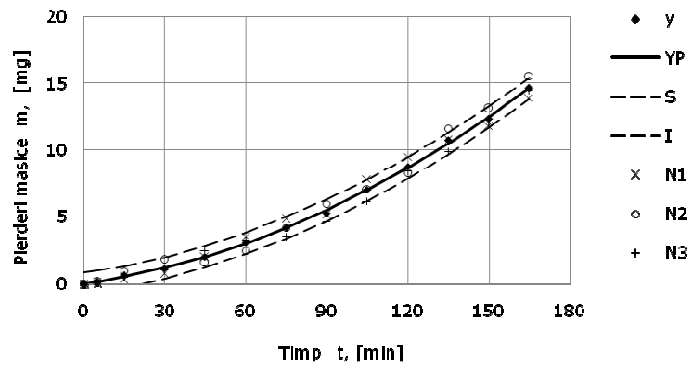


Fig. 3.48 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr10C1T2.

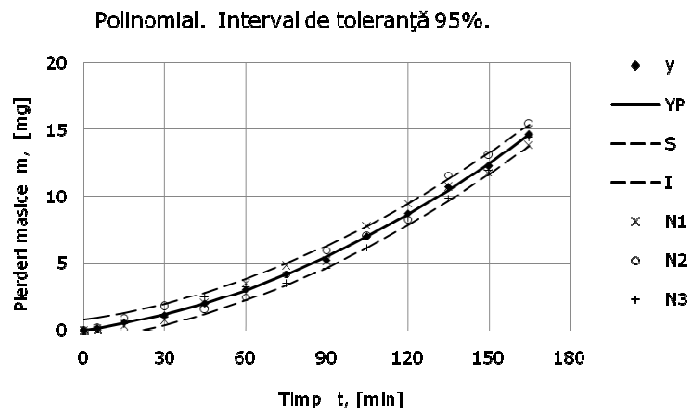


Fig. 3.49 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr18C1T2.

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 85

Polinomial. Interval de toleranță 95%.

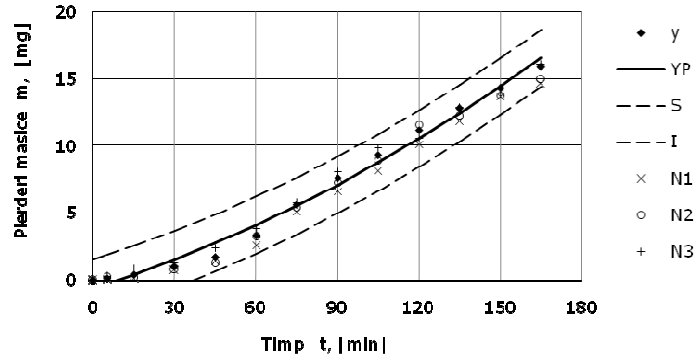


Fig. 3.50 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr24C1T2.

Polinomial. Interval de toleranță 95%.

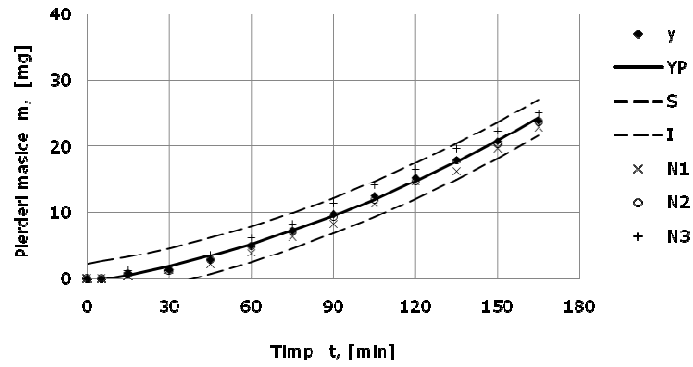


Fig. 3.51 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr13C036T2.

Polinomial. Interval de toleranță 95%.

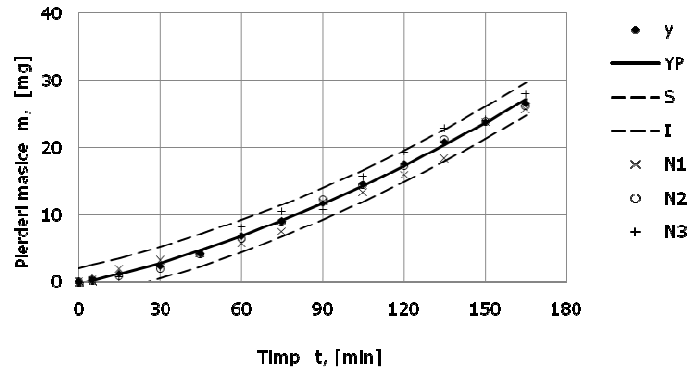


Fig. 3.52 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr14C036T2.

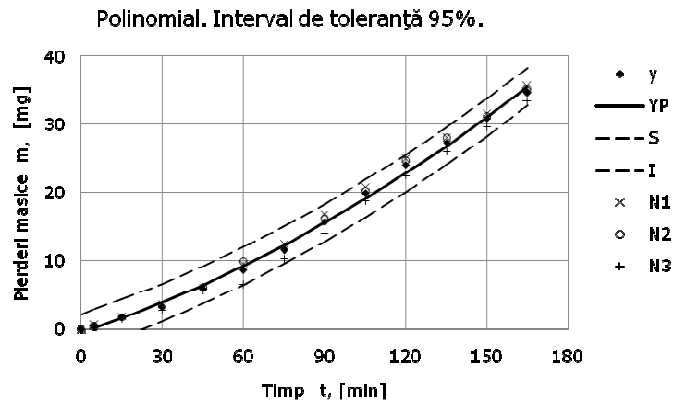


Fig. 3.53 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr16C036T2.

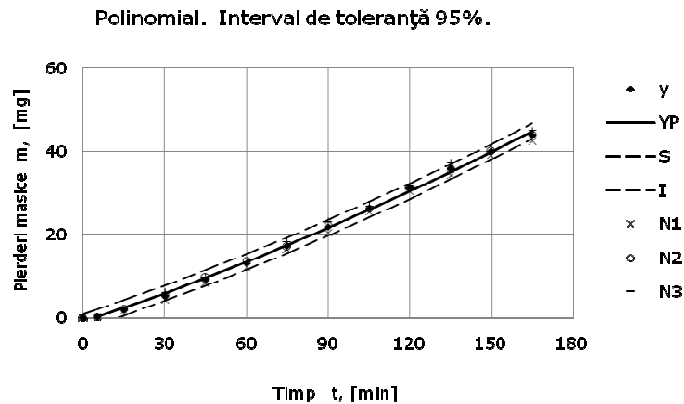


Fig. 3.54 Banda de dispersie a oțelului Ni10Cr18C036T2.

Eroziunea cavitațională este un fenomen cu o natură neuniformă. Acest lucru se poate observa și prin faptul că, în cazul tuturor oțelurilor încercate, dintr-un set de trei probe obținute din același material, deși comportamentul general al acestora este același, fiecare probă are un comportament ușor diferit față de celelalte două probe. Prelucrarea statistică a rezultatelor ne ajută să reducem acest efect, oferindu-ne o imagine mai exactă asupra evoluției eroziunii cavitaționale. În urma analizei graficelor prezentate mai sus, pot fi analizate valorile finale ale pierderilor masice cumulate statistice și uniformitatea distrugerii cavitaționale. Pentru pierderile masice cumulate înregistrate la sfârșitul perioadei de atac cavitațional au fost comparate valorile experimentale cu cele statistice (Tabelul 3.6 și 3.7). S-a constatat faptul că, deși valorile estimate diferă ușor față de valorile experimentale, ierarhia oțelurilor a rămas aceeași. Uniformitatea eroziunii cavitaționale este de asemenea un aspect important, care poate fi determinat în funcție de valoarea erorii standard de estimare. Cu cât eroarea standard de estimare este mai mare, cu atât eroziunea este mai neuniformă. Uniformitatea eroziunii este și mai importantă în cazul unor oțeluri ce prezintă curbe de regresie

3.2. Testarea la cavitație vibratorie 87

apropiate și diferențe mici între valorile finale ale acestora. În astfel de cazuri este de preferat să se aleagă oțelul cu o eroziune cât mai uniformă, deci cu o valoare a erorii standard cât mai mică.

Tabelele de mai jos prezintă valorile maxime ale pierderilor masice experimentale, ale curbelor de regresie și erorile standard (s_{xy}) obținute pentru fiecare material. Tabelul 3.6 conține materialele cavitate în aparatul T1, iar tabelul 3.7 cuprinde materialele testate în aparatul T2.

Tabelul 3.6 Pierderile masice ale oțelurilor testate în aparatul T1, [mg].

Simbolul oțelului	Ni10Cr6C1T1	Ni10Cr10C1T1	Ni10Cr18C1T1	Ni10Cr24C1T1	Ni10Cr13C036T1	Ni10Cr14C036T1	Ni10Cr16C036T1	Ni10Cr18C036T1
Pierderile masice cumulate experimentale	17,98	26,28	27,02	27,59	44,52	47,06	62,46	74,06
Val. maximă conf. curbei de regresie polinomiale	18,91	26,31	26,90	26,90	45,43	48,16	64,00	75,75
Eroarea standard de estimare	0,84	0,23	1,05	1,06	2,54	1,19	2,49	1,58

Tabelul 3.7 Pierderile masice ale oțelurilor testate în aparatul T2, [mg].

Simbolul oțelului	Ni10Cr6C1T2	Ni10Cr10C1T2	Ni10Cr18C1T2	Ni10Cr24C1T2	Ni10Cr13C036T2	Ni10Cr14C036T2	Ni10Cr16C036T2	Ni10Cr18C036T2
Pierderile masice cumulate experimentale	9,72	14,60	15,27	15,86	23,81	26,59	34,70	43,82
Val. maximă conf. curbei de regresie polinomiale	10,22	14,62	15,20	16,53	24,29	27,21	35,56	44,82
Eroarea standard de estimare	0,45	0,40	0,14	1,06	1,36	1,19	1,38	0,93

Valorile abaterilor standard, din ambele tabele, confirmă analizele realizate, anterior, pe baza dispersiei punctelor experimentale față de curbele de aproximație.

3.3. Compararea rezultatelor experimentale

3.3.1. Compararea rezistenței și comportamentului la cavitație

În urma prelucrării rezultatelor experimentale s-a făcut o comparație a evoluției eroziunii cavitaționale, a materialelor cercetate, pe fiecare aparat în parte. Prin această comparație s-a dorit evidențierea diferențelor de comportament și rezistență la eroziunea cavitațională. Astfel, în fig. 3.55 și 3.56 sunt prezentate curbele caracteristice obținute prin testarea oțelurilor în aparatul T1, iar în fig. 3.57 și 3.58, cele obținute prin testarea în aparatul T2.

Graficele cuprind curbele medii (pentru cele trei probe) ale fiecărui material, precum și curba medie a oțelului OH12NDL etalon pentru paletetele și rotoarele turbinelor hidraulice din România [13], [71]. În plus, pentru graficele aferente aparatului T1 s-a inclus și oțelul 41Cr4 (testat pe acest aparat), deoarece este oțelul de referință pentru Laboratorul Cavitație din cadrul U.P Timișoara.

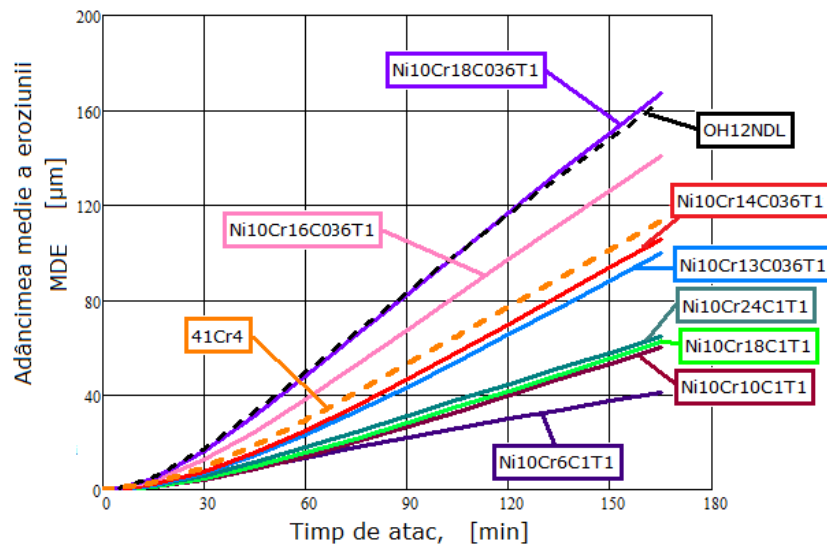


Fig. 3.55 Compararea adâncimilor medii ale eroziunii pentru oțelurile încercate pe aparatul T1.

3.3. Compararea rezultatelor experimentale 89

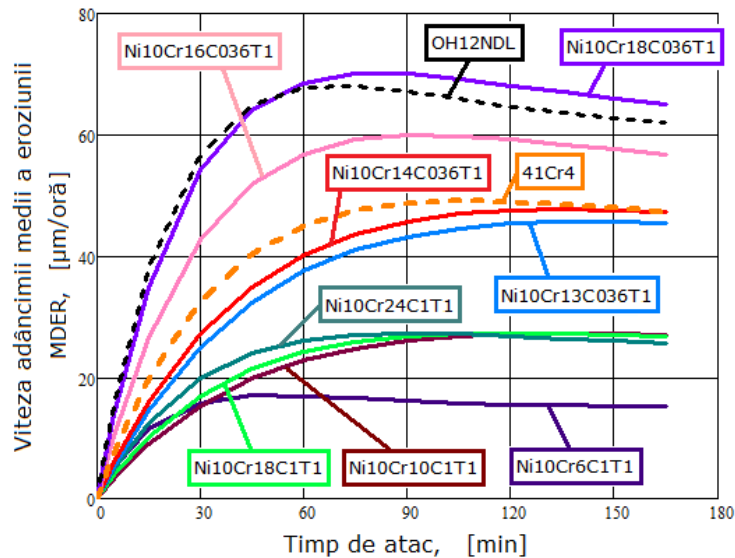


Fig. 3.56 Compararea vitezelor adâncimilor medii ale eroziunii pentru oțelurile încercate pe aparatul T1.

Analiza adâncimilor medii ale eroziunii înregistrate pentru oțelurile încercate pe aparatul T1 (Fig. 3.55) ne arată că oțelul Ni10Cr6C1T1 înregistrează cele mai mici adâncimi medii ale eroziunii finale. Acesta este urmat de oțelurile Ni10Cr10C1T1, Ni10Cr18C1T1 și Ni10Cr24C1T1, care înregistrează adâncimi medii ale eroziunii de valori apropiate și prezintă curbe asemănătoare. Oțelul Ni10Cr18C036T1, comparativ cu oțelul etalon OH12NDL, prezintă o comportare cavitațională asemănătoare, aproape identică, atât după viteza medie de eroziune, cât și după evoluția adâncimii medii de pătrundere a eroziunii. Toate celelalte oțeluri prezintă adâncimi medii ale eroziunii mai mici față de oțelul etalon OH12NDL.

Comparativ cu oțelul 41Cr4, oțelurile Ni10Cr16C036T1 și Ni10Cr18C036T1 sunt singurele care înregistrează adâncimi ale eroziunii mai mari decât acesta. Deși adâncimile medii ale eroziunii înregistrate pentru oțelurile Ni10Cr13C036T1 și Ni10Cr14C036T1 sunt mai mici față de oțelul 41Cr4, diferențele sunt mici. Celelalte oțeluri, din fig. 3.55, au adâncimi medii cumulate ale eroziunii sensibil mai mici, comparativ cu oțelul 41Cr4, ceea ce confirmă o mai bună rezistență la cavitație.

Din graficul MDER(t) (Figura 3.56) se confirmă că, dintre toate cele opt oțeluri studiate, oțelul Ni10Cr6C1T1 are cea mai bună comportare și rezistență la eroziunea prin cavitație.

Oțelurile Ni10Cr10C1T1, Ni10Cr18C1T1, Ni10Cr24C1T1 se comportă și rezistă, aproximativ identic, la atacurile cavitației produsă în aparatul T1. Diferențele, din perioada de acumulare (până la minutul 75) sunt neesențiale, situându-se în limitele de toleranțe ale proceselor complexe de tipul cavitației [2], [13].

Oțelurile Ni10Cr13C036T1 și Ni10Cr14C036T1 au o comportare și rezistență cavitațională, similare, cu diferențe neesențiale, de a oțelului etalon 41Cr4.

Oțelul Ni10Cr16C036T1, după evoluția curbei MDER(t) se comportă mai slab decât oțelul 41Cr4, dar mai bine decât oțelul OH12NDL. Cum ambele oțeluri etalon,

90 Cercetări experimentale privind eroziunea prin cavitație 3

41Cr4 și OH12NDL, sunt apreciate ca fiind cu bună rezistență la cavitație, apreciez că și oțelul Ni10Cr16C036T1 face parte din această categorie.

Deși oțelul Ni10Cr6C1T1 are în constituția microstructurală doar 32% martensită în comparație cu oțelul Ni10Cr13C036T1 care are martensită în proporție de 55%, comportarea sa este superioară oțelului Ni10Cr13C036T1. Acest lucru se poate explica prin faptul că oțelul Ni10Cr6C1T1 are în compoziția chimică un procent mai mare de carbon, constituent care crește duritatea materialului [104].

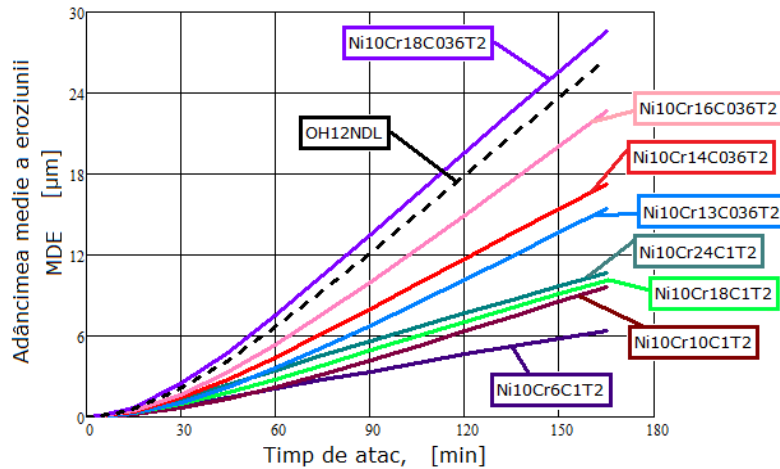


Fig. 3.57 Compararea adâncimilor medii ale eroziunii pentru oțelurile încercate pe aparatul T2.

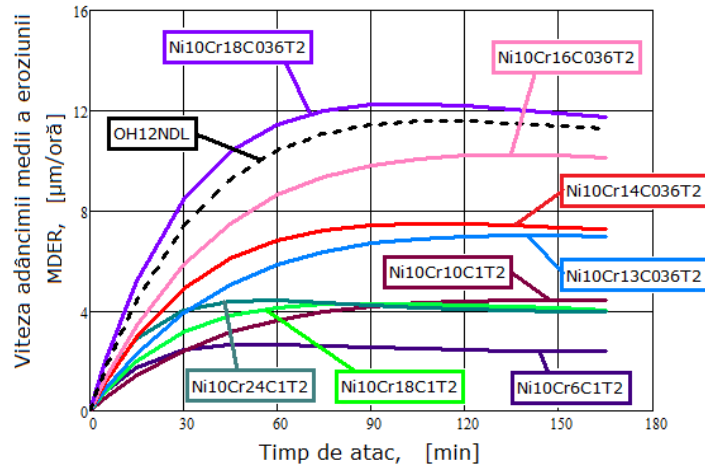


Fig. 3.58 Compararea vitezelor adâncimilor medii de eroziune ale oțelurilor încercate pe aparatul T2.

Din punct de vedere al curbelor caracteristice, ce caracterizează comportarea și rezistența la cavitația produsă în aparatul vibrator T2 (Figurile 3.57 și 3.58), concluziile desprinse la analiza realizată pe baza curbelor obținute la testarea în aparatul T1 (Figurile 3.55 și 3.56) sunt aceleași. Micile diferențe, sunt

3.3. Compararea rezultatelor experimentale 91

determinate de nivelul valoric al caracteristicilor mecanice ale oțelurilor, dar și de prezența martensitei. Aceste diferențe, se observă la oțelul Ni10Cr18C036T1.

De remarcat că oțelurile cu structuri de martensită și austenită au un comportament identic cu ale celor încercate pe aparatul T1 (Fig. 3.55 și Fig. 3.56).

Pentru o imagine de ansamblu a comportării oțelurilor la eroziunea cavitațională, în figurile 3.59 și 3.60 s-a realizat o comparație după valorile maxime și spre care vitezele adâncimilor medii de eroziune tind să se stabilizeze.

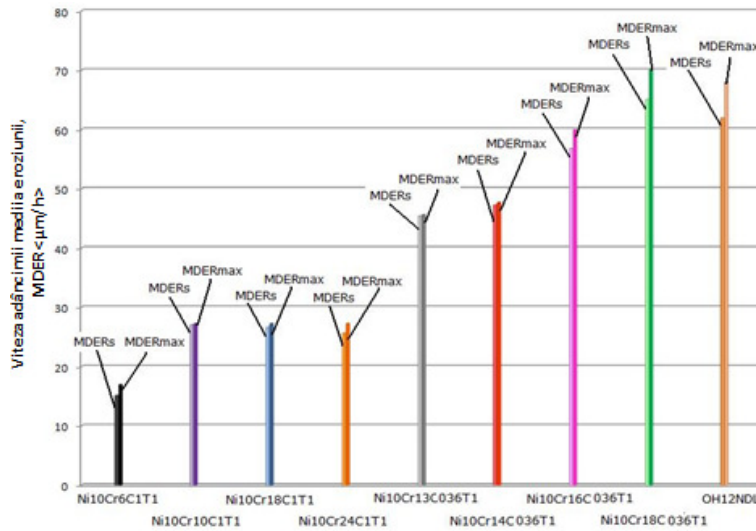


Fig. 3.59 Compararea vitezelor adâncimilor medii ale eroziunii (MDER) înregistrate pe aparatul T1.

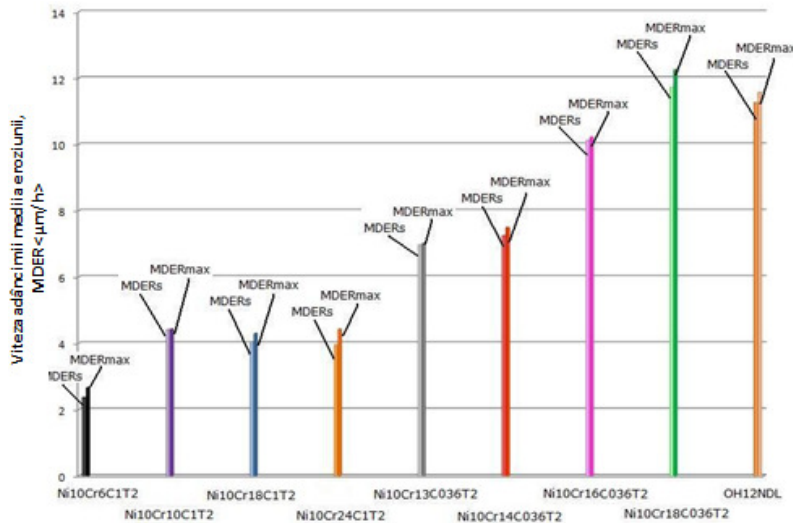


Fig. 3.60 Compararea vitezelor adâncimilor medii ale eroziunii (MDER) înregistrate pe aparatul T2.

Și din aceste diagrame se constată că, indiferent de aparatul utilizat, cel mai bun oțel este cel cu 0,1% carbon, 10% nichel și 6% crom. Microstructura sa este compusă din 32% martensită și 68% austenită. Cea mai slabă comportare o are oțelul cu 0,036% carbon, 10% nichel, 18% crom, cu microstructura compusă din 93% austenită și 7% ferită.

De remarcat că oțelul cu 0,036% carbon, 10% nichel și 13% crom, care are o microstructură cu 55% martensită (componenta cunoscută cu cea mai mare rezistență la eroziunea cavitației [13], [71]), are un comportament mai slab decât oțelul cu 10 % Ni, 6 % Cr și 0,1% C, ce conține, în structură, o cantitate mai mică de martensită, 32 %. Consider că această diferență se datorează conținutului diferit de elemente de aliere și în special al carbonului, aproape triplu la cel din urmă.

Din aceste diagrame rezultă, indiferent de aparatul în care s-a produs cavitația, o grupare pe patru categorii:

- 1 - cu cea mai mare rezistență la cavitație - oțelul 10 %Ni, 6 %Cr și 0,1 %C,
- 2 - două grupe, fiecare formată din trei oțeluri cu rezistențe cavitaționale apropiate - prima formată din oțelurile cu 10 %Cr, 18 %Cr și 24 %Cr și 0,1 %C, cea de a doua formată din oțelurile cu 13 %Cr, 14 %Cr, 16 %Cr și 0,036 %C și
- 3 - cu cea mai scăzută rezistență la cavitație, dar de același ordin cu a oțelului Etalon OH12NDL- oțelul cu 18 %Cr și 0,036 %C.

Din punct de vedere al ierarhizării, după valoarea de stabilizare a parametrului MDER, constatăm ca ordinea nu se schimbă, de la un aparat la altul.

De asemenea, se observă că diferențele dintre valorile maxime, $MDER_{max}$ și cele spre care tind vitezele adâncimii medii de eroziune, MDERs, sunt nesemnificative, fenomen specific oțelurilor cu rezistențe sporite la cavitație [13], [71].

Se mai poate observa faptul că oțelurile cu un conținut de 0,1% carbon au un comportament superior celor cu un conținut de 0,036% carbon, indiferent de procentul de crom și nichel, sau de compoziția microstructurală. Acest lucru poate fi explicat prin faptul că duritatea oțelului crește odată cu conținutul de carbon [104]. Cu toate acestea trebuie avut în vedere faptul că o cantitate prea mare de carbon poate duce la fragilizarea oțelului și, de asemenea, scade sudabilitatea oțelului.

3.3.2. Influența tipului și parametrilor funcționali ai aparatului vibrator asupra evoluției eroziunii cavitației

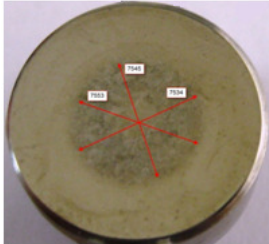
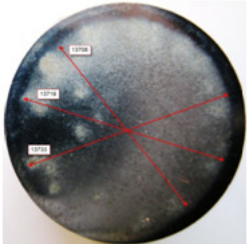
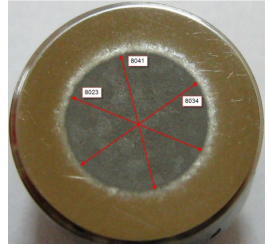
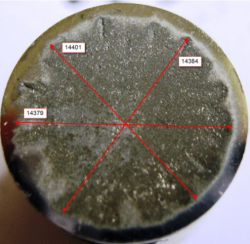

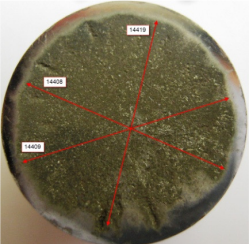
Deoarece tehnologia producerii de noi materiale este în plină dezvoltare, iar laboratoarele folosite pentru studiul eroziunii cavitației, în special aparatele vibratorii destinate acestui scop, funcționează pe principii și cu parametri diferiți, cum sunt cele utilizate în cadrul acestei teze, se impune evidențierea diferențelor ce apar în suprafața erodată pe durata atacului cavitației. În acest sens, în cadrul acestui paragraf se prezintă și se analizează diferențele și asemănările distrugerii produse prin cavitație vibratoare în cele două aparate, magnetostrictiv cu tub de nichel (T1) și cu cristale piezoceramice (T2). Analiza se face pe baza evoluției ariei erodate, ca extindere în plan și în adâncime și a mecanismului distrugerii. Pentru aceasta se folosesc fotografiile ale suprafeței erodate (la 3 timpi caracteristici de atac) și ale microstructurii distruse (în cele 165 minute de atac), realizate cu aparate fotografice și microscopie performante (din cadrul laboratorului de cavitație și al Centrului de Cercetări și Expertizări Materiale Speciale (CEMS) de la Universitatea Politehnica București).

3.3. Compararea rezultatelor experimentale 93

Pentru obiectivul propus, s-au ales două oțeluri dintre cele opt încercate, și anume oțelul cu cea mai bună rezistență (10 %Ni, 6 %Cr, 0,1 %C) și oțelul cu cea mai scăzută rezistență (10 %Ni, 18 %Cr, 0,036 %Cr). Din fiecare tip de oțel s-a studiat câte o probă, pentru fiecare din aparatele vibratoare.

În tabelul 3.8 sunt prezentate aspecte ale suprafețelor erodate, la trei timpi caracteristici (15, 90 și 165 minute) și modul de determinare, prin trei măsurători, a diametrului mediu al ariei erodate, pentru una din cele trei probe, ale fiecărui material. Din acest tabel se poate remarca o primă diferență, cu privire la extinderea ariei erodate în suprafața atacată.


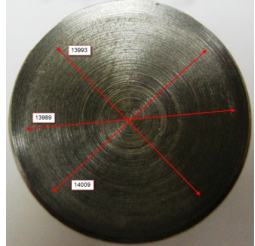
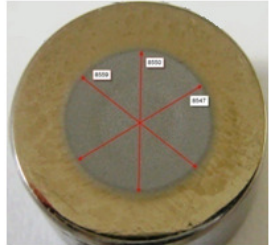
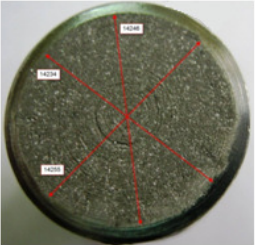


Tabelul 3.8 Aspectul stereomicrostructural și măsurarea zonei afectate de cavitație, x8 - după 165 minute de atac.

Elementele de referință pentru oțelul analizat	Durata atacului cavitației, min	Aparatul T1	Aparatul T2
10 %Ni, 6 %Cr, 0,1 %C 32 % martensită, 68 % austenită	15		
		$D_m = 7537 \text{ } [\mu\text{m}], P = 28,98\%$	$D_m = 14105 \text{ } [\mu\text{m}], P = 76,95 \%$
	90		
		$D_m = 8028 \text{ } [\mu\text{m}], P = 32,88 \%$	$D_m = 14373 \text{ } [\mu\text{m}], P = 82,75 \%$
	165		
		$D_m = 8449 \text{ } [\mu\text{m}], P = 36,42\%$	$D_m = 14396 \text{ } [\mu\text{m}], P = 83,01 \%$

D_m - diametrul mediu al suprafeței afectate prin cavitație, $<\mu\text{m}>$

P - procentul suprafeței afectate prin cavitație, %

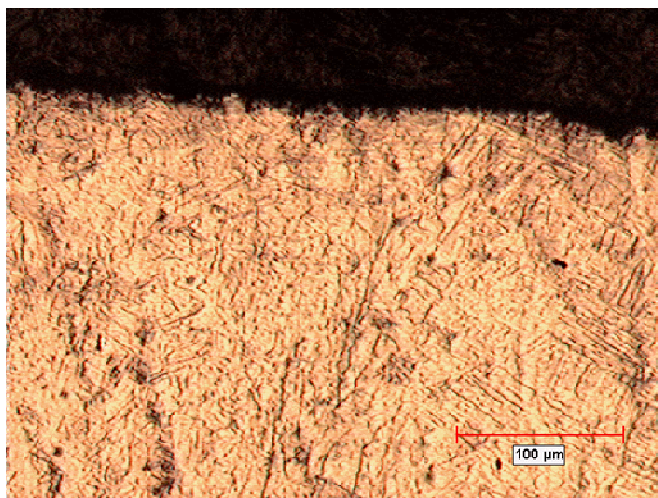
Tabelul 3.8 Aspectul stereomicrostructural și măsurarea zonei afectate de cavitație, x8 - după 165 minute de atac. Continuare

Elementele de referință pentru oțelul analizat	Durata atacului cavitației, min	Aparatul T1	Aparatul T2
10 %Ni, 18 %Cr, 0,036 %C 93 %austenită, 7 % ferită	15		
		$D_m = 7837 \text{ } [\mu\text{m}], P = 31,33 \%$	$D_m = 14012 \text{ } [\mu\text{m}], P = 56,33 \%$
	90		
		$D_m = 8260 \text{ } [\mu\text{m}], P = 34,81 \%$	$D_m = 14260 \text{ } [\mu\text{m}], P = 90,26 \%$
	165		
		$D_m = 8577 \text{ } [\mu\text{m}], P = 37,53 \%$	$D_m = 14551 \text{ } [\mu\text{m}], P = 92,1 \%$

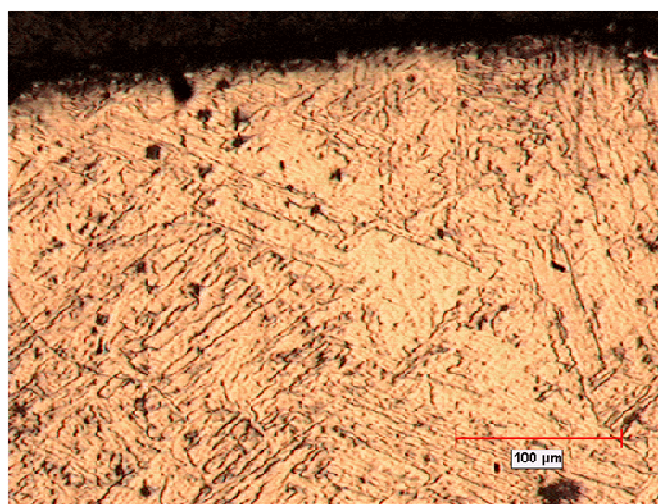
D_m – diametrul mediu al suprafeței afectate prin cavitație, $\langle \mu\text{m} \rangle$

P – procentul suprafeței afectate prin cavitație, %

3.3. Compararea rezultatelor experimentale 95

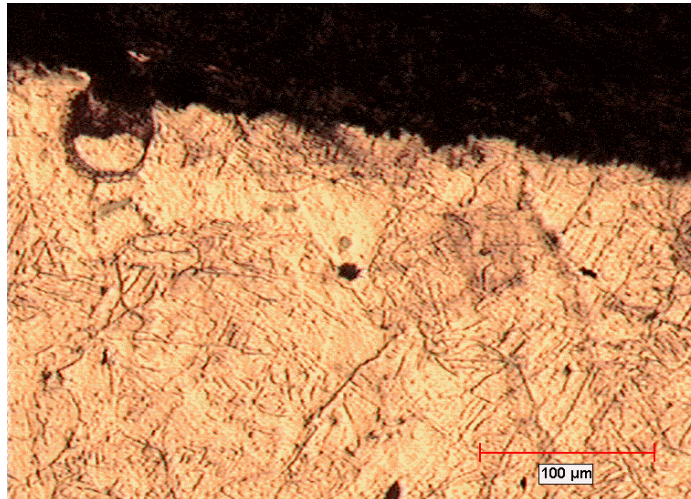


a) Aparatul T1

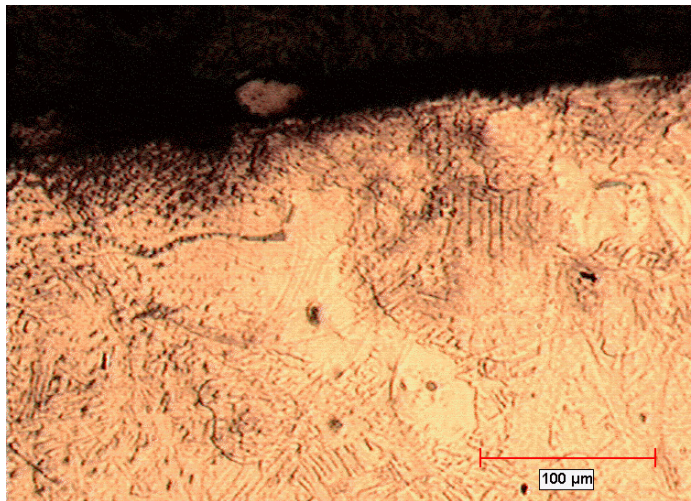


b) Aparatul T2

Fig. 3.61 Profilograma distrugerii (secțiune axială prin centrul suprafeței erodate prin cavitație) -10 %Ni, 6 %Cr, 0,1 %C
68 %austenită, 32 % martensita



a) Aparatul T1



b) Aparatul T2

Fig. 3.62 Profilograma distrugerii (secțiune axială prin centrul suprafeței erodate prin cavitație) -10 %Ni, 18 %Cr, 0,036 %C
93 %austenită, 7 % ferită

Urmărirea procesului de distrugere prin eroziune în suprafața probei, expusă atacului cavitației, cu ajutorul microscopului optic (mărire 4x și 8x), dar vizibil și cu ochiul liber, arată unele diferențe:

1. La probele cavitate cu aparatul magnetostriktiv cu tub de nichel T1 eroziunea după primele 15 minute de atac, se produce pe un inel central cu diametru foarte mic, sub 8 mm. Pe parcursul atacului, diametrul suprafeței

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 97

2. erodate se extinde în profunzime și spre exterior, ajungând ca la finalul atacului (165 minute) valoarea medie să fie în jurul a 8,5 -8,6 mm;
3. La probele cavitate cu aparatul cu cristale piezoceramice T2 eroziunea cavitațională, încă din primele minute de atac, începe din apropierea diametrul exterior (14-14,6 mm) al suprafeței probei supuse atacului și evoluează, până la final, foarte mult în adâncime și ne semnificativ spre exterior.

Distrugerea unui material, prin cavitația produsă în aparatele vibratorii, este dependentă de forma și dimensiunea norului de bule cavitaționale, atașat la suprafața probei, dependent și el de principalii parametri ai aparatului (frecvență și amplitudine vibrații), care influențează atât evoluția ariei suprafeței erodate, cât și profunzimea [2], [13]. Din analizele anterioare (realizate pe seama curbelor caracteristice de eroziune MDE (t) și MDER(t), precum și a valorii parametrului MDER, din zona de stabilizare a eroziunii), apreciez că gradul de profunzime a eroziunii este influențată mai mult de amplitudinea vibrației, iar evoluția ariei erodate de frecvența vibrației.

Imaginile, realizate cu microscopul optic, din fig. 3.61 și 3.62, arată că indiferent de tipul aparatului (magnetostrictiv cu tub de nichel sau cu cristale piezoceramice) și de parametrii săi, folosit pentru producerea eroziunii cavitaționale, distrugerea structurală este supusă aceluiași mecanism de deformare, propagare a fisurii și rupere.

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație. Investigații metalografice

3.4.1. Aparatura și metoda utilizate

După încheierea încercărilor, probele au fost examinate cu un stereomicroscop marca OLYMPUS SZX (Fig. 3.63). Acesta are mai multe mărimi diferite și, de asemenea, un sistem de mărire zoom. Distanța de lucru este mai mare decât a unui microscop complex tipic, permițând ca analiza 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 iluminat în funcție de scopul utilizării.

Microscopul electronic Philips XL 30 ESEM a fost folosit pentru obținerea unor imagini cu un grad mare de mărire, precum și pentru obținerea diagramelor EDAX.



Fig. 3.63 Stereomicroscopul OLYMPUS SYX7.

Aparatul Philips XL30 ESEM (Fig. 3.64) este un instrument unic în care probele pot fi examinate cu o rază cu emisie de câmp de electroni într-o cameră de presiune foarte mare. Aparatul prezintă două mari avantaje:

- Rezoluție/mărire foarte mare și un coeficient semnal/zgomot excelent atât în modul normal de vid înalt cât și în modul de mediu (Umed) datorită sursei de emisie de câmp de electroni.
- Modul „Umed” real (umiditate 100% în camera probei) și posibilitatea studierii probelor cu o presiune de până la 10 Torr în camera de lucru datorită unui detector de electroni secundar pentru medii gazoase, brevetat.

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 99



Fig. 3.64 Microscopul electronic cu baleiaj Philips XL30 ESEM.

Pe acest microscop se poate studia aproape orice probă de dimensiuni corespunzătoare fără ca aceasta să fie distrusă și fără să fie necesare operațiuni suplimentare de pregătire.

Caracteristicile tehnice

Rezoluția	2 μm
Tensiunea de accelerare	0,2 - 30 kV
Tunul de electroni	Emisie de Câmp
Mărirea	15 - 500 000 ori
Gradul de mișcare	Rotire $-15^\circ \div +75^\circ$
(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

Tăierea axială a probelor cavitate, pentru analiză metalografică, s-a făcut cu aparatul de tăiat cu pânză și lichid de răcire de tip Buehler 4000 (Fig. 3.65).



Fig. 3.65 Aparatul de tăiat cu pânză BUEHLER 4000

După debitare piesele au fost înglobate, la cald, în rășina polimerică, folosind un aparat tip Buehler Simplimet 1000 (Fig. 3.66).



Fig. 3.66 Aparatul de înglobat la cald BUEHLER SIMPLIMET 1000

Șlefuirea și lustruirea probelor înglobate s-a făcut pe un aparat Buehler Phoenix Beta. Acest aparat este echipat cu un cap de șlefuire/lustruire Buehler Vector (Fig. 3.67).



Fig. 3.67 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 101

În urma testelor cavitaționale timp de 165min, au urmat investigațiile metalografice pe suprafața atacată.

Astfel, a fost determinată adâncimea maximă de pătrundere și modul de distrugere a suprafețelor atacate prin cavitație, cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj Philips XL 30 ESEM (Fig. 3.64).

Pentru determinarea microstructurii probele au fost tăiate, axial, în jumătate, înglobate în rășina polimerică, șlefuite, lustruite și atacate metalografic.

Tăierea probelor s-a făcut pe mijlocul piesei, cu aparatul de tăiat de tip Buehler 4000 (Fig. 3.65) cu pânză și lichid de răcire. Pânza pentru tăiat a fost selectată în funcție de oțelul care urma a fi tăiat. Piese rezultate în urma tăierii au fost înglobate la cald în rășină polimerică cu aparatul Buehler Simplimet 1000 (Fig. 3.66). După înglobare s-a realizat șlefuirea și lustruirea, pe aparatul Buehler Phoenix Beta (Fig. 3.67), echipat cu cap de șlefuire/lustruire Buehler Vector. Pânzele și emulsiile folosite la șlefuire și lustruire au fost selectate, din catalogul producătorului de echipament, conform recomandărilor, funcție de tipul oțelului. După fiecare schimbare de pânză, piesa înglobată a fost spălată. Pentru lustruire, ca emulsie a fost folosită alumina.

Atacul metalografic s-a făcut cu apă regală (1/4 HNO₃ acid azotic – 3/4 HCl acid clorhidric și 1-2 picături de glicerină) și un compus format din 1/10 HNO₃ acid azotic.

După ce probele au fost atacate metalografic s-au determinat microstructurile, cu ajutorul microscopului OLYMPUS SYX7 (Fig. 3.85).

3.4.2. Microstructura erodată. Fenomenologia degradărilor prin cavitație

Pentru evidențierea aspectului exterior al oțelurilor supuse atacului cavitațional am efectuat o analiză microscopică a acestora. De asemenea, am măsurat și adâncimile maxime de eroziune, MDE_{max} , a acestor oțeluri. În imaginile ce urmează, fig.3.68 - fig. 3.75 (pentru T1), respectiv fig. 3.76 – fig.3.85 (pentru T2), sunt prezentate imagini ale suprafețelor erodate, după 165 de minute de atac cavitațional, precum și metoda de calculare a suprafeței afectate, prin măsurarea a trei diametre și calcularea mediei aritmetice a acestora. Diametrele medii și procentele suprafețelor afectate de eroziunea cavitației sunt centralizate în Tabelul 9 (pentru aparatul T1) și în Tabelul 10 (pentru aparatul T2).

După finalizarea încercărilor de cavitație, probele au fost supuse unei serii de investigații, privind: studierea microstructurii probelor, analizarea suprafeței atacate cavitațional cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj pentru determinarea modului de distrugere și măsurarea adâncimii maxime a eroziunii, precum și evidențierea adâncimii maxime a pătrunderii eroziunii în secțiunea realizată.

Deoarece s-a constatat faptul că probele confecționate din același material au avut un comportament similar pe cele două aparate vibratorii, diferența fiind doar de scară datorită amplitudinii mai mari și a frecvenței mai mici a aparatului T1 față de aparatul T2, rezultatele și comentariile obținute pentru probele confecționate din același material vor fi prezentate împreună.

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 6% crom și 0,1% carbon. Constituția microstructurală: 32% martensită și 68% austenită - Fig. 3.68 și 3.69

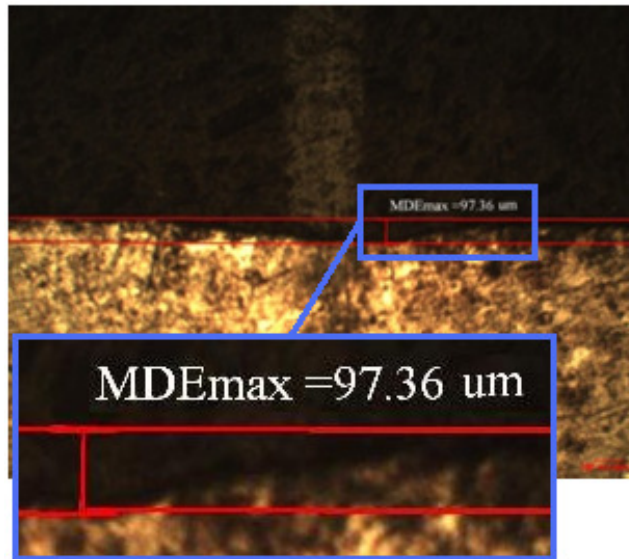
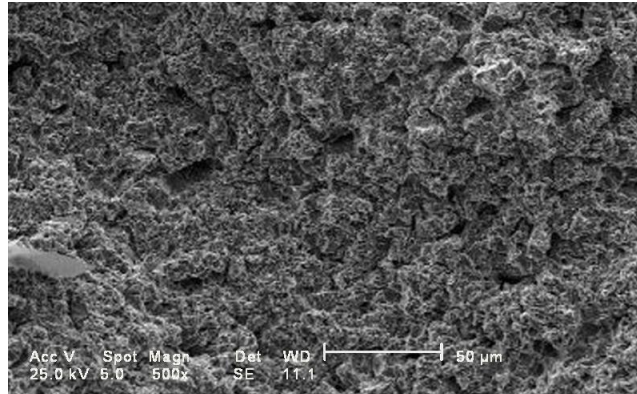


Fig. 3.68 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500)- Aparatul T1.

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 103

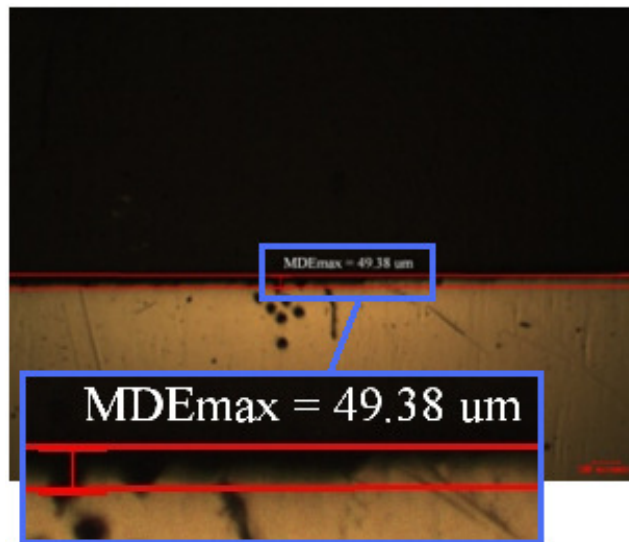
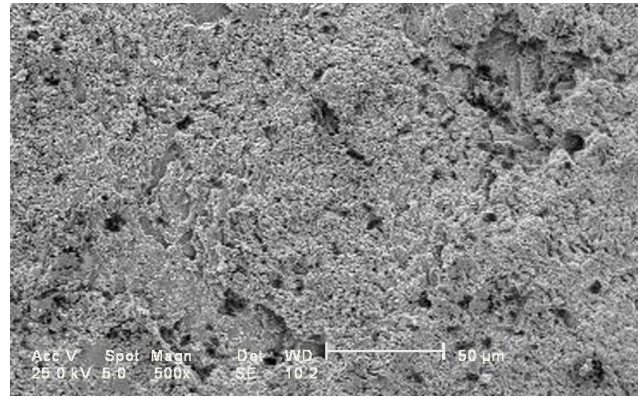


Fig. 3.69 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T2

Suprafețele examinate prezintă un aspect mixt cu cavități foarte fine și goluri uniform distribuite pe suprafață. Cavitățile au o propagare intergranulară, cu incluziuni nemetalice și zone de clivaj. Ruperea are un aspect fragil, cu evidențierea zonelor de clivaj cu grăunți secționati transcristalin.

**Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 10% crom și 0,1% carbon.
Constituția microstructurală: 100% austenită – fig.3.70 și 3.71.**

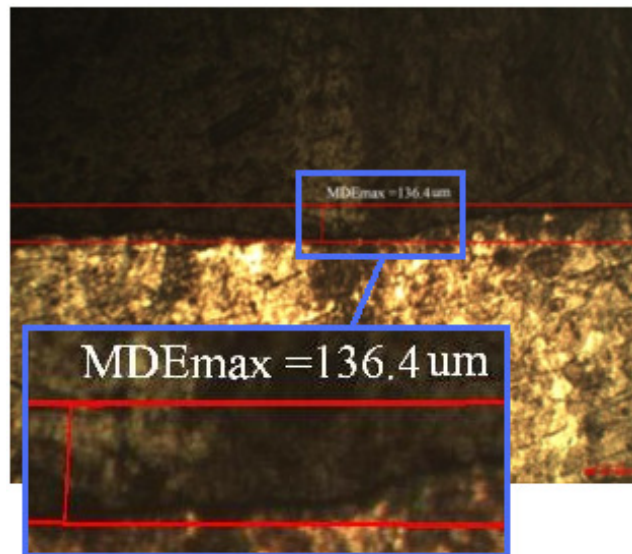
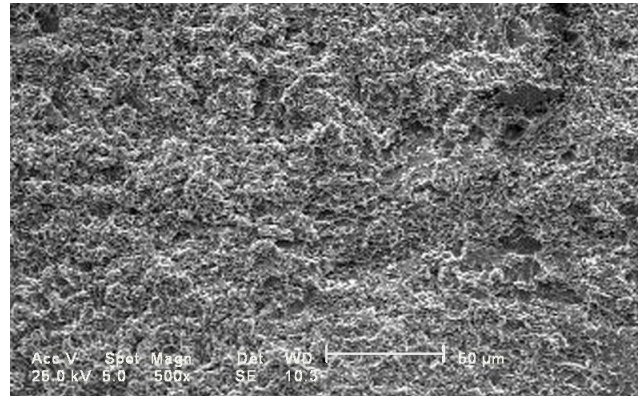


Fig. 3.70 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 105

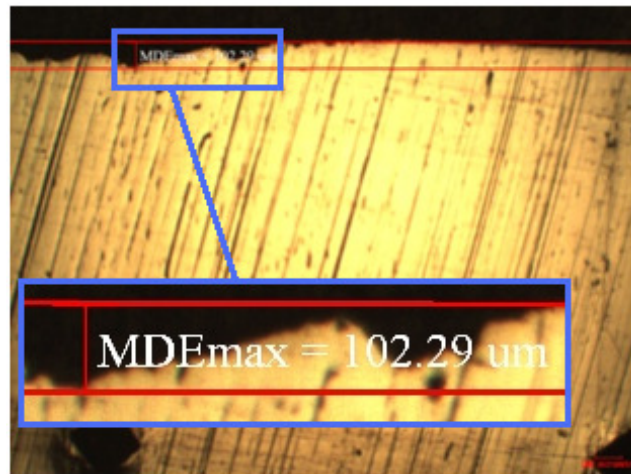
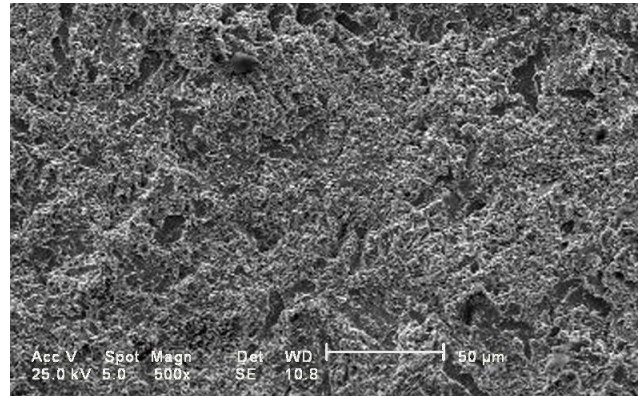


Fig. 3.71 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T2

La analiza suprafețelor atacate cavitațional s-au observat cavități cu diametre mari, de peste 200 µm, fisuri intergranulare, plane de clivaj. Ruperea prezenta un caracter fragil propagată prin linii de alunecare. Caracterul fragil al ruperii este confirmat și de așezarea neuniformă a punctelor experimentale față de curbele analitice de aproximare (paragraful 3.2.2.1).

**Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 18% crom și 0,1% carbon.
Constituția microstructurală: 98% austenită și 2% ferită – fig.3.72 și 3.73.**

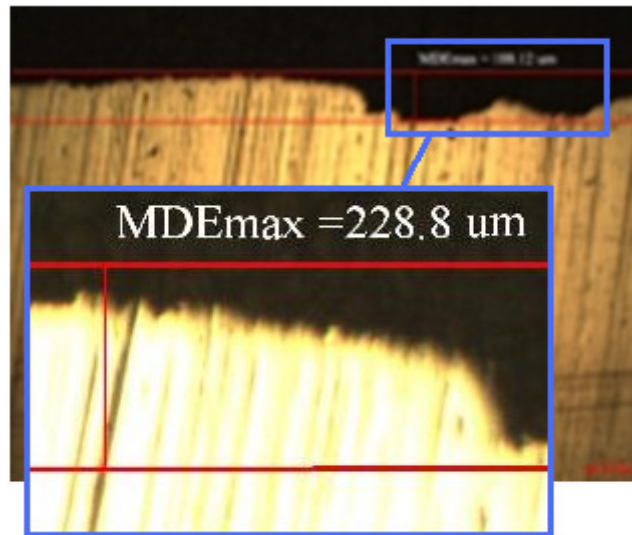
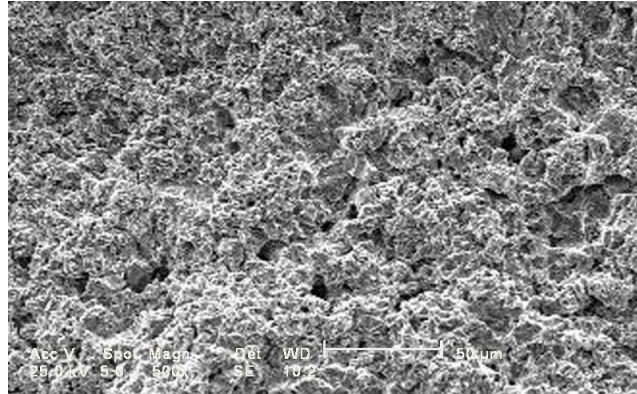


Fig. 3.72 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 107

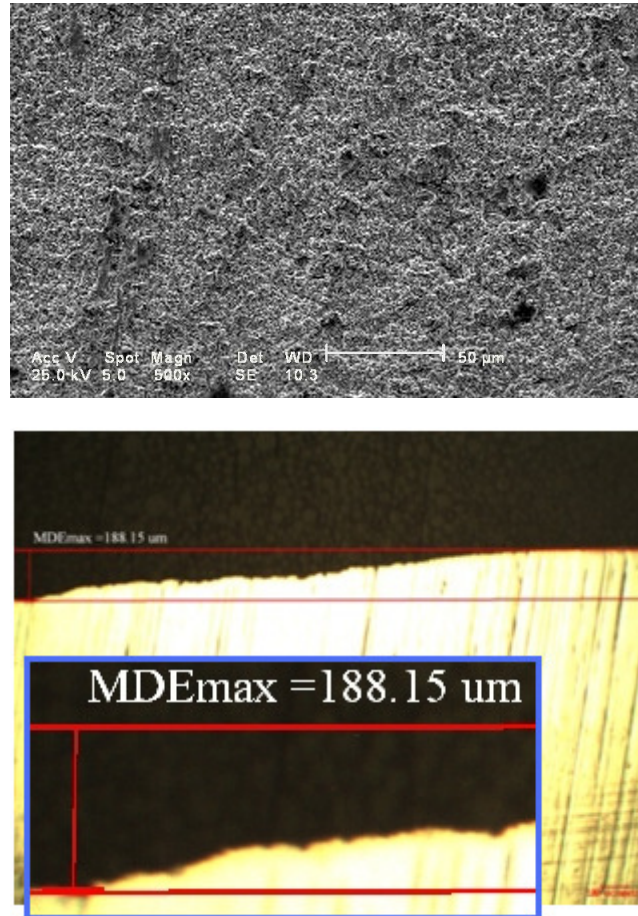


Fig. 3.73 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T2

Eroziunea cavitațională de pe suprafețele analizate prezintă un aspect mixt de propagare a frontului prin fisuri intergranulare și plane de clivaj. Ruperea are un caracter fragil, lucru confirmat și de distribuția punctelor față de curbele analitice (vezi paragraful 3.2.2.1)

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 24% crom și 0,1% carbon. Constituția microstructurală: 81% austenită și 19% ferită – fig. 3.74 și 3.75.

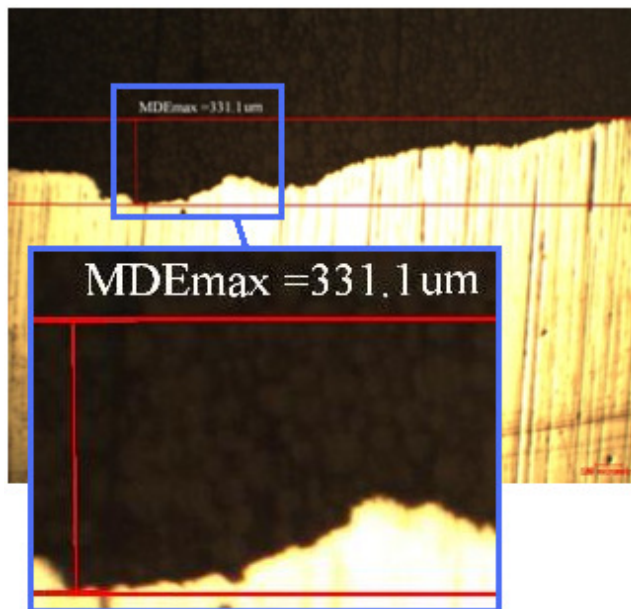
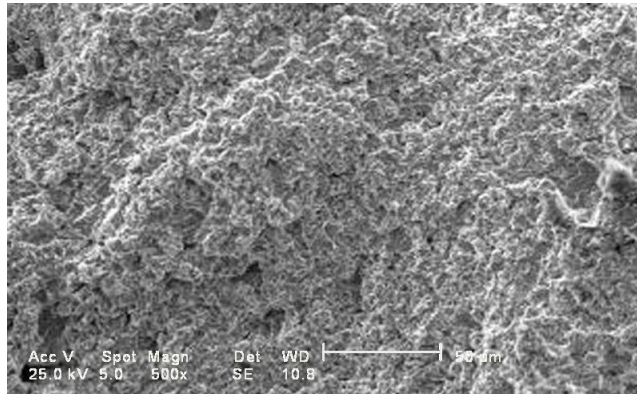


Fig. 3.74 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 109

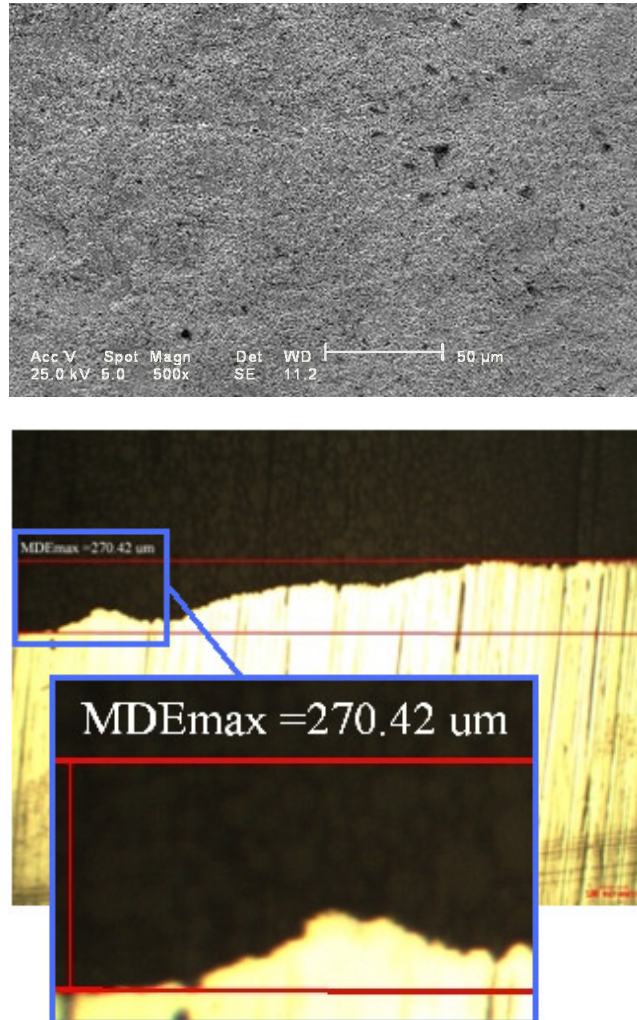


Fig. 3.75 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T2

Probele analizate prezintă cavități cu diametre mari, de peste 200 μm, pe suprafața cărora se evidențiază aspectul intergranular al coroziunii. De asemenea, s-au constatat suprafețe cu evidențierea liniilor de macle, a fisurilor intergranulare și a numeroase puncte de coroziune pe linii de macle. Ruperea are o propagare preferențială transcristalină și intergranulară.

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 13% crom și 0,036% carbon. Constituția microstructurală: 55% martensită și 45% austenită – fig.3.76 și 3.77

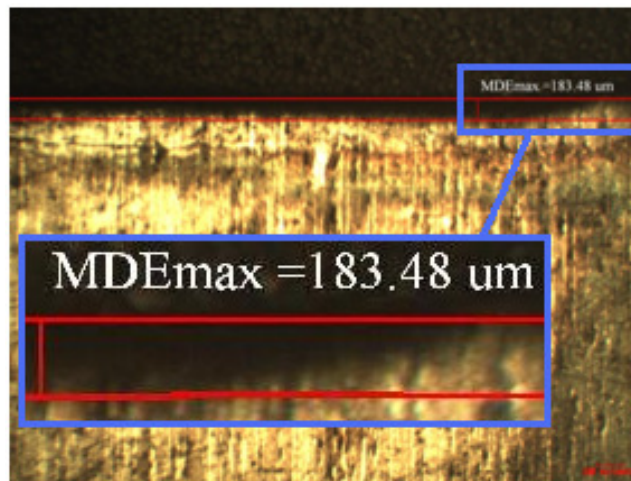
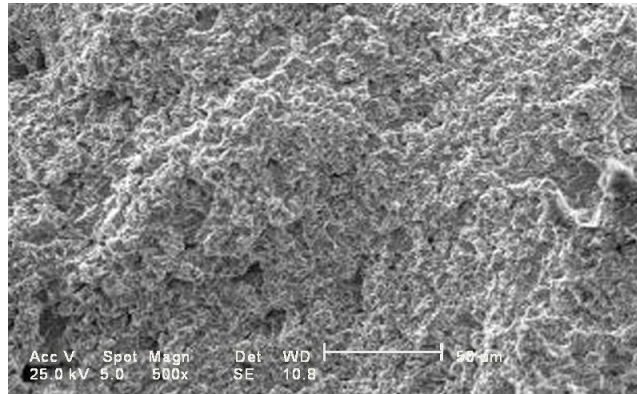


Fig. 3.76 suprafețe erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 111

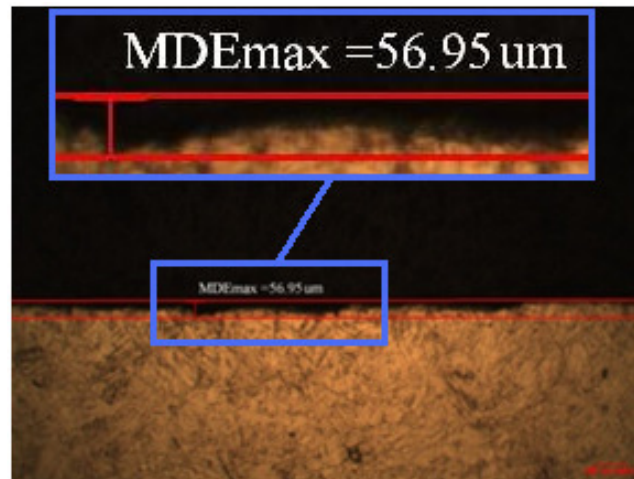
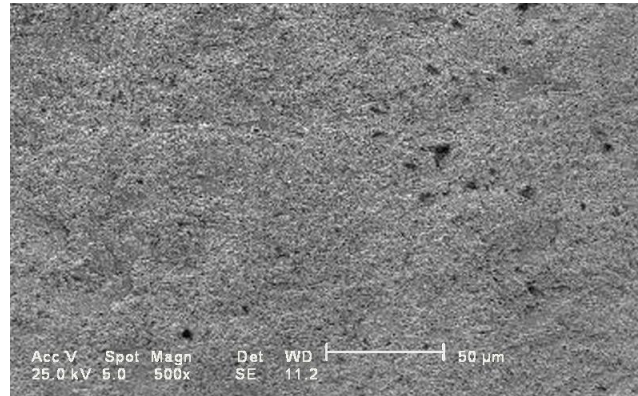


Fig. 3.77 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T2

Eroziunea cavitațională prezentă pe probele examinate prezintă aspecte de rupere fragilă, cu cavități de dimensiuni alternative. Propagarea acesteia se face prin fisuri intergranulare și plane de clivaj.

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 14% crom și 0,036% carbon. Constituție microstructurală: 30% martensită și 70% austenită – fig.3.78 și 3.79.

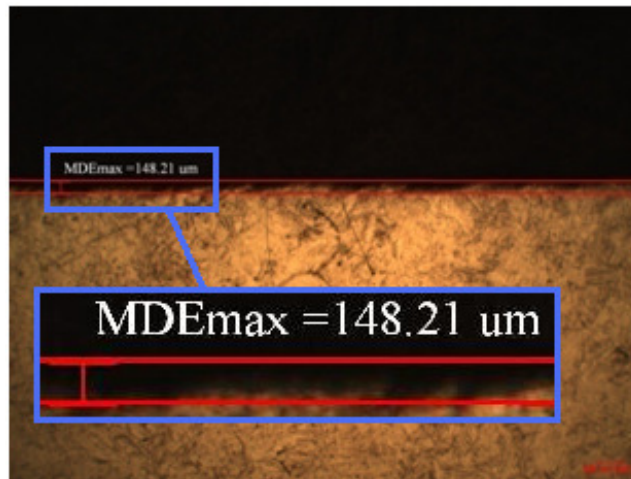
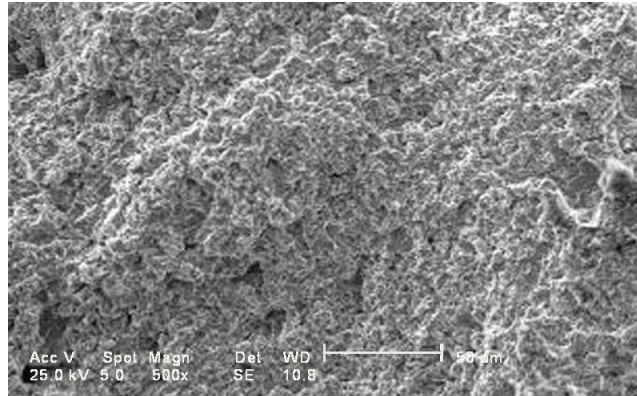


Fig. 3.78 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 113

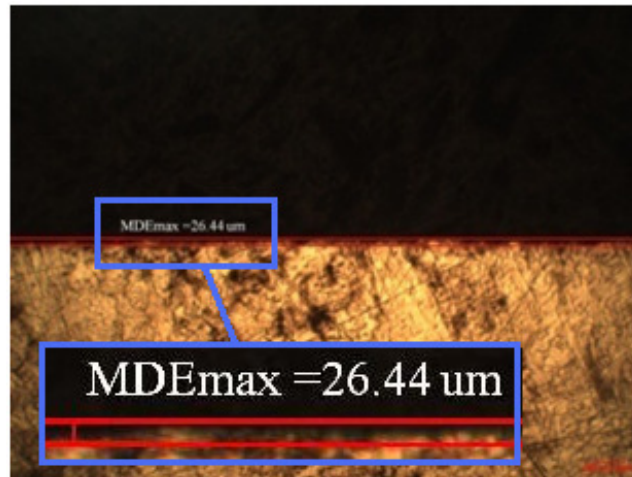
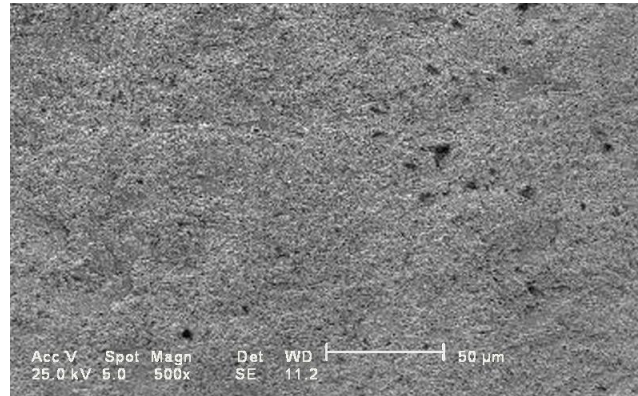


Fig. 3.79 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T2

Suprafețele examinate prezintă proporții egale de cavități fine și foarte fine. De asemenea se pot observa fisuri intergranulare, care separă cavități de diferite dimensiuni. Ruperea are un caracter fragil cu propagare intergranulară a fisurilor.

Pentru următoarele două oțeluri (cu 16 %Cr, 0,036 %C, structură 100 austenită și cu 18 %Cr, 0,036 %C, structură bifazică formată din 93 % austenită și 7 % ferită), fig.3.68 și 3.71, se prezintă și imaginile EDAX, realizate în cadrul CEMS al Universității Politehnice din București.

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 16% crom și 0,036% carbon. Constituție microstructurală: 100% austenită – fig.3.80, 3.81 și 3.82.

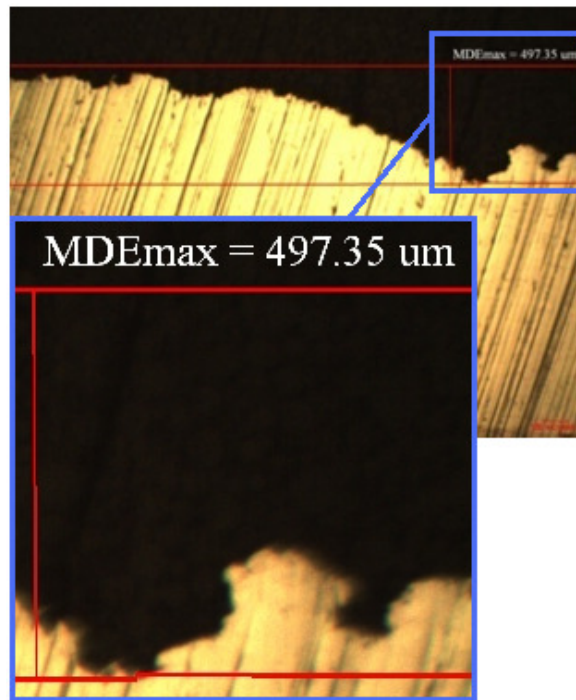
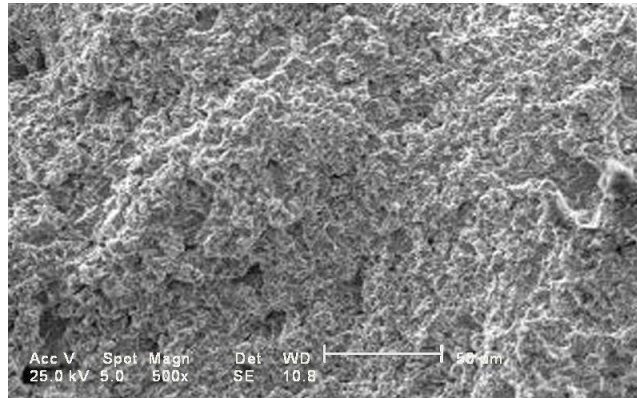


Fig. 3.80 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T1

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 115

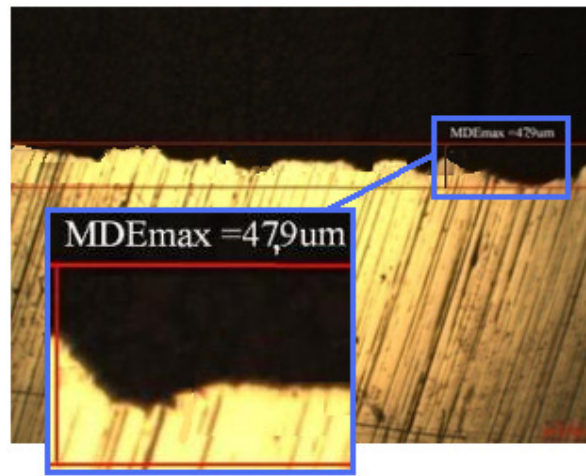
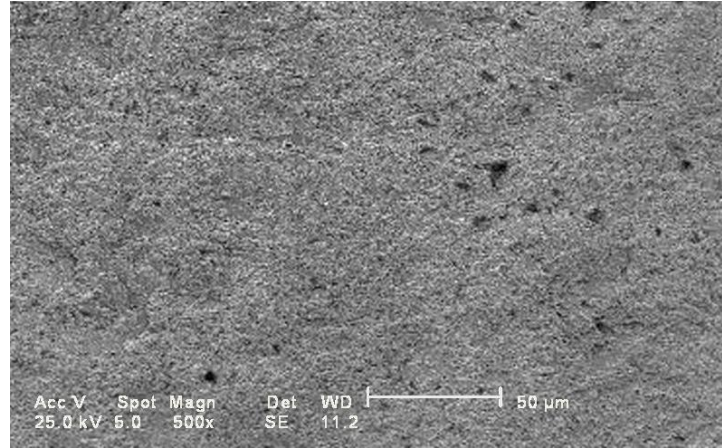


Fig. 3.81 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T2

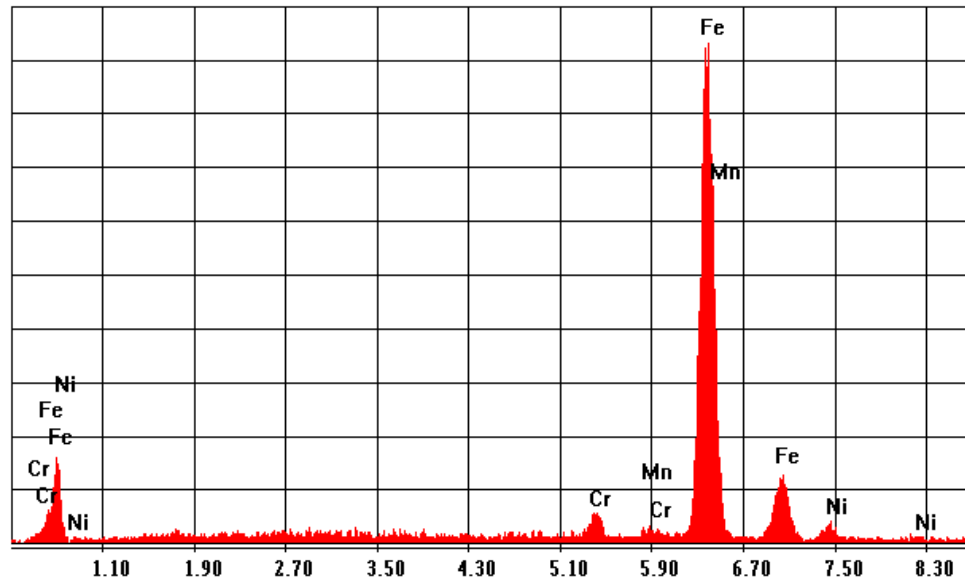


Fig. 3.82 Diagrama EDAX

Probele erodate au un aspect mixt cu cavități foarte fine și goluri uniform distribuite pe suprafață. Au putut fi observate zone de clivaj, goluri fine și fisuri intergranulare cu propagare radială. Ruperea are un caracter fragil cu propagare intergranulară.

Pentru acest oțelul inoxidabil, cu structură de austenită, s-au folosit fișele ICDD și, astfel, din spectrul de raze X și s-a identificat prezența austenitei (γ) aliată cu nichel și crom, având intensitatea maximă a peak-ului principal la unghiuri de difracție $2\theta = 19.916^\circ$ și $2\theta = 32.785^\circ$.

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 117

Oțelul inoxidabil cu 10% nichel, 18% crom și 0,036% carbon. Constituție microstructurală: 93% austenită și 7% ferită - fig.3.83, 3.84 și 3.85.

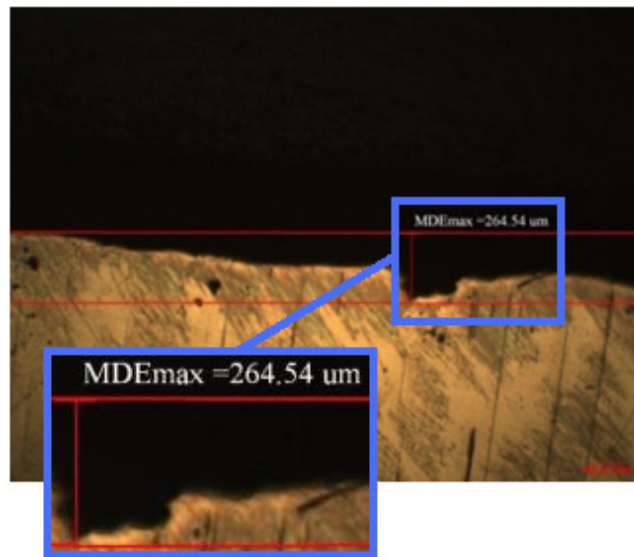
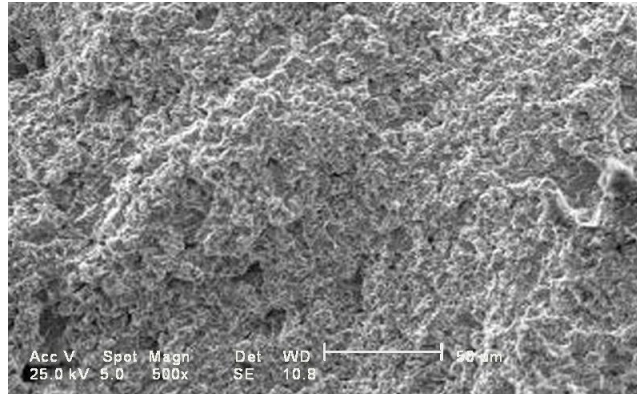


Fig. 3.83 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) - Aparatul T1

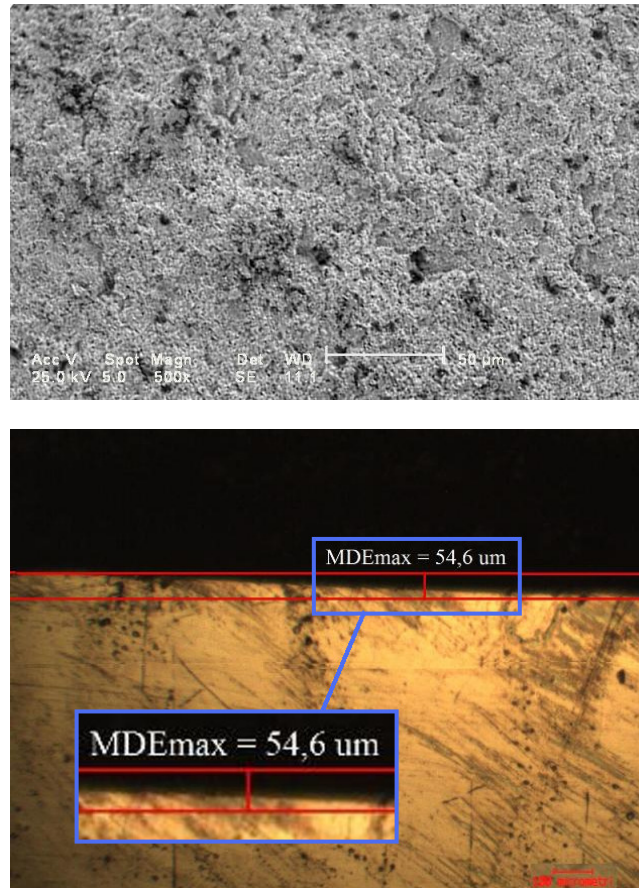


Fig. 3.84 Imaginea suprafeței erodate cu adâncimea maximă măsurată a eroziunii după 165 minute de atac al cavitației - microscopul electronic cu baleiaj (SEM), (x500) – Aparatul T2

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 119

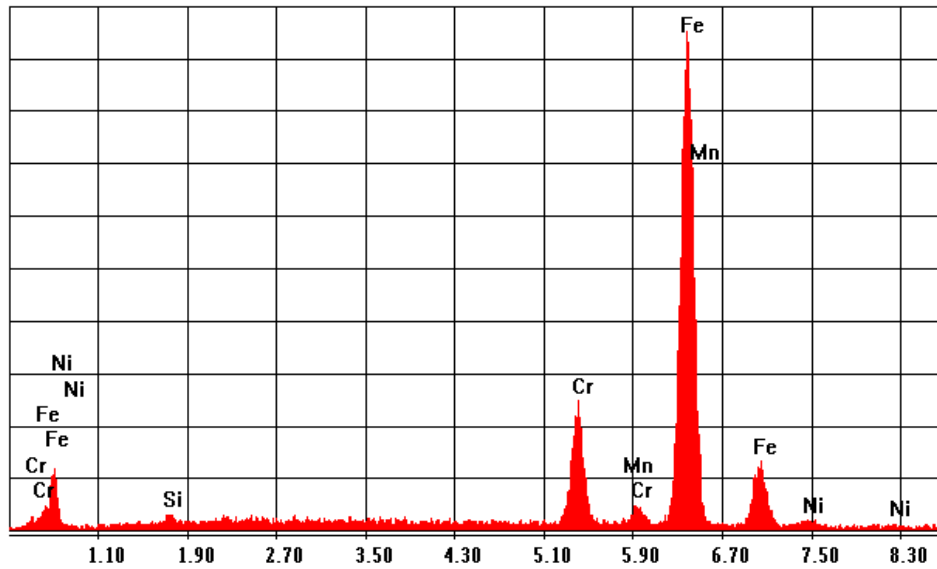


Fig. 3.85 Diagrama EDAX

Suprafețele analizate prezintă cavități mari. Ruperea are un caracter fragil cu propagare intergranulară și prin clivaj. S-au constatat fisuri secundare, plane de clivaj și propagarea ruperii pe linii de alunecare. Diferențele semnificative dintre valorile punctelor experimentale și curbele analitice de aproximație corespund ruperii cu caracter fragil constatată la analiza metalografică.

În cazul acestui oțel inoxidabil, prin difracție au fost identificate austenita (γ) aliată cu crom și nichel și prezența feritei (α) aliată cu nichel. Această situație a apărut datorită proporției prea mici a unor elemente din compoziția chimică.

În figurile 3.86 și 3.87 sunt puse în evidență, pentru comparație, adâncimile medii de eroziune, MDE, calculate pentru cele 165 minute, iar în fig. 3.88 și 3.89 aceleași adâncimi sunt comparate cu cele măsurate, $MDE_{m\grave{a}s}$ conform datelor din figurile anterioare.

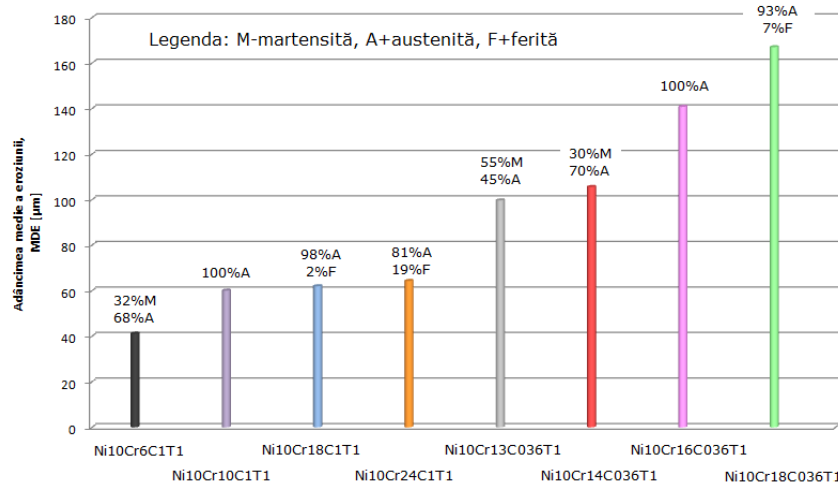


Fig. 3.86 Adâncimea medie a eroziunii funcție de microstructura oțelurilor cercetate - Aparatul T1

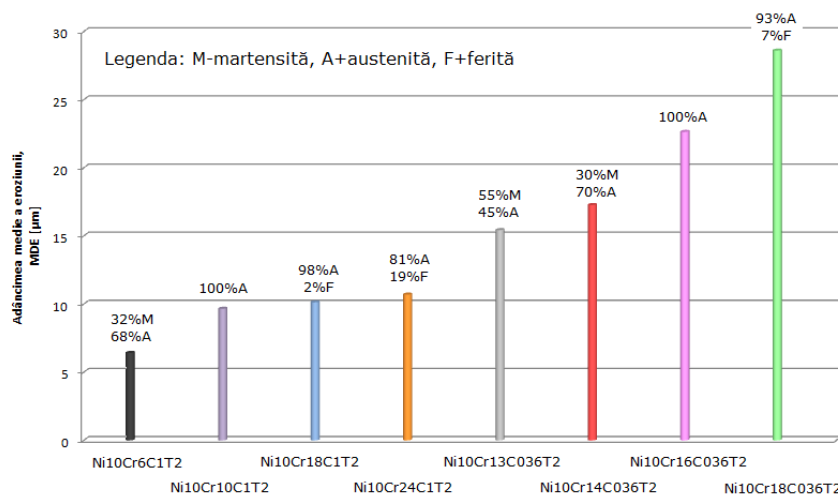


Fig. 3.87 Adâncimea medie a eroziunii funcție microstructura oțelurilor cercetate - Aparatul T2

Se observă că cea mai mică valoare a adâncimii medii de eroziune, după cele 165 minute de atac, pentru cavitația realizată în ambele aparate (T1 și T2), este obținută pentru oțelul cu 32 % martensită și 68 % austenită (10 %Ni, 6 %Cr și 0,1 %C). Apreciez că această rezistență se datorează prezenței martensitei (în proporție importantă 32 %) dar și carbonului, element alfa-gen, în proporție de aproximativ 0,1 %.

Cea mai ridicată adâncime medie de pătrundere a eroziunii (la ambele aparate) s-a obținut pentru oțelul cu 93 % austenită, 7 % ferită și 0,036 % carbon. De altfel, se observă că pentru oțelurile cu 0,036 % carbon adâncimile medii de

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 121

eroziune, indiferent de tipul aparatului folosit, au valori mai mari decât în cazul oțelurilor cu circa 0,1 % carbon.

Deși, carbonul, în aceste cazuri, ajută la creșterea rezistenței la cavitație consider că oțelurile cu 0,036 % carbon sunt recomandabile pentru componentele pompelor și turbinelor hidraulice, datorită disponibilității lor, mai ridicate, la operațiile de sudare, destul de frecvente în perioadele de reparații curente și capitale.

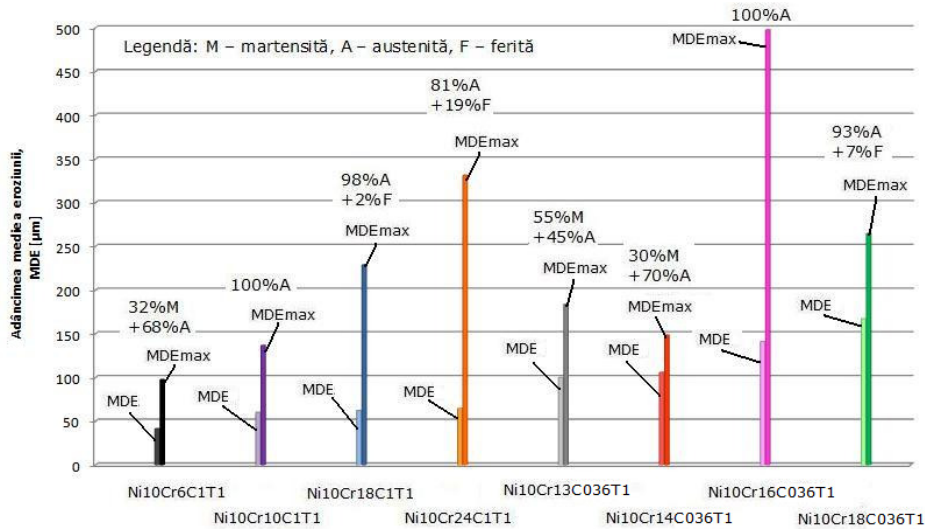


Fig.3.88 Comparatii între adâncimile de eroziune a cavitației (medie calculată și maximă măsurată), realizate după 165 minute de atac al cavitației – Aparatul T1

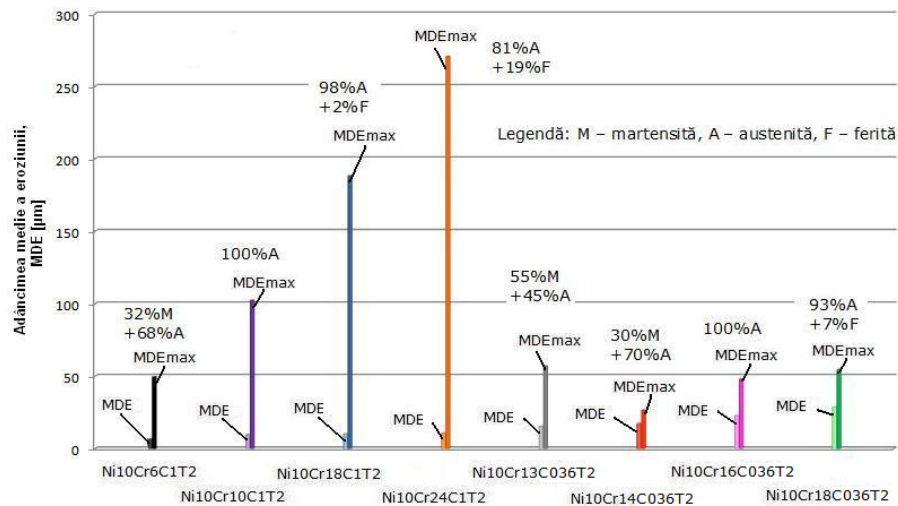


Fig.3.89 Comparatii între adâncimile de eroziune a cavitației (medie calculată și maximă măsurată), realizate după 165 minute de atac al cavitației – Aparatul T2

Imaginile din figurile 3.88 și 3.89 arată o foarte puternică diferență între valorile medii calculate, MDE, pe baza masei de material expulzat în cele 165 minute de atac al cavitației și cea mai mare valoare a cavernei creată, MDE_{max} și aflată în secțiunea axială realizată prin suprafața erodată. Prin aceste diferențe se certifică necesitatea folosirii parametrului MDE ca element de comparație, al materialelor, din punct de vedere al rezistenței la cavitație și folosirea, în practică, a parametrului MDE_{max} în estimarea volumului de electrozi, necesari la reparațiile curente și capitale, ale eroziunilor de la paletele și rotoarele pompelor și turbinelor hidraulice.

De asemenea, aceste histograme, arată că o eventuală ordonare a oțelurilor cercetate, după parametrul MDE_{max} , este identică pentru cele două aparate. Pentru aparatul T1, cea mai mare valoare este măsurată la oțelul cu 16 % Cr și 0,036 %C (structură 100 % austenită), iar pentru probele testate în aparatul T2 cea mai adâncă cavernă este realizată la oțelul cu 24 % Cr și 0,1 %C (cu o structură bifazică de austenită 81% și ferită 19%). Acest aspect confirmă, încă odată, complexitatea procesului mecanic al eroziunii cavitației și dependenței sale de parametrii funcționali ai aparatului (în special amplitudine și frecvență) precum și de structura și proprietățile sale mecanice.

3.4.3. Efectul atacului cavitației și a constituenților microstructurali asupra microdurității din suprafața erodată

Este știut că austenita, în special cea instabilă (neabordată în cadrul tezei, ca element distinct și decisiv), prin impactul cu microjeturile și undele de șoc, rezultate din implozia bulelor cavitaționale, se durifică [104] și contribuie la creșterea rezistenței la atacurile cavitației [13], [71]. Prin urmare, în acest paragraf am dorit să pun în evidență efectul microdurității Vickers, măsurată la finalul celor 165 minute de atac, asupra valorii rezistenței la cavitație, exprimată prin parametrul $1/MDER$.

Valorile microdurității Vickers au fost determinate la o distanță de aproximativ 1-2 mm, având o eroare de măsurare de $\pm 2,3\%$, fig.3.90 și sunt sintetizate în tabelul 3.9. Determinările au fost realizate doar pentru probele testate în aparatul T1, pe considerentul că, concluziile vor fi aceleași și în cazul probelor testate în aparatul T2. La baza acestui considerent, stau analizele realizate pe baza parametrului MDER, din zona de stabilizare a eroziunii cavitației și a curbelor caracteristice eroziunii $MDE(t)$ și $MDER(t)$.

3.4. Analiza microstructurii erodate prin cavitație 123

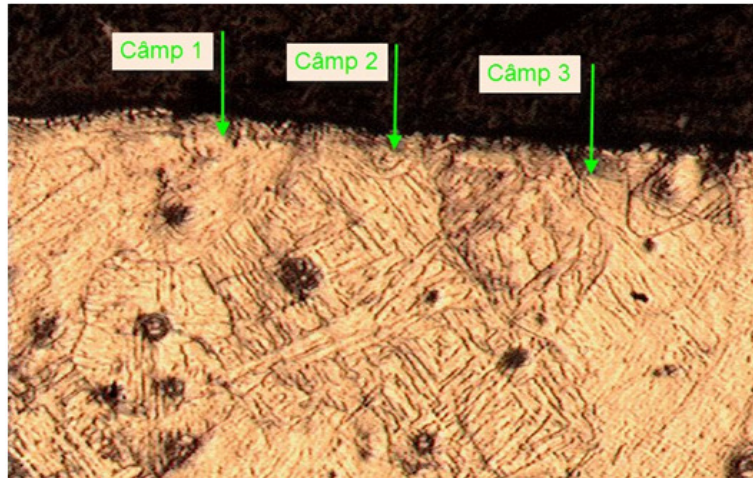


Fig. 3.90 Determinarea microdurității Vickers în stratul adiacent suprafeței atacate cavitațional

Tabelul 3.9 Variația valorilor de microduritate la oțelurile inoxidabile investigate

Oțelul inoxidabil	Microduritatea Vickers ($HV_{0,1}$)			
	Câmp 1	Câmp 2	Câmp 3	Medie
Ni10Cr6C1T1	245	256	270	257
Ni10Cr10C1T1	230	236	239	235
Ni10Cr18C1T1	212	219	214	215
Ni10Cr24C1T1	213	209	214	212
Ni10Cr13C036T1	243	259	269	257
Ni10Cr14C036T1	256	272	258	262
Ni10Cr16C036T1	241	232	238	237
Ni10Cr18C036T1	237	221	226	228

După determinarea microdurităților din stratul superficial, am construit dependențe grafice ale acestuia cu adâncimea medie cumulată MDE, la finalul celor 165 minute de atac, fig. 3.91, viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, MDER, fig. 3.92 și rezistența la cavitație, $1/MDER$, fig. 3.93.

Notatiile utilizate în fig.3.91-3.93 sunt: **9**-Ni10Cr6C1T1; **10**-Ni10Cr10C1T1; **11**-Ni10Cr18C1T1; **12**-Ni10Cr24C1T1; **13**-Ni10Cr13C036T1; **14**-Ni10Cr14C036T1; **15**-Ni10Cr16C036T1; **16**-Ni10Cr18C036T1

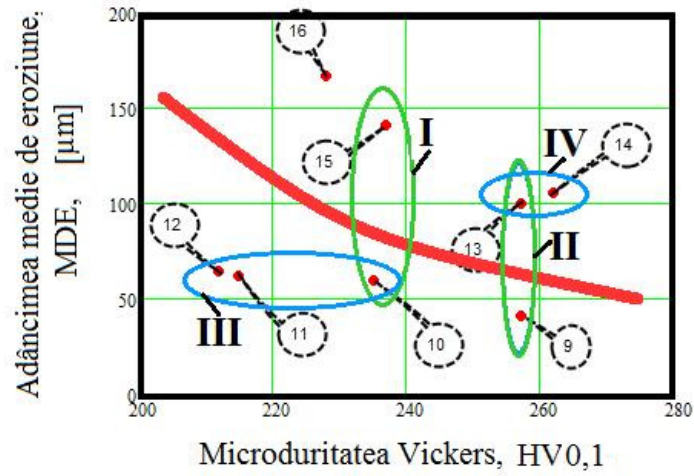


Fig. 3.91 Variația adâncimii medii a eroziunii în raport cu microduritatea pentru oțelurile testate pe aparatul vibrator T1.

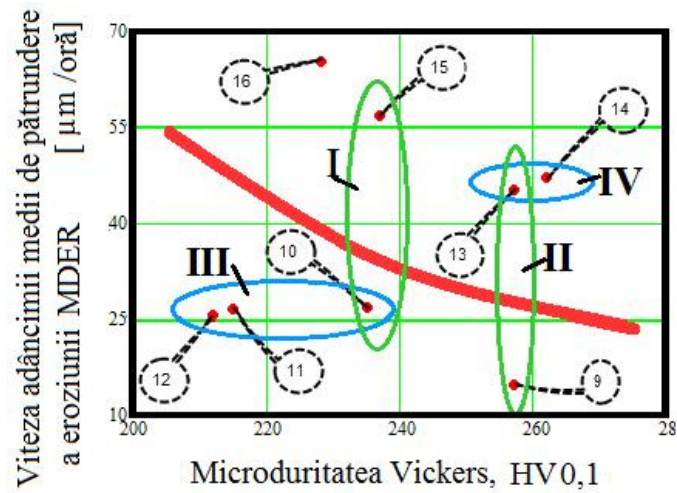


Fig. 3.92 Variația vitezei adâncimii medii a eroziunii în raport cu microduritatea pentru oțelurile testate pe aparatul vibrator T1.

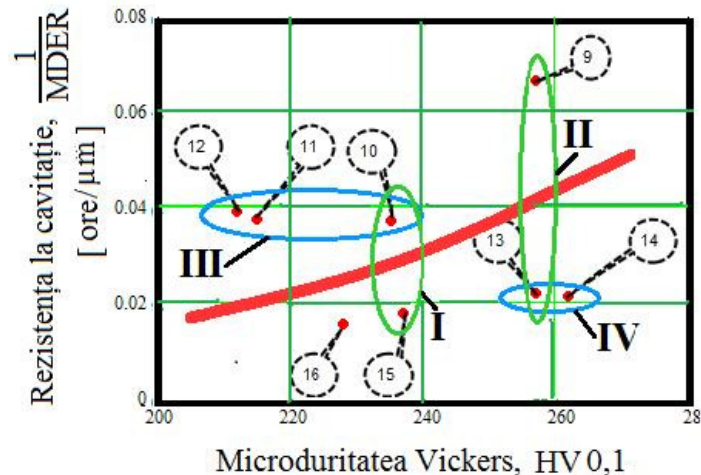


Fig. 3.93 Variția rezistenței la eroziune în raport cu microdurețarea pentru oțelurile testate pe aparatul vibrator T1.

Prima constatare, rezultată din analiza graficelor de mai sus, este că odată cu creșterea durității tind să scadă adâncimea medie a pătrunderii, fig. 3.91 și viteza adâncimii medii a eroziunii, fig. 3.92. Din fig. 3.93 rezultă că rezistența la eroziunea cavitației crește cu microdurețarea Vickers. Această tendință este caracteristică oțelurilor inoxidabile cu structuri ce conțin austenită [13], [104].

O altă constatare este că există oțeluri cu durificări diferite, marcate prin curbele III (oțelurile 10, 11, 12) și IV (oțelurile 13 și 14), care rezistă atacului cavitației produsă în aparatul T1, aproximativ la fel. În același timp, există oțeluri care au rezistențele la cavitația vibratorie, mult diferite, marcate prin curbele I (oțelurile 10 și 15) și II (oțelurile 9 și 13), care la finalul atacului (165 minute) prezintă, în stratul erodat, microdurețări de aproximativ același ordin.

Aceste constatări sunt justificate prin compoziția chimică diferită a oțelurilor respective, dar și prin felul și proporția constituenților microstructurali din care sunt alcătuite microstructurile. Totodată se dovedește că se pot genera oțeluri inoxidabile, cu diferite compoziții chimice și microstructuri combinate, în care să se afle austenită și care pot să asigure, sporirea rezistenței la cavitație, prin durificarea stratul din suprafața atacată.

3.5. Analiza rezultatelor experimentale

3.5.1. Influența dimensiunii suprafeței probei expuse atacului asupra comportamentului și rezistenței la cavitație

Pentru punerea în evidență a efectului dimensiunii suprafeței probei expuse atacului cavitației, în tabelele 3.10 și 3.11, sunt afișate valorile diametrelor (media algebrică a trei măsurători) realizate pe cele mai semnificative probe (**altele decât cele prezentate la paragraful 3.3.2**), din punct de vedere al expresivității

eroziunii. În aceleași tabele sunt afișate și datele caracteristice oțelului etalon OH12NDL.

Tabelul 3.10 Datele privind suprafețele afectate de cavitație – Aparatul T1

Oțelul inoxidabil	Diametrul probei, [μm]	Diametrul mediu al secțiunii afectate prin cavitație, [μm]	Procentul suprafeței afectate prin cavitație, [%]
Ni10Cr6C1T1	13892	8432	36,84
Ni10Cr10C1T1	13912	8457	36,54
Ni10Cr18C1T1	13989	8469	36,65
Ni10Cr24C1T1	13954	8576	37,72
Ni10Cr13C036T1	14004	8521	37,02
Ni10Cr14C036T1	13906	8549	37,79
Ni10Cr16C036T1	13965	8562	37,59
Ni10Cr18C036T1	13899	8568	38,00
OH12NDL [13]	13979	8632	38,13

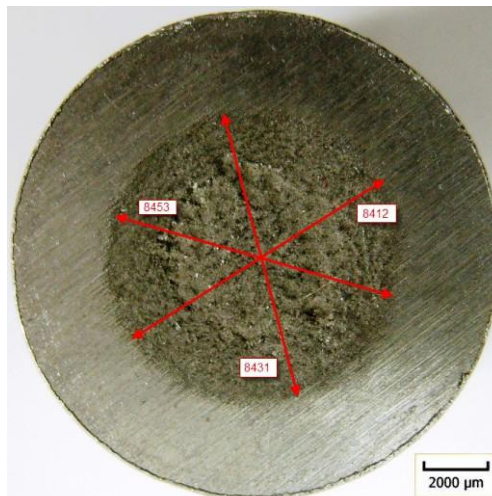


Fig. 3.94 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr6C1T1.

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 127

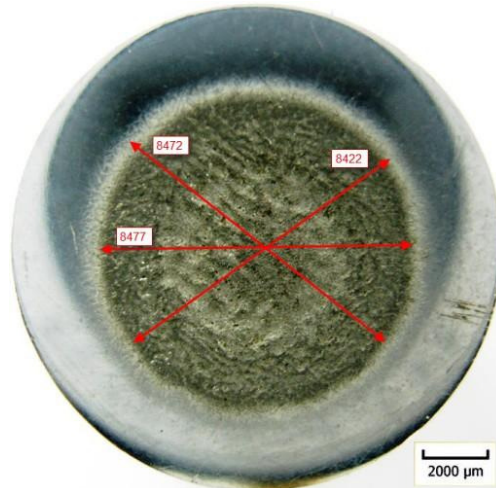


Fig. 3.95 Aspectul steromicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr10C1T1.

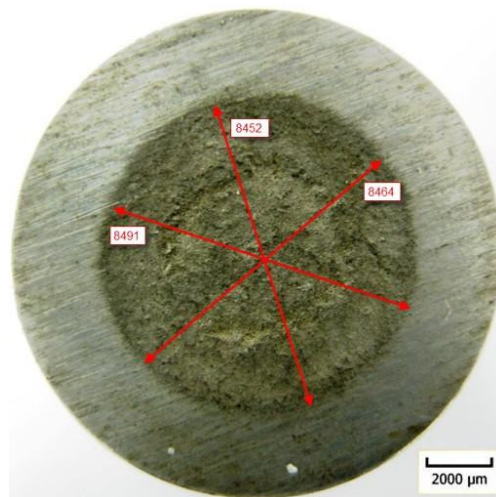


Fig. 3.96 Aspectul steromicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr18C1T1.

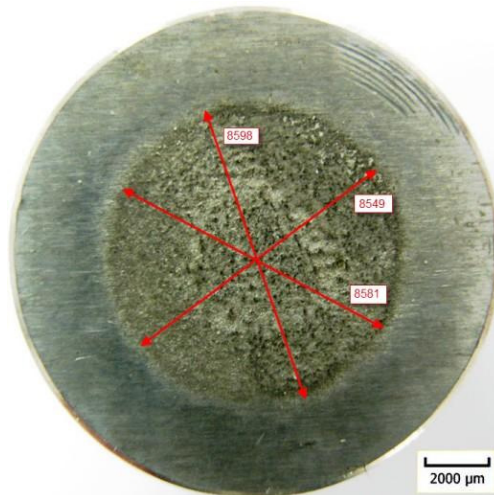


Fig. 3.97 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr24C1T1.

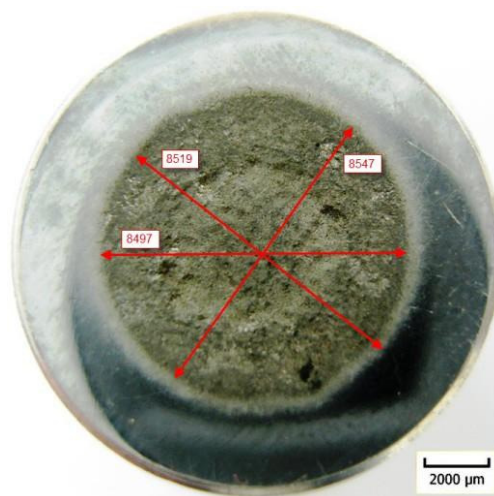


Fig. 3.98 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr13C036T1.

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 129

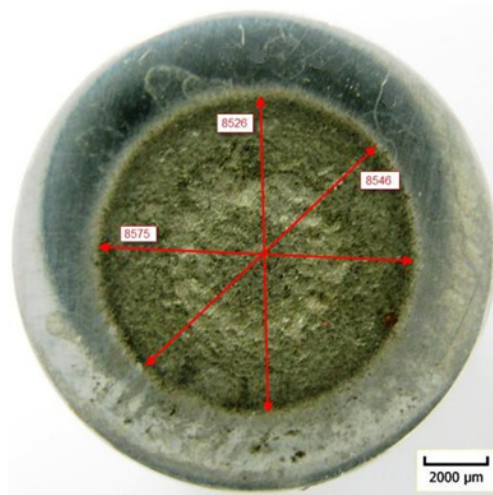


Fig. 3.99 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr14C036T1.

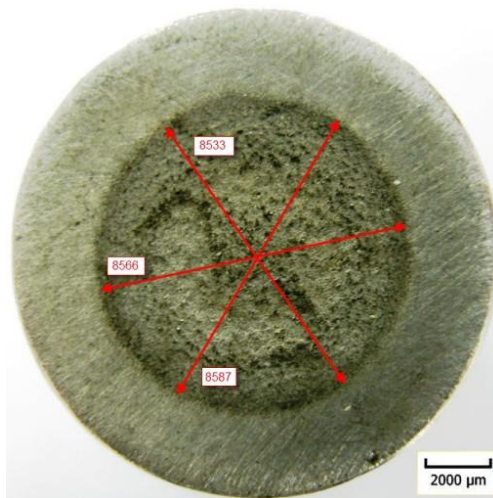


Fig. 3.100 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr16C036T1.

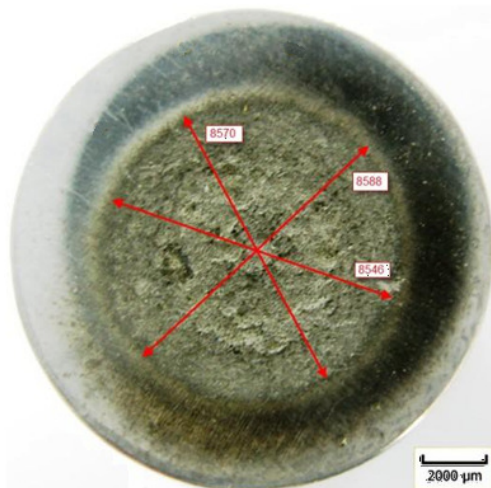


Fig. 3.101 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr18C036T1.

Tabelul 11 Datele privind suprafețele afectate de cavitație - Aparatul T2

Oțelul inoxidabil	Diametrul probei, μm	Diametrul mediu al secțiunii afectate prin cavitație, μm	Procentul suprafeței afectate prin cavitație, %
Ni10Cr6C1T2	15792	13799	76,35
Ni10Cr10C1T2	15762	14225	81,44
Ni10Cr18C1T2	15789	14430	83,52
Ni10Cr24C1T2	15754	14484	85,52
Ni10Cr13C036T2	15804	14513	84,32
Ni10Cr14C036T2	15902	14595	84,23
Ni10Cr16C036T2	15239	14032	84,78
Ni10Cr18C036T2	15362	14172	85,11
OH12NDL [24]	15860	15032	89,83

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 131

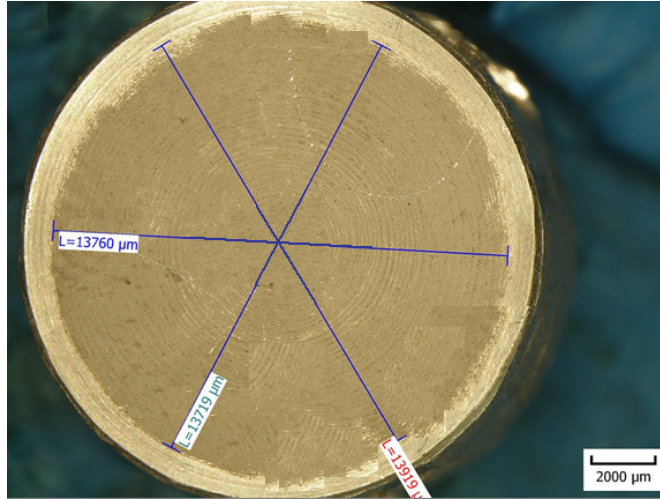


Fig. 3.102 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr6C1T2.

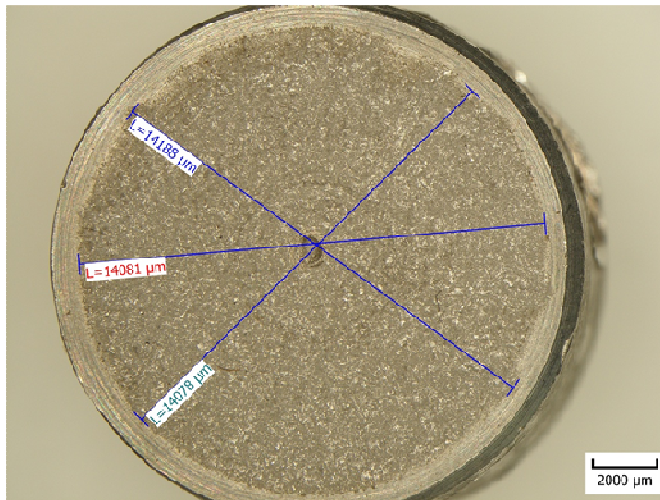


Fig. 3.103 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr10C1T2.

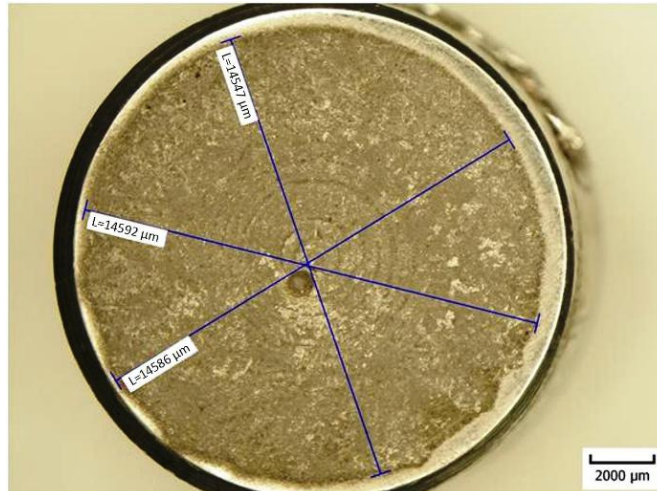


Fig. 3.104 Aspectul steromicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr18C1T2.

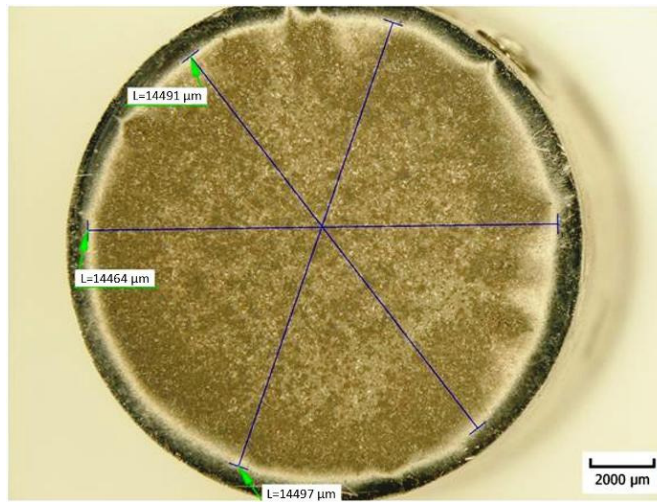


Fig. 3.105 Aspectul steromicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr24C1T2.

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 133

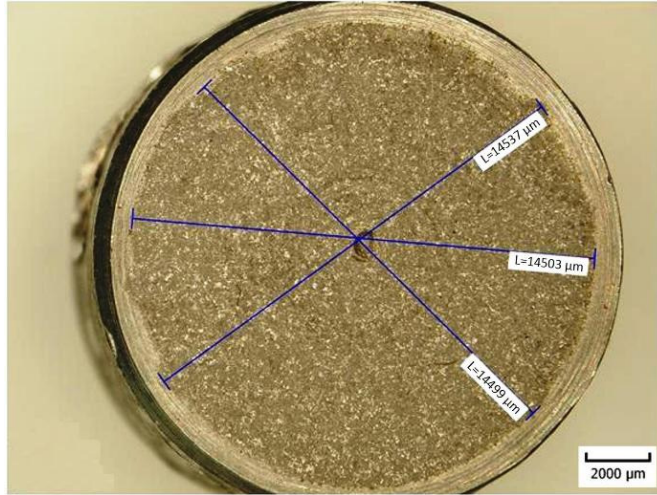


Fig. 3.106 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr13C036T2.

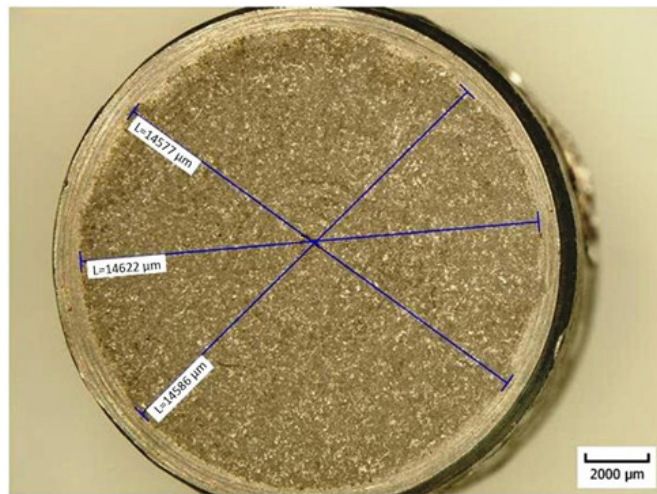


Fig. 3.107 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr14C036T2.

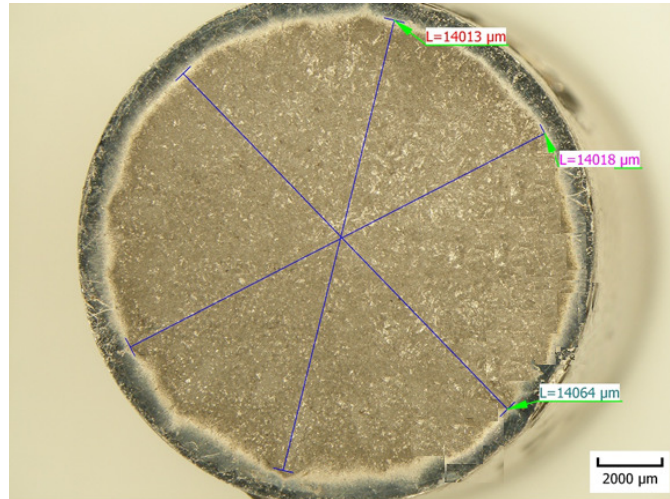


Fig. 3.108 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr16C036T2.

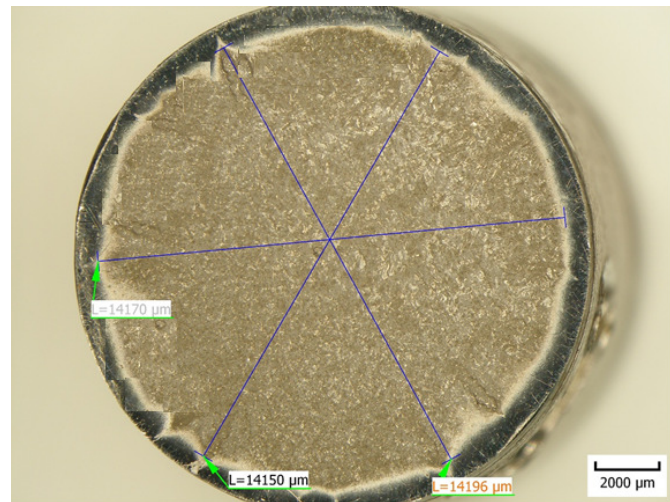


Fig. 3.109 Aspectul stereomicrostructural cu măsurarea zonei afectate de cavitație pentru oțelul Ni10Cr18C036T2.

În figurile 3.110 - 3.113 sunt redată curbele care pun în evidență legătura dintre rezistența la cavitație și ariile suprafețelor afectate de cavitație, precum și diametrele medii ale acestora.

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 135

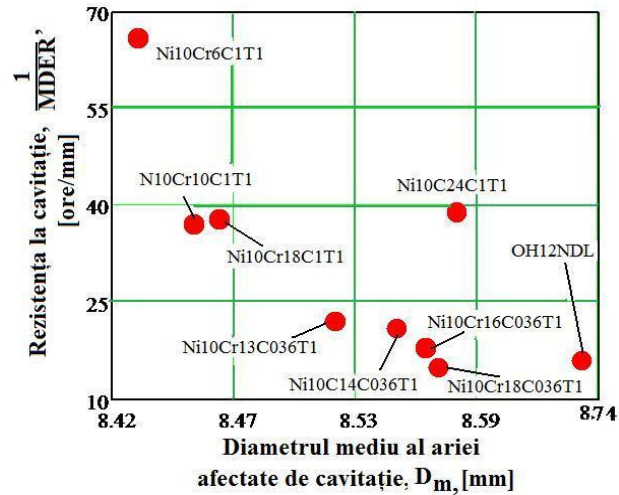


Fig. 3.110 Compararea rezistențelor la cavitație, după diametrul mediu al ariei afectate de cavitație - Aparatul T1

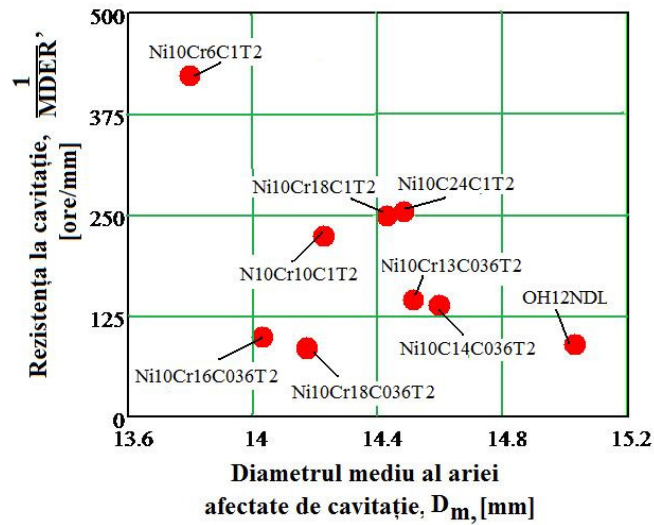


Fig. 3.111 Compararea rezistențelor la cavitație, după diametrul mediu al ariei afectate de cavitație - Aparatul T2

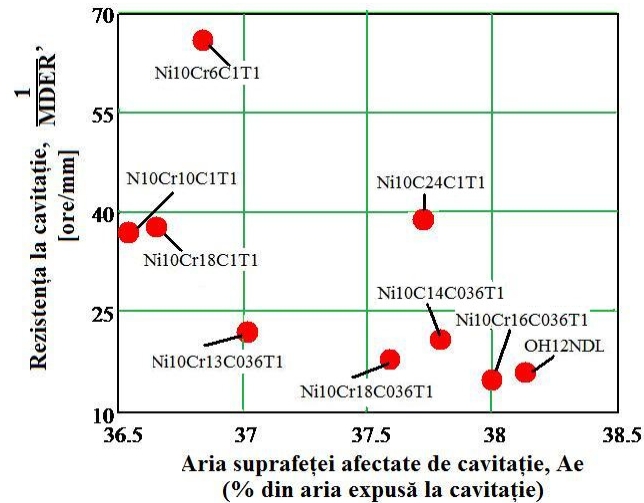


Fig. 3.112 Compararea rezistențelor la cavitație, după dimensiunea ariei afectate de cavitație – Aparatul T1

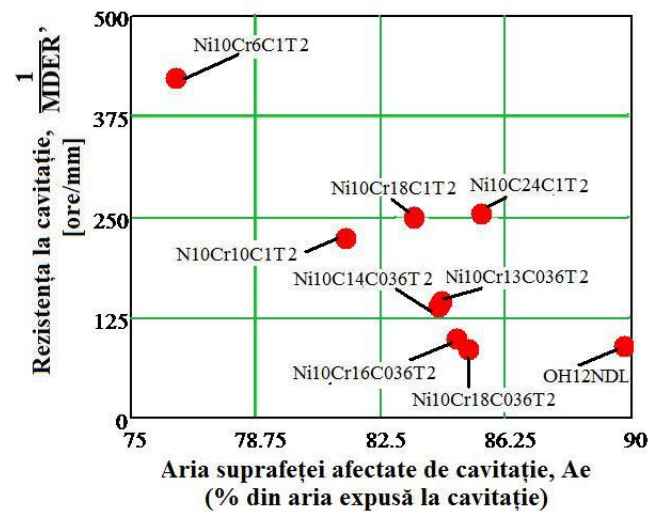


Fig. 3.113 Compararea rezistențelor la cavitație, după dimensiunea ariei afectate de cavitație – Aparatul T2

Dispersia foarte mare a punctelor, din cele 4 diagrame (fig.3.110-3.113), din punct de vedere al influenței ariei afectate de cavitație (exprimată procentual din întreaga suprafață expusă cavitației (%)) și al diametrului său mediu D_m asupra rezistenței la cavitația produsă, în oricare dintre aparate, arată că este dificil a stabili o concluzie. Pentru o imagine mai clară cu privire la influența diametrului, ca parametru funcțional al aparatului vibrator, este necesară testarea, în același aparat, a unui set de epruvete cu diametre diferite, cu menținerea constantă a

celorlalți parametrii (amplitudine, frecvență, temperatură, mediu lichid și puterea electrică de alimentare).

Comparativ, datele din tabelele 3.10 și 3.11 arată că aria afectată de cavitația produsă în aparatul T2 este de circa (2,2 -2,5) ori mai mare decât cea afectată de cavitația produsă în aparatul T1.

Totodată, diferențele foarte mici din diametrul probei și cel mediu al suprafeței afectate de cavitația produsă în aparatul T2 (sub 1 (unu) milimetru/rază), duc la concluzia că în acest aparat norul cavitațional este unul de formă cilindrică, în timp ce la cavitația generată cu aparatul T2, norul cavitațional atașat probei are o formă conică (diferența dintre diametrul probei și cel mediu al ariei afectate ajunge și la 3 mm/rază) – vezi tabelele 3.10 și 3.11.

Și aici se poate observa că, din punct de vedere al rezistenței la cavitație, tendință (linia punctată) este de scădere pentru oțelurile cu conținut de 0,036 % carbon și cu un conținut mai mare de crom, respectiv ferită.

3.5.2. Influența principalelor elemente chimice constitutive asupra rezistenței la cavitație

Cercetările realizate până în prezent [2], [13], [71] arată că elementele chimice care se regăsesc în compoziția oțelurilor inoxidabile au o influență mai mică sau mai mare asupra comportării acestora la eroziunea cavitațională. Un element chimic important din acest punct de vedere este carbonul. Analiza figurilor de comparare prezentate în subcapitolul 3.3 (Fig. 3.55 - 3.60) ne dezvăluie faptul că toate oțelurile cu un conținut de 0,1% carbon au avut o comportare la eroziunea cavitațională superioară oțelurilor cu 0,036% carbon. Astfel, putem trage ușor concluzia că un procent mai mare de carbon conferă oțelurilor o rezistență mai bună la eroziunea cavitațională. Totuși, când se stabilește cantitatea de carbon dorită în compoziția oțelului, mai trebuie ținut cont și de faptul că o cantitate prea mare de carbon poate duce la durificarea excesivă a oțelului și la fragilizarea acestuia. De asemenea, creșterea cantității de carbon scade sudabilitatea oțelurilor, proprietate importantă în momentul în care se efectuează lucrări de întreținere și reparații asupra elementelor confecționate din aceste oțeluri, cum sunt paletele și rotoarele turbinelor hidraulice [2], [13].

Un alt element chimic important în comportarea oțelurilor la eroziunea cavitațională este cromul.

În fig. 3.114.a și 3.115.a sunt redate efectele conținutului de crom asupra rezistenței la cavitație, iar în fig. 3.114.b și 3.115.b influența cromului echivalent (de care depinde microstructura oțelului, conform diagramei Schäffler, fig. 3.5).

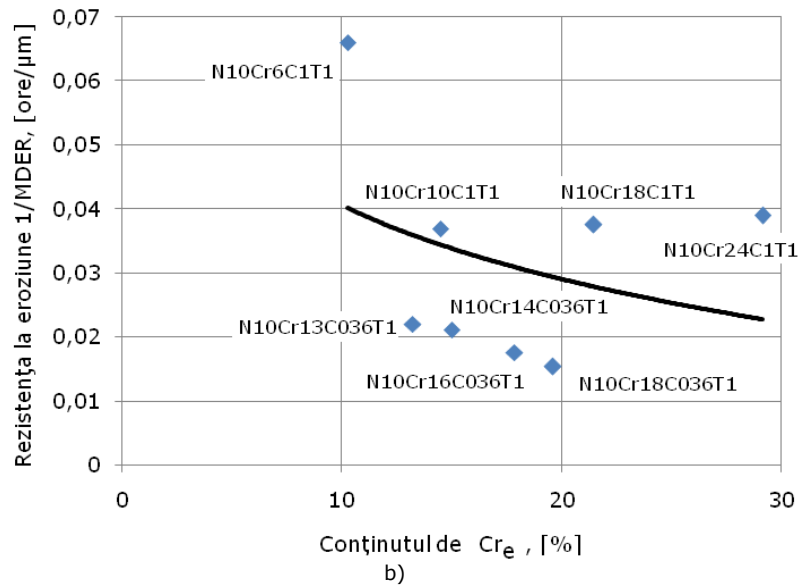
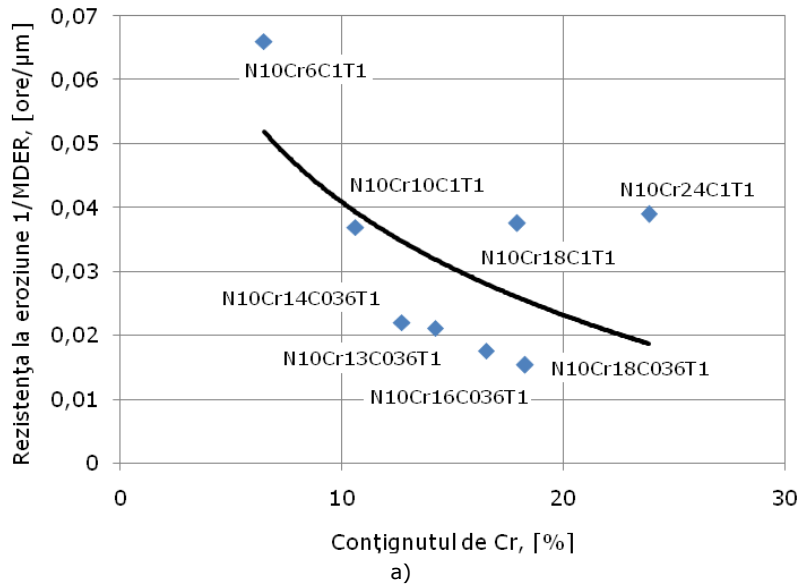
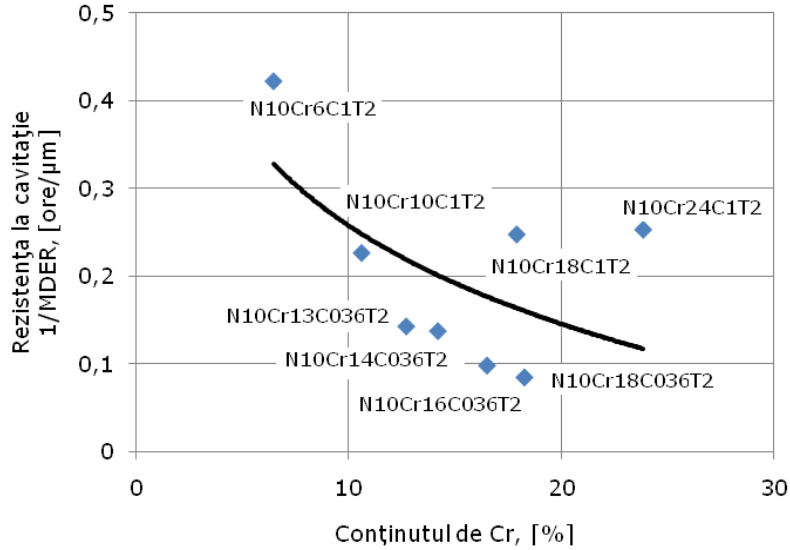
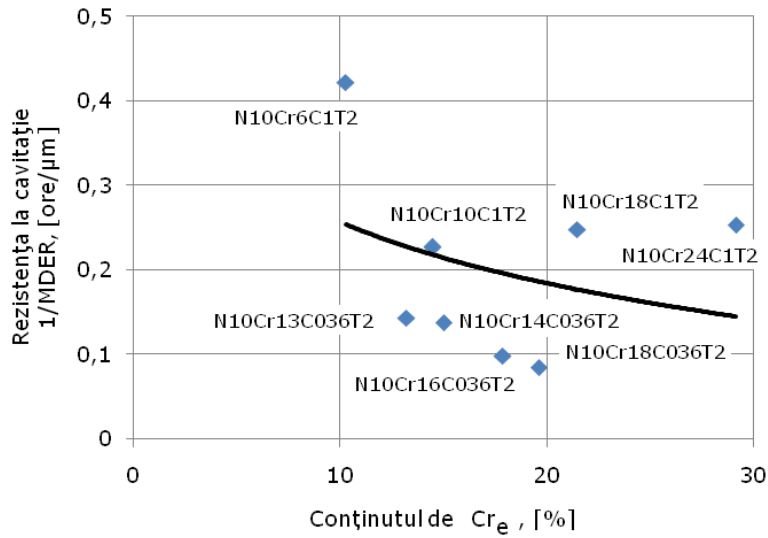


Fig. 3.114 Variația rezistenței la eroziune în raport cu conținutul de crom (a) și crom echivalent (b) - Aparatul T1.



a)



b)

Fig. 3.115 Variația rezistenței la eroziune în raport cu conținutul de crom (a) și crom echivalent (b) - Aparatul T2.

Evoluțiile curbelor de aproximare a valorilor obținute prin măsurare (pentru crom), respectiv prin calcul (pentru cromul echivalent, Cr_e) sugerează scăderea rezistenței la cavitație cu creșterea valorii acestora. Tendința este normală,

deoarece, conform diagramei Schäffler, fig. 3.5, prin creșterea acestora se extinde domeniul feritei componenta structurală cu cea mai scăzută rezistență la eroziunea cavitației [2], [13], [71].

De altfel, după dispunerea punctelor din diagramă, indiferent de conținutul de carbon (cu 0,1 %, sau 0,036 %), rezistența la cavitație, cu creșterea cantității de crom, sau Cr_e , rezistența oțelului inoxidabil, la atacul cavitației, se va reduce.

3.5.3. Efectul constituției microstructurale asupra rezistenței la eroziunea prin cavitație

Documentarea din capitolele 1 și 2 ale prezentei teze arată că microstructura oțelurilor are o influență semnificativă asupra rezistenței acestora la eroziunea cavitațională. De asemenea, în documentarea realizată s-a punctat că dintre constituții microstructurale, ai oțelurilor inoxidabile, destinate turnării paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice, componenta cu cea mai bună rezistență la eroziunea cavitațională este martensita, urmată, în această ordine, de austenită și ferită.

În Fig. 3.116 și Fig. 3.117 s-a pus în evidență influența rezistenței la cavitație de către structura oțelului. Totodată aceste histograme oferă și o imagine a ierarhizării a oțelurilor cercetate.

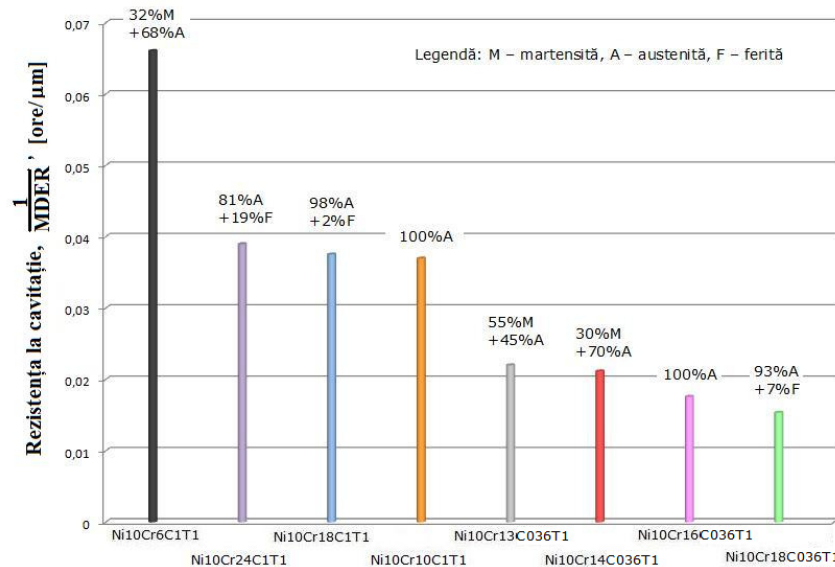
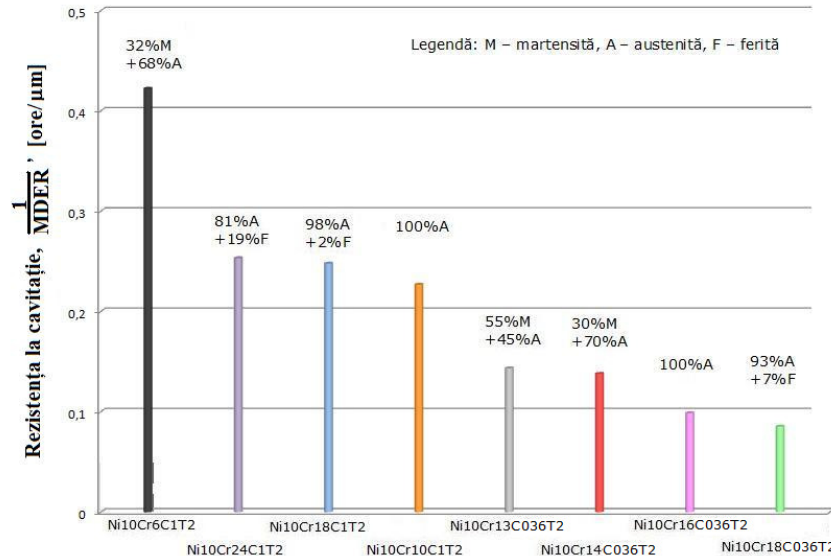


Fig. 3.116 Influența rezistenței la cavitație de către constituția microstructurală - Aparatul T1

3.5. Analiza rezultatelor experimentale 141



3.117 Influența rezistenței la cavitație de către constituția microstructurală - Aparatul T2

Concluziile ce se desprind din analiza celor două histograme sunt identice cu cele punctate la capitolul subcapitolul 3.3.1, prin analiza realizată pe figurile fig.3.59 și 3.60.

Prin urmare și din aceste histograme rezultă că, indiferent de aparatul utilizat, cea mai ridicată rezistență la cavitația vibratoare o are oțelul cu 0,1% carbon și 6% crom, a cărei microstructură este compusă din 32% martensită și 68% austenită. Cea mai scăzută rezistență o are oțelul cu 0,036% carbon și 18% crom, cu microstructura compusă din 93% austenită și 7% ferită.

De asemenea, și aici se observă aceeași grupare pe patru categorii:

- 1- cu ce mai mare rezistență la cavitație - oțelul cu 6 %Cr și 0,1 %C,
- 2- o grupă formată din oțelurile cu 10 %Cr, 18 %Cr și 24 %Cr și 0,1 %C,
- 3- o grupă formată din oțelurile cu 13 %Cr, 14 %Cr, 16 %Cr și 0,036 %C și ultima grupă
- 4- oțelul cu cea mai scăzută rezistență la cavitație, cu 18 %Cr și 0,036 %C.

Din punct de vedere al ierarhizării, ordinea nu se schimbă, de la un aparat la altul.

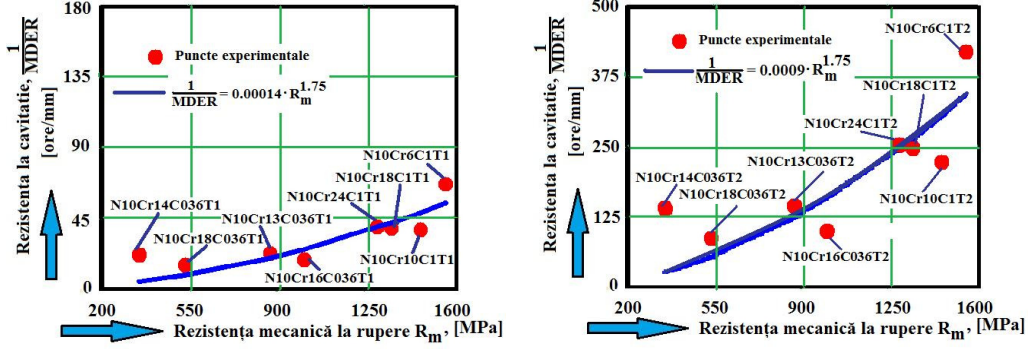
După cum s-a mai afirmat, oțelurile cu un conținut de 0,1% carbon au rezistat mai bine cavitației decât cele cu 0,036% carbon, indiferent de procentul de crom și nichel, sau de compoziția microstructurală.

3.5.4. Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței la cavitație

Cercetările lui Hammitt [55] și Garcia [48], Bordeașu [13], Hobbs [65], Sakai-Shima [129] Franc [41], arată că rezistența și comportarea la cavitație a materialelor, în special a celor metalice, depind de caracteristicile mecanice, în special de rezistența mecanică la rupere R_m , limita de curgere $R_{p0,2}$ și duritatea HB.

În cadrul acestui paragraf vom analiza influența principalelor proprietăți mecanice asupra rezistenței la cavitație, exprimată prin parametrul $1/MDER$.

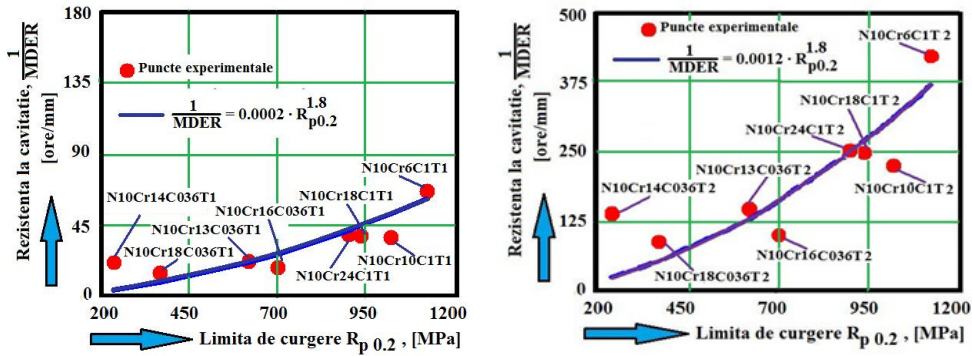
La baza analizei stau diagramele din fig. 3.118 -3.120.



a)- aparatul T1

b)- aparatul T2

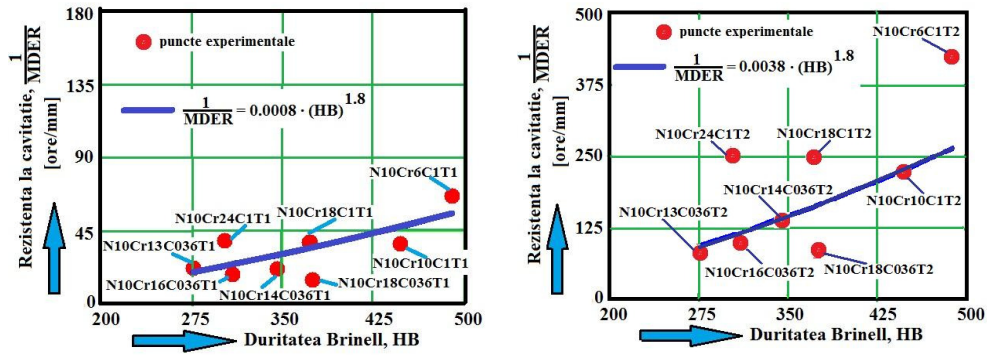
Fig. 3.118 Variația rezistenței la eroziune cu rezistența mecanică la rupere



a)- aparatul T1

b) - aparatul T2

Fig. 3.119 Variația rezistenței la eroziune cu limita de curgere



a)

b)

Fig. 3.120 Variația rezistenței la eroziune cu duritatea pe aparatul T1 (a) și pe aparatul T2 (b)

Din aceste diagrame, așa cum era de așteptat, rezistența la cavitație crește exponențial cu creșterea valorică a celor trei proprietăți mecanice.

Se constată că relațiile analitice, prin care s-au construit curbele de aproximație, au forme similare celor stabilite de Hammitt și Garcia, la corelarea dintre parametrul 1/MDER cu duritatea Brinell (HB).

În tabelul 3.12 sunt afișate valorile parametrilor de scară A și formă B, pentru toate curbele din diagramele 3.104-3.106.

Tabelul 3.12 Expresiile analitice ale curbelor de aproximație

Figura	Forma analitică	Parametrul A	Parametrul B	Observații
3.118 a	$1/MDER = A \cdot R_m^B$	0,00014	1,75	
3.118 b		0,0009		
3.119 a	$1/MDER = A \cdot R_{p0.2}^B$	0,0002	1,8	
3.119 b		0,0012		
3.120 a	$1/MDER = A \cdot HB^B$	0,0008	1,8	
3.120 b		0,0038		

După cum se observă, în grafice și tabelul 3.12, parametrii de formă B au valori identice sau apropiate de cel stabilit de Garcia [48] și Hammitt [55], iar parametrul de scară A este total diferit. Motivul diferenței dintre parametrii de scară, observabil și între valorile corespunzătoare celor două aparate, este dependent de unitatea de măsură, dar și de intensitatea de distrugere a cavitației.

3.6. Concluzii

Toate oțelurile cercetate au rezistențe sporite la cavitație, egale și superioare oțelurilor etalon 41Cr și OH12NDL, putând fi utilizate în turnarea paletelor și rotoarelor de pompe și turbine hidraulice, dar și a elicelor navale.

Cea mai ridicată rezistență la cavitația vibratoare, indiferent de aparatul utilizat, dintre cele opt oțeluri cercetate, cu conținut constant în nichel (circa 10 %), o are oțelul cu 0,1% carbon și 6% crom, a cărei microstructură este compusă din 32% martensită și 68% austenită.

Cea mai scăzută rezistență la cavitația vibratoare, produsă în cele două aparate T1 și T2, o are oțelul cu 0,036% carbon și 18% crom, cu microstructura compusă din 93% austenită și 7% ferită.

Microstructura are o influență importantă asupra rezistenței la eroziunea cavitațională. Prezența martensitei, în structura oțelului, ajută în creșterea rezistenței la cavitație.

Conținutul de carbon influențează rezistența oțelurilor la eroziunea cavitațională. Oțelurile cu 0,036 % carbon prezintă o comportare și rezistență la cavitație inferioară celor cu circa 0,1 % carbon.

Cantitatea de crom are un efect important în stabilirea rapoartelor dintre constituenții microstructurali și, automat, asupra proprietăților mecanice și a rezistenței oțelului la eroziunea cavitațională. Creșterea conținutului în crom slăbește rezistența la cavitație a oțelului inoxidabil, datorită extinderii domeniului de ferită

Indiferent de aparatul vibrator folosit în producerea cavitației, ierarhizarea celor opt oțeluri studiate, după comportare și rezistență, este aceeași.

Prin utilizarea corectă a metodelor de statistică moderne se poate obține un rezumat exact al concluziilor ce pot fi trase asupra unui experiment efectuat. În cazul studiului realizat în acest capitol, prelucrarea statistică a rezultatelor a dus la diminuarea erorilor rezultate, datorită naturii neuniforme a eroziunii cavitaționale.

Creșterea valorilor proprietăților mecanice R_m , $R_{p0,2}$ și duritatea suprafeței atacate, duc la îmbunătățirea rezistenței oțelurilor la eroziunea prin cavitație.

Prezența austenitei în microstructura oțelurilor ajută rezistența la cavitație, prin creșterea microdurității din suprafața atacată, pe durata atacului, ca urmare a impactului repetitiv dintre undele de șoc și microjeturile dezvoltate la surparea bulelor cavitaționale.

Amplitudinea vibrațiilor este principalul parametru funcțional al aparatului vibrator, care determină gradul de pătrundere a eroziunii în structura materialului, iar frecvența vibrațiilor, influențează, cel mai mult, extinderea ariei eroziunii.

Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, MDE, determinată pe baza pierderilor masice, poate fi utilizată ca parametru de comparație și evaluare a comportamentului și rezistenței oțelurilor inoxidabile, la cavitație.

Adâncimea maximă, măsurată, într-o anumită secțiune, perpendicular pe suprafața erodată prin cavitație, MDE_{max} nu este recomandată în evaluarea rezistenței la cavitație, prin compararea cu alte materiale, dar poate fi folosită în evaluarea volumului de electrozi necesari pentru repararea zonelor deteriorate prin cavitație.

CAP. 4 MODEL DE ESTIMARE A REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE CERCETATE ÎN LABORATORUL DE MAȘINI HIDRAULICE DIN TIMIȘOARA

4.1 Introducere

Crearea unor metode de evaluare a comportării materialelor la eroziunea cavitațională, produsă în laborator sau în mașina industrială, constituie una dintre preocupările vechi ale specialiștilor în hidraulică și mașini hidraulice. Din păcate, după aproape 120 de ani de cercetări, cu tot progresul realizat în domeniul științei și metalurgiei materialelor, modelării matematice a hidrodinamicii cavitaționale, creșterea preciziei aparatelor de măsură și control a distrugerilor realizate, nu se poate stabili ponderea caracteristicilor mecanice ale materialelor și a parametrilor funcționali ai mașinii industriale sau stațiunii de laborator, asupra gradului de distrugere cavitațională. Din aceste motive nu se poate oferi o lege după care acești factori acționează în timp asupra distrugerii cavitaționale a materialelor. În fapt, se dorește anticiparea rezistenței materialului la atacul cavitațional, funcție de constituția chimică și microstructurală și caracteristicile sale fizico-mecanice, pe de o parte și funcție de intensitatea atacului cavitațional, pe de altă parte [13], [2], [14]. Din această cauză majoritatea relațiilor sunt stabilite empiric, pe baza multor rezultate experimentale. Prin urmare, așa cum se va constata și în modelele prezentate în acest capitol, aria de aplicabilitate este foarte restrânsă. Uneori, aceste modele, nu dau informațiile sperate nici în cadrul aceleiași familii de materiale (oțeluri inoxidabile, oțeluri aliate pentru construcții, oțeluri carbon nealiat, diverse tipuri de aliaje metalice neferoase, etc.). Deși prezintă și dezavantaje importanța lor nu trebuie minimalizată. Ele oferă niște tendințe ce pot sta la baza selectării materialelor utilizate în construcția pieselor solicitate cavitațional. De asemenea, pot sta la baza amplificării cercetărilor teoretice și experimentale ce au drept scop găsirea unor relații de efect de scară.

Vorbind la modul general, tehnicile de precizie a eroziunii de cavitație pot fi clasificate în trei categorii principale:

- corelația empirică cu proprietățile materialelor sau cu măsurătorile electrochimice sau ale zgometului;
- tehnici de simulare utilizând dispozitive speciale de testare pentru a reproduce o agresivitate dată într-un ritm accelerat;
- metode analitice.

Modelul dezvoltat în cadrul tezei, pe baza rezultatelor experimentale, obținute în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara, pe oțeluri inoxidabile, are menirea de a permite o estimare a rezistenței la cavitație a acestor categorii de oțeluri.

4.2 Modele de evaluare și ierarhizare la cavitație pe baza caracteristicilor fizico-mecanice ale materialelor

Metoda cea mai utilizată, folosită și azi, este cea a comparației curbelor specifice, de pierdere masică/volumică/gravimetrică și a vitezelor de eroziune

(conform normelor internaționale ASTM [148]), rezultate în urma cercetărilor. Însă, uneori, proiectantul și fabricantul de piese solicitate la cavitație, dorește să poată estima comportamentul/rezistența materialului, înainte de testare. Această estimare poate fi realizată doar prin niște corelații a tuturor factorilor ce intervin în dinamica procesului distructiv prin cavitație.

Încă din 1960, Hobbs [65] a dovedit complexitatea fenomenului de distrugere a materialelor prin cavitație.

Printre factorii studiați de acesta se enumeră: efectul duratei testului, efectul temperaturii, efectul gradului de finisare al suprafeței, efectul amplitudinii și frecvenței de vibrație. Însă, toate concluziile desprinse din cercetările lui Hobbs, cu privire la factorii amintiți sunt doar tendințe, chiar și pentru o clasă dată de materiale, întrucât nu sunt concretizate prin relații valabile, ci doar prin dependențe grafice.

Semnificativ, în cele afirmate sunt chiar o parte din concluziile stabilite de Hobbs [22]. Astfel:

1. testele privind efectul temperaturii au arătat că rata de eroziune în apă a fost maximă la o temperatură de aproximativ 50°C și au indicat nevoia unui control destul de strict al temperaturii lichidului de test;
2. suprafața avariata crește cu amplitudine până acoperă 80% din suprafața mostrei (studiul a fost realizat pe 4 metale cu rezistențe diferite);
3. din punct de vedere al tehnologiei de prelucrare (finisare) a suprafeței ce urmează a fi atacată cavitațional, s-a sugerat că starea inițială a suprafeței mostrei va afecta rata de eroziune. Acest lucru s-a demonstrat că este adevărat doar în primele faze ale atacului. Mostrele ale căror suprafețe au fost fie întărite prin deformare, fie foarte șlefuite au suferit mai puțină avarie într-o perioadă de timp dată decât altele, din același material, care au fost electroșlefuite sau respectiv mai neprelucrate. De aceea este probabil să fie nevoie de perioade diferite de timp pentru a ajunge la perioada ratei constante, iar rata de eroziune, în acea perioadă, sa devină independentă de condiția suprafeței originale. S-a constatat că ajută la minimizarea timpului de testare dacă se îndepărtează stratul întărit prin deformare și se pregătește o suprafață nivelată, dar nu foarte șlefuită, prin îndepărtarea cu șmirghel fin (Grade 600) a feței pe care s-a întocmit testul;
4. deși frecvența este în mod virtual fixată de rezonanța mecanică a sistemului, s-a constatat că rata de eroziune tinde să scadă ușor, odată cu creșterea frecvenței. Explicația este legată de faptul că pe măsură ce frecvența crește la amplitudine constantă, viteza maximă și accelerația trebuie să crească. Acestea determină presiuni ce cauzează creșterea bulelor și ruperea, care de asemenea vor crește. Astfel, dacă aceștia ar fi singurii factori de luat în considerare, rata de eroziune ar tinde să crească. Însă, timpul avut la dispoziție pentru creșterea bulelor este invers proporțional cu frecvența, și rata de creștere este limitată de rate finite de transfer de căldură. De aceea, mărimea maximă pe care o poate atinge o bulă într-o amplitudine a presiunii dată va fi o funcție inversă frecvenței. Energia eliberată la rupere, și prin urmare avaria produsă, sunt o funcție a volumului bulei. Dintre toate aceste efecte, ultimul menționat pare să fie predominant și poate explica fenomenul observat.

Prin urmare, crearea unor metode de ierarhizare după rezistența la eroziunea cavitației rămâne deschisă. Cercetările și studiile, pe această direcție, sunt susținute

4.2. Modele de evaluare și ierarhizare la cavitație 147

și amplificate în foarte multe țări, precum : Franța (Jean Pierre Franc [41]), SUA (Heymann [63], etc), Japonia (Hattori, [59], [60], [57]), Canada (Simoneau [132]), Polonia (Stteller [136], [137], [138], [139], [140]), etc. La baza eforturilor depuse de către cercetători stau foarte multe date experimentale, obținute în diverse stațiuni de încercare și pe mașinile industriale. Însă, rezultatele nu au dat satisfacție deplină din cauza dependenței procesului de eroziune cavitațională de foarte mulți factori hidrodinamici și specifici materialului. Din acest motiv se continuă studiile de corelare a parametrilor ce definesc intensitatea procesului de eroziune prin cavitație, cu caracteristicile fizice, chimice și mecanice ale materialului.

Mai jos se prezintă modelele semnificative, bazate pe caracteristicile materialului, folosite pentru aproximarea rezistenței la cavitație.

4.2.1 Modelul Hammitt

Modelele oferite de Hammitt ș.a. [54], [55], [56], [53] sunt corelații dintre rezistența la cavitație, exprimată prin parametrul $1/MDER$, cu una sau mai multe dintre proprietățile mecanice ale materialului. Cele mai semnificative sunt:

$$\frac{1}{MDER} = 0,998 \cdot (UR)^{0,811} \quad (4.1)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,811 \cdot (UR) \quad (4.2)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,798 \cdot (UR \cdot HB)^{0,720} \quad (4.3)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,716 \cdot (UR \cdot HB) \quad (4.4)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,744 \cdot (UR \cdot E^2)^{0,659} \quad (4.5)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,734 \cdot (HB)^{1,788} \quad (4.6)$$

$$\frac{1}{MDER} = 0,517 \cdot (SE)^{0,738} \quad (4.7)$$

Pentru aplicații practice Hammitt recomandă relațiile (4.2) și (4.6). Cum duritatea Brinell se măsoară foarte ușor, relația (4.6) este cea mai utilizată.

Totuși, se observă că, în funcție de proprietatea materialului și forma relației de corelare, valorile coeficienților și exponenților diferă. Acest aspect arată ca eroziunea cavitațională depinde și de alți factori, a căror influență nu poate fi acoperită de proprietatea considerată în relație (duritatea Brinell HB, reziliența finală UR, energia de deformație SE, modulul de elasticitate longitudinal E).

4.2.2 Modelul Garcia

Garcia și colaboratorii în „Corellation of cavitation damage with other material and fluid properties” apărută în (1960) [48], propun relații de corelare a proprietăților materialelor cu parametrii caracteristici procesului coroziv, produs în aparatul vibrator de la Universitatea din Michigan, pentru diverse medii lichide cavitaționale, precum plumb-bismut, mercur și apă. Deoarece cercetările din cadrul acestei teze sunt realizate în apă, mai jos se vor prezenta doar relațiile ce permit determinarea adâncimii medii de eroziune (MDE) pentru cercetările efectuate în acest mediu lichid.

Corelație cu o singură proprietate

$$\text{MDE} = 6,023 + 1,3 \cdot 10^4 \cdot (\text{HB})^{-2} + 53,63 \cdot (\text{HB})^{-1/3} - 6,17 \cdot 10^2 \cdot (\text{HB})^{-1} - 8 \cdot 10^4 \cdot (\text{HB})^{-3} \quad (4.8)$$

Corelație cu mai multe proprietăți

$$\text{MDE} = -0,068 + 3,07 \cdot 10^8 \cdot (\text{TS})^{-2} - 8,32 \cdot 10^{-7} \cdot (\text{RA})^3 - 2,03 \cdot 10^3 \cdot (\text{HB})^{-3} + 1,49 \cdot 10^2 \cdot (\text{TS})^{-1/2} \quad (4.9)$$

De precizat că autorii (Garcia și colaboratorii) recunosc că nici aceste relații nu dau rezultate foarte precise deoarece nu au fost luați în considerare și alți factori, cum este corозиunea chimică, care, funcție de agresivitatea apei, poate fi foarte importantă.

În relațiile de mai sus **RA** semnifică reducerea suprafeței neerodate (în procente), iar **TS** este energia de deformare.

4.2.3 Modelul Hoff

Hoff ș.a. [3], [14] corelează parametrul MDER cu proprietățile mecanice ale materialului, mărimile specifice probelor de eroziune și fluidului printr-o relație de forma:

$$\text{MDER} = \frac{\eta A_p \rho_{ef} v^3}{2 \varepsilon A_e} \quad (4.10)$$

unde:

ρ_{ef} – densitatea lichidului,

v - viteza de impact,

η - coeficientul de transfer al energiei de la lichid la solid (dependent de caracteristicile materialului și parametrii fluidului),

ε - parametrul caracteristic materialului,

A_p – aria erodată,

A_e – aria expusă.

Pentru parametrul ε literatura oferă o serie de relații între proprietățile specifice materialului, ca:

$$\varepsilon = C_0 + C_1 \cdot \text{UR} + C_2 \cdot \text{SE}$$

$$\varepsilon = C_0 + C_1 \cdot \text{UR}$$

$$\varepsilon = C_0 + C_1 \cdot \text{SE}$$

(4.11)

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + C_1 \cdot TSE$$

$$\varepsilon = C_1 \cdot UR$$

$$\varepsilon = C_0 + C_1 \cdot UR + C_2 \cdot UR + C_3 \cdot UR$$

Coeficienții C_0 , C_1 , C_2 și C_3 sunt determinați din aproximarea rezultatelor experimentale prin metoda celor mai mici pătrate. Valorile sunt dependente de material și aparatul de încercare utilizat.

Deoarece curbele de pierdere (masică, volumică, etc.), specifice eroziunii prin cavitație, au forme mai mult exponențiale decât liniare (vezi graficele de la subcapitolul 3.2.2.1) arată că relațiile lui Hoff nu vor oferi rezultate calculate, pentru toate tipurile de materiale, care să fie foarte apropiate de cele experimentale. Prin urmare ele trebuiesc corectate, îmbunătățite.

4.2.4 Modelul K. Steller

Un alt model de evaluare a comportării materialelor la eroziunea prin cavitație este cel propus de către Steller în 1983 [136]. Analizând rezultatele experimentale obținute în Laboratorul Institutului de Mașini cu Curent de Fluid din cadrul Academiei de Științe Poloneze din Gdansk, K. Steller formulează ipotezele care stau la baza modelului, legate de natura solicitărilor în timpul distrugerii cavitaționale, de natura și structura materialului.

Ipoteza de bază admisă de Steller o reprezintă considerarea evoluției rezistenței materialului, la atacul cavitației similar cu rezistența la oboseală, dată de Wöhler, fig. 4.1.

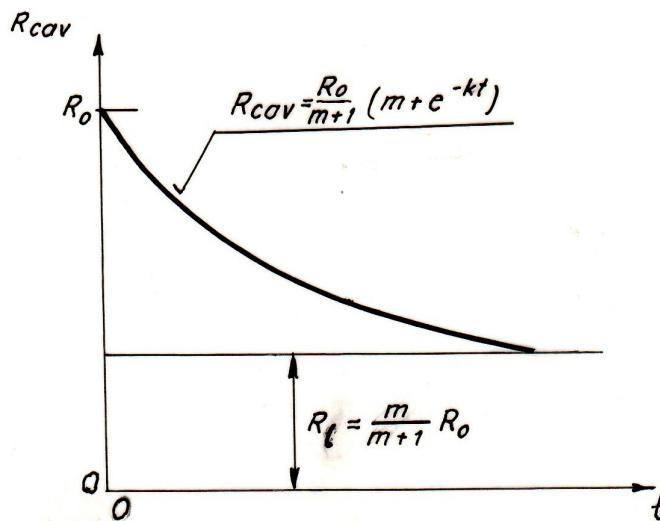


Fig.4.1 Variația rezistenței materialului la eroziune Cavitațională cu timpul de atac [după K. Steller, 26]

Cu aceasta ipoteză autorul stabilește legea de variație a rezistenței la oboseală:

$$R_{cav} = \frac{R_0}{m+1} (m + e^{-kt}) \quad (4.12)$$

unde

$$R_0 \equiv UR = \frac{R_m^2}{2E} \quad \text{- reziliența finală}$$

Pentru aplicații practice, K. Steller recomandă determinarea durabilității cavitazionale medii $\bar{\delta}_{cav}$, funcție de puterea P absorbită de material pentru dislocarea, prin cavitație, a volumului V :

$$\bar{\delta}_{cav} = \frac{\frac{1}{\tau} \cdot \int_0^{\tau} R_{cav} dt}{P} \quad (4.13)$$

Recomandarea este argumentată de faptul că pe durata totală τ a atacului cavităției în structura materialului au loc transformări interne și superficiale funcție de intensitatea cavităției și natura lichidului.

(Observatie.) Cum lichidele, în care funcționează majoritatea mașinilor hidraulice, sunt și corozive rezultă că rezistența la cavitație nu prezintă un palier ca în figura 4.1, ci o scădere monotonă, deci $m \rightarrow 0$). În acest caz volumul V erodat într-un timp t de atac, se obține prin diferențierea dublă și integrarea relației de legătură dintre puterea absorbită de material P , rezistența la cavitație R_{cav} , volumul erodat și durata cavităției ($P \cdot t = R_{cav} \cdot V$) și are forma:

$$V = \frac{V_{\tau}}{\tau} \cdot t \cdot e^{-k \cdot (\tau - t)} \quad (4.14)$$

Integrarea acestei relații permite definirea constantei k:

$$k \equiv \frac{3}{\tau} \frac{V_{\tau} \tau - \tau \int_0^{\tau} V dt}{V_{\tau} \tau} \quad (4.15)$$

Cum rezultatele de laborator sunt prezentate sub forma curbelor de pierdere volumică $V(t)$, atunci K. Steller propune determinarea empirică a parametrului k, astfel:

$$k \equiv \frac{3 F_1 - F_2}{\tau F_1 + F_2} = \frac{3\alpha}{\tau} \quad \text{respectiv} \quad \bar{\delta}_{cav} \equiv \frac{(2 + 3\alpha + 3\alpha^2) \cdot \tau}{2V_{\tau}} \quad (4.16)$$

unde F_1 și F_2 sunt ariile definite în fig.4.2.

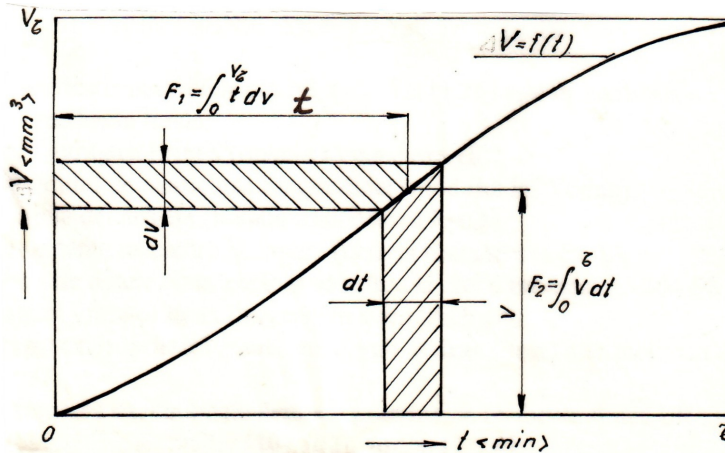


Fig.4.2 Delimitarea ariilor F1 și F2 de curba V(t) (după K. Steller [136])

Se observă că nici una din relațiile stabilite de K. Steller nu conține, în mod explicit, influența factorilor cu pondere importantă pentru rezistența materialului la eroziune cavitațională:

- constituenți structurali,
- proprietăți mecanice (altele decât reziliența finală),
- elemente chimice componente,
- tehnologie de elaborare și prelucrare,
- parametri tehnico – funcționali ai stațiunii de încercare, etc.

Introducerea acestor factori, ce influențează procesul hidrodinamic și mecanic al distrugerii prin cavitație, în parametri k și m fără a cunoaște ponderea, poate duce în unele cazuri la neconcordanțe între calculele empirice și rezultatele experimentale. De asemenea, rezistența la oboseală, definită de Wöhler, se referă la solicitarea întregii secțiuni a materialului, pe când cea cavitațională este de natură locală, punctiformă.

4.2.5 Modelul Sakai-Shima

Sakai și Shima în „On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of Materials” [129] amplifică studiile lui Rao și Byrnside și consideră că distrugerea cavitațională a materialelor poate fi descrisă de mărimea $UR \times HB \times E/R_{p0.2}$. Folosind un număr mare de materiale (oțeluri, aliaje de cupru și aluminiu), testate cavitațional de Garcia și Rao în medii și condiții diferite (apă la diferite temperaturi, bismut, mercur), propun corelarea parametrului eroziunii cavitaționale $1/MDER$ cu aceste proprietăți, printr-un parametru adimensional ψ_n , sub forma (1.4) prezentată și în **capitolul 1**:

$$1/MDER = A \cdot [1 - e^{-B \cdot \psi_n}] \quad (4.17)$$

Constantele A și B au valori diferite de la un mediu cavitațional la altul și de la o grupă de materiale cercetate la alta, chiar și pentru același tip de aparat utilizat (aparat vibrator, aparat cu disc rotitor sau tunel hidrodinamic).

Cum reziliența finală UR este exprimată, în funcție de rezistența mecanică la rupere și modulul de elasticitate longitudinal, sub forma [136]:

$$UR = R_m^2 / 2 \cdot E \quad (4.18)$$

forma finală obținută pentru parametrul ψ_n este:

$$\psi_n = \frac{R_m}{R_{mst}} \cdot \frac{HB}{HB_{st}} \cdot \frac{R_{p0,2st}}{R_{p0,2}} \quad (4.19)$$

Proprietățile indexate cu "st" sunt ale oțelului inoxidabil Stellite 304 SS, folosit ca etalon pentru cercetările realizate în Laboratorul Universității din Michigan.

Sakai și Shima propun relația de bază (4.17) ca efect de scară în eroziunea cavitațională, dar verificările efectuate de Bordeășu în teza de doctorat „**Eroziunea cavitațională a materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară (1998)**” [14] au demonstrat că relația propusă nu permite transpunerea rezultatelor experimentale de la un aparat la altul. Din acest motiv, apreciez că relația (4.17) poate fi luată în considerare ca un model de evaluare a comportării materialelor la eroziunea produsă în aparatul vibrator din Michigan și se poate îmbunătăți prin introducerea unor coeficienți ce țin seama și de microstructura și constituția chimică a materialului.

4.2.6 Modelul Bordeășu

În teza sa de doctorat [14] I. Bordeășu a verificat gradul de valabilitate al relației stabilită de Sakai-Shima. Datorită diferențelor importante ce au dat față de rezultatele experimentale obținute în Laboratorul de Mașini Hidraulice din Timișoara, pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, Bordeășu a construit noi relații, de forme similare celor stabilite de Sakai și Shima. Aceste relații sunt:

$$\Psi_n^* = \left(\frac{R_m}{R_{me}} \right)^r \cdot \left(\frac{R_{p0,2e}}{R_{p0,2}} \right)^s \cdot \left(\frac{HB}{HB_e} \right)^p \quad (4.20)$$

$$\frac{1}{MDER} = A^* \cdot \left[1 - e^{-B^* \cdot \Psi_n^*} \right] \quad (4.21)$$

unde:

$$r = 1,1; s = 0,55; p = 1,1; A^* = 445; B^* = 2,163 \quad (4.22)$$

Pentru $r = s = p = 1$ se obține relația (4.17) stabilită de Sakai și Shima.

Bordeășu consideră că exponenții r , s și p sunt introduși pentru corectarea rezistenței mecanice la rupere R_m , durității HB și limitei de curgere $R_{p0,2}$. Aceste corecții sunt determinate de diferențele ce apar între valorile caracteristicilor mecanice determinate după metodele standard și cele dobândite în timpul procesului

4.2. Modele de evaluare și ierarhizare la cavitație 153

de distrugere cavitațională - omise de Sakai și Shima - și legate de următoarele aspecte, caracteristice atacului cavitațional:

- caracterul dinamic al solicitării cavitaționale, desfășurat cu viteze foarte mari,
- dezvoltarea unor temperaturi locale, pe frontiera solidă, de ordinul miilor de grade celsius;
- caracterul aleator specific fenomenului de oboseală locală;
- nivelul foarte mare (zeci și sute de MPa) al presiunilor exercitate, pe arii reduse, de către undele de șoc și microjeturi;
- defectele de ordin (micro)structural și neomogenitatea proprietăților în structura materialului, etc.

În figura 4.3 se prezintă diagrama prin care se compară curbele de corelare,

$\frac{1}{\text{MDER}}(\Psi_n^*)$ și $\frac{1}{\text{MDER}}(\Psi_n)$, calculate prin cele două relații Sakai-Shima (4.17) și Bordeașu (4.21).

Avantajul relației (4.21), stabilită de Bordeașu este corelarea caracteristicilor cavitaționale și mecanice a diverselor categorii de oțeluri testate în aparatul magnetostrictiv T1 din LMHT, cu două oțeluri testate de Steller [137], în aparatul vibrator de la Universitatea din Gdansk și cu șase oțeluri testate de Garcia [47] în aparatul vibrator de la Michigan. Pentru ambele cazuri, oțelul etalon utilizat în relațiile de definire a curbelor este oțelul 304 SS, considerat de Garcia ca fiind material de referință pentru teste de eroziune cavitațională.

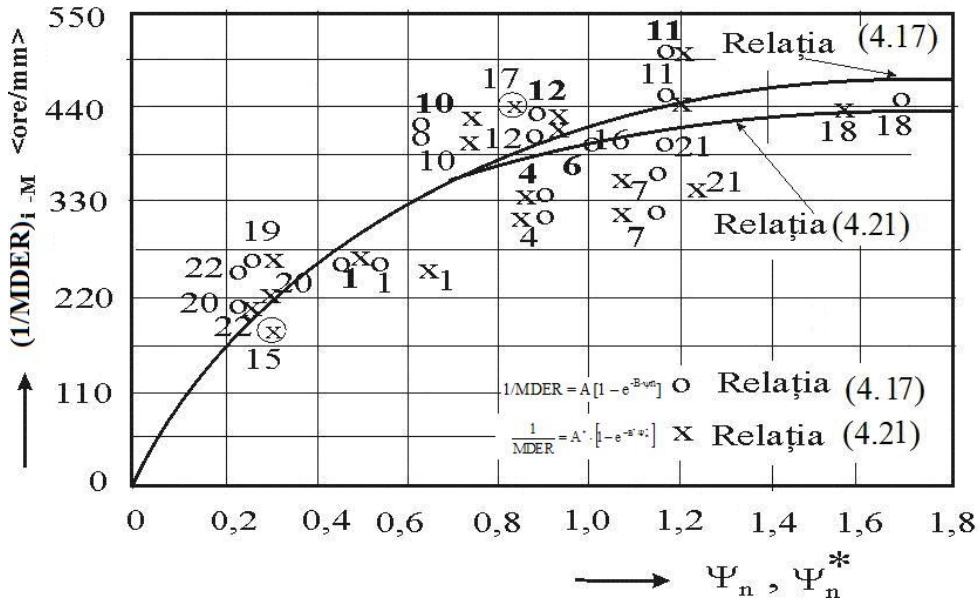


Fig. 4.3 Corelarea vitezei de eroziune cavitațională cu caracteristicile materialului [13], [14]
 Notatii: 1- OLC 15; 4- 33MoCr11; 7- Oțel inoxidabil III-RNR; 11- T07CuMoMnNiCr165Nb; 12- T09CuMoMnNiCr185Ti; 15- Oțel carbon (Michigan); 16- 304 SS (Michigan); 17- 316 SS (Michigan); 18- Mo-1/2 Ti (Michigan); 19- Cb-I Zr (Michigan); 20- Cb-I Zr(A) (Michigan); 21- OLC 45 (Gdansk); 22- E04 (Gdansk)

Datorită acestui dezacord, apreciez că relația (4.21) propusă de Bordeășu poate fi îmbunătățită pentru a avea un grad mai larg de aplicabilitate pentru oțelurile inoxidabile.

4.3 Modelul propus

4.3.1 Date utilizate

Modelul pe care doresc să îl ofer în estimarea rezistenței materialelor la cavitația produsă în aparatul vibrator magnetostrictiv T1, se bazează pe îmbunătățirea modelelor stabilite de Sakai-Shima și corectate de Bordeășu (prezentate mai sus), cu aplicare doar la oțeluri inoxidabile. Pentru aceasta se vor utiliza rezultatele obținute prin cercetările realizate în cadrul proiectului **CNCSIS IDEI COD 34/2007-DEZVOLTAREA DE MODELE PENTRU EVALUAREA COMPORTĂRII MATERIALELOR LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE**, de dr.ing. Alin Dan Jurchela [71] precum și alte date de oțeluri inoxidabile, obținute anterior, tot pe aparatul vibrator magnetostrictiv T1. Toate aceste oțeluri sunt destinate fabricării echipamentelor hidromecanice, intens solitate la cavitație.

În tabelul 4.1 sunt date principalele caracteristici ce definesc oțelul. Constituția microstructurală a oțelurilor, cercetate anterior, a fost stabilită, de asemenea, ca și pentru oțelurile cercetate în cadrul proiectului CNCSIS, pe baza diagramei Schöffler.

Tabelul 4.1 Compoziție chimică. Caracteristici mecanice. Microstructură [71]

Element chimic	Simbolul oțelului inoxidabil,							
	Ni05 Cr12 C1T1	Ni2 Cr12 C1T1	Ni6 Cr12 C1T1	Ni10 Cr12 C1T1	Ni2 Cr12 C036T1	Ni4 Cr12 C036T1	Ni6 Cr12 C036T1	Ni8 Cr12 C036T1
Procentul de elemente chimice, %								
C	0,121	0,114	0,112	0,105	0,036	0,036	0,036	0,036
Si	1,5	1,35	1,79	1,72	0,642	0,51	0,461	0,696
Mn	1,36	1,36	1,67	2,62	0,204	0,271	0,28	0,427
W	0,058	0,025	0,016	0,007	0,083	0,076	0,153	0,146
Ta	0,01	0,01	0,01	0,01	-	-	-	-
Cr	12,08	12,02	12,07	12,02	11,957	11,840	12,059	12,206
Ni	0,5	2,15	5,95	10,28	1,97	4,009	5,597	7,847
Mo	0,185	0,05	0,031	0,037	0,036	0,029	0,039	0,041
Al	0,51	0,55	0,92	1,19	0,062	0,073	0,064	0,044
Co	0,095	0,031	0,023	0,028	-	0,010	0,002	0,035
Ti	0,075	0,257	0,047	0,017	0,08	0,0149	0,073	0,024
Nb	0,087	0,034	0,031	0,04	0,01	0,012	0,009	0,018
V	1,2	0,097	0,047	0,043	0,011	0,013	0,009	0,01
Ni_e	14,268	14,626	14,9	14,668	3,152	5,23	6,692	9,158
Cr_e	4,81	6,25	10,145	14,74	13,272	13,1	13,166	13,548
Micro structura	75%M+ 25%F	90%M+ 10%F	60%M+ 40%F	100%A	55%M+ 45%F	86%M+ 14%F	100%M	90%M+ 10%F
R_m [N/mm ²]	1450	1336	1540	835	968	989	1035	1002
R_{p0,2} [N/mm ²]	1020	935,2	1083	626	678	695	725	701
Duritatea (HRC)	43,66	40	46,33	25	29	30	31	30
M - martensită, A- austenită, F - ferită, *Oțel inoxidabil III-RNR –folosit la navele maritime								

Tabelul 4.1 (continuare) Compoziție chimică. Caracteristici mecanice. Microstructură [14]

Element chimic	Simbolul oțelului inoxidabil			
	OH12NDL	X20Cr13	X10CrNi18/4PH	Inox III-RNR*
	Procentul de elemente chimice, %			
C	0,1	0,15	0,1	0,12
Si	0,3	0,6	0,32	1,0
Mn	0,4	0,7	3,45	0,6
Cr	12,8	13,0	19,7	15,0
Ni	1,25	0,6	3,4	2,0
Mo	-	-	-	0,2
Cu	0,9	-	1,89	1,5
P	0,09	0,035	0,02	-
S	0,03	0,03	0,07	-
Ni_e	4,45	5,4	8,125	6,1
Cr_e	13,2	14,05	20,23	16,1
Microstructura	88%M+12%F	90%M+10%F	74%A+5%M+21%F	84%M+16%F
R_m [N/mm²]	650	600	610	550
R_{p0,2} [N/mm²]	400	300	338	380
Duritatea (HB)	225	170	185	159

M - martensită, A- austenită, F - ferită, *Oțel inoxidabil III-RNR -folosit la navele maritime

Particularitatea modelului pe care îl propun, față de cele stabilite de Sakai-Shima și Bordeasu, constă în limitarea domeniilor de rezistență la cavitație, în una din clasele prezentate în tabelul 4.2, stabilite de dr.ing. Alin Dan Jurchela [71], pe baza parametrului rezistența normalizată la cavitație (R_{ns}).

Tabelul 4.2 Limitele pentru domeniilor de rezistențe la eroziune cavitațională (material etalon OH12NDL)

Clasa	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
R_{ns}	< 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,6

În acest tabel relația de calcul a parametrului R_{ns} , conform ASTM G32-2010, este:

$$R_{ns} = \frac{v_s}{v_{se}} \quad (4.23)$$

unde: v_s , și v_{se} , (mărimile cu indicele "e" se referă la oțelul etalon)- reprezintă valorile de stabilizare spre care tinde vitezele de eroziune, definite de curbele de aproximare, construite cu relații de forma celei din cap.3:

$$MDER(t) = v(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (3.7)$$

Precizare: Oțelul etalon este OH12NDL, considerat cu bună rezistență la eroziunea cavitației, în baza rezultatelor oferite de paletel turbinelor hidraulice de la Porțile de Fier I și II, turnate din această marcă de oțel.

Limitele domeniilor stabilite în tabelul 4.2 sunt verificate pentru oțelurile cercetate și prezentate în capitolul 3, precum și pentru cele prezentate în tabelul 4.1, testate pe aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1. Verificarea,

după valorile parametrului R_{ns} , este redată prin datele din tabelul 4.3. În acest tabel, pentru oțelurile inoxidabile cercetate de dr.ing Alin Dan Jurchela [71], în teza sa de doctorat, ca și în tabelul 4.1, s-au folosit aceeași metodă de identificare cu cea descrisă în cadrul tezei, la capitolul 3, pentru oțelurile cercetate de subsemnatul (de punere în evidență a proporției aproximative de nichel și crom, ca principale elemente chimice și de diferențiere după conținuturile aproximative de carbon).

Tabelul 4.3 Clasificarea după parametrul R_{ns} (Oțelul etalon OH12NDL)

Rezistența la cavitație	Materialul	R_{ns}
Superrezistență	Ni6Cr12C1T1	0,11
Excelentă	Ni10Cr6C1T1	0,24
	Ni10Cr12C1T1	0,29
	Inox III RNR	0,22
Foarte bună	X20Cr13	0,59
	X10CrNi18/4PH	0,47
	Ni10Cr10C1T1	0,44
	Ni10Cr18C1T1	0,43
	Ni10Cr24C1T1	0,41
	Ni10Cr13C036T1	0,73
	Ni10Cr14C036T1	0,76
	Ni2Cr12C1T1	0,51
	Ni6Cr12C036T1	0,62
	Ni8Cr12C036T1	0,59
Bună	OH12NDL	1,0
	Ni10Cr16C036T1	0,92
	Ni10Cr18C036T1	1,05
	Ni05Cr12C1T1	0,88
	Ni2Cr12C036T1	0,88
	Ni4Cr12C036T1	0,88

Limitarea domeniilor, în cadrul metodei propuse, după cum se va vedea mai jos, este realizată prin curbe similare celor stabilite de Sakai-Shima și Bordeasu, ce corelează parametrul $1/MDER$ cu parametrii ce înglobează, în structura lor, principalele proprietăți mecanice (R_m , $R_{p0.2}$, HB) și influența compoziției chimice, respectiv constituției structurale prin raportul Cr_e/Ni_e .

4.3.2 Corelarea parametrului $1/MDER$ cu constituția chimică

În diagrama din fig. 4.4 se prezintă curba ce stabilește tendința de influență a raportului (Crom echivalent/Nichel echivalent) – notat Cr_e/Ni_e . S-a folosit acest raport deoarece prin el se stabilește tipul și natura constituției microstructurale a oțelurilor inoxidabile (vezi diagrama Schäffler) [14], tabelul 4.1 și, indirect, se pune în evidență influența principalelor elemente chimice și de aliere asupra rezistenței la cavitație.

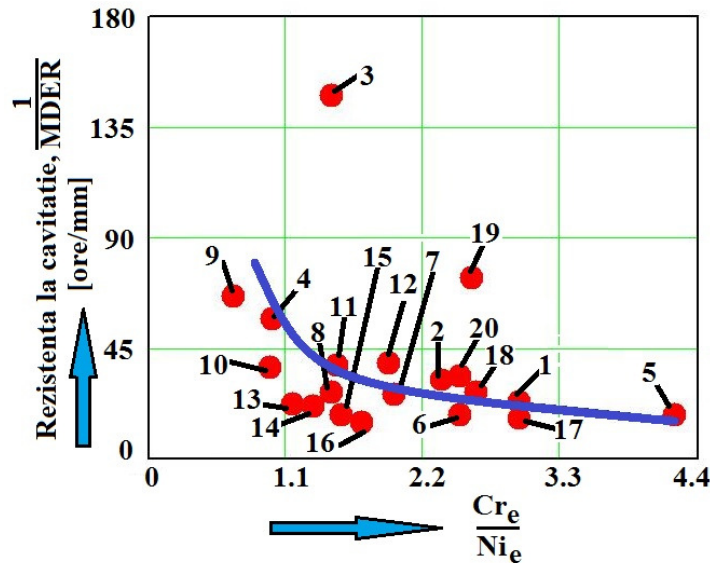


Fig. 4.4 Ordonarea oțelurilor după rezistența la cavitație și raportul $\frac{Cr_e}{Ni_e}$
 Notatii: **1.** Ni05Cr12C1T1; **2.** Ni2Cr12C1T1; **3.** Ni6Cr12C1T1; **4.** Ni10Cr12C1T1;
5. Ni2Cr12C036T1; **6.** Ni4Cr12C036T1; **7.** Ni6Cr12C036T1; **8.** Ni8Cr12C036T1; **9.** Ni10Cr6C1T1;
10. Ni10Cr10C1T1; **11.** Ni10Cr18C1T1; **12.** Ni10Cr24C1T1; **13.** Ni10Cr13C036T1;
14. Ni10Cr14C036T1; **15.** Ni10Cr16C036T1; **16.** Ni10Cr18C036T1; **17.** OH12NDL; **18.** X20Cr13;
19. OȚEL INOXIDABIL III-RNR; **20.** X10CrNi18/4PH

Diagrama din fig. 4.4 sugerează scăderea rezistenței la cavitație cu creșterea raportului $\frac{Cr_e}{Ni_e}$. Consider firească această tendință, deoarece creșterea raportului se poate face fie prin două căi:

1. prin creșterea conținutului în Cr_e , pentru un conținut în nichel de circa 10 % situație în care crește proporția de ferită din structura oțelului, componenta cu cea mai scăzută rezistență la cavitație;
2. prin scăderea conținutului de Ni_e la valori mai mici de 6 %, pentru un conținut constant în crom de circa 12 %, cazul în care se ajunge la o structură formată din martensită și ferită, sau numai ferită (vezi diagrama Schöffler, fig. 3.3), deci tot cu o structură ce va conține componenta cu cea mai scăzută rezistență la cavitație (ferita).

4.3.3 Corelarea parametrului 1/MDER cu proprietățile mecanice

Modelele prezentate la subcapitolul 4.2 arată că rezistența la cavitație poate fi estimată, cu un anumit grad de precizie, prin relații corelate cu una sau mai multe proprietăți mecanice ale oțelurilor. Plecând de la aceste premize, în figurile de mai jos sunt redată diagramele de corelare a rezistenței la eroziunea cavitației, exprimată prin parametrul 1/MDER, cu principalele proprietăți mecanice ale celor 16 oțeluri inoxidabile cercetate în cadrul proiectului ID 34/2007, dar și ale celorlalte 4 menționate în tabelul 4.1.

În tabelul 4.4 sunt cuprinse relațiile ce definesc curbele de aproximare.

Numerele din figurile 4.5- 4.13 reprezintă oțelurile folosite în stabilirea modelului, după cum urmează: **1.**Ni05Cr12C1T1; **2.** Ni2Cr12C1T1; **3.** Ni6Cr12C1T1; **4.**Ni10Cr12C1T1; **5.**Ni2Cr12C036T1; **6.**Ni4Cr12C036T1; **7.**Ni6Cr12C036T1; **8.**Ni8Cr12C036T1; **9.**Ni10Cr6C1T1; **10.**Ni10Cr10C1T1; **11.**Ni10Cr18C1T1; **12.**Ni10Cr24C1T1; **13.**Ni10Cr13C036T1; **14.**Ni10Cr14C036T1; **15.**Ni10Cr16C036T1; **16.**Ni10Cr18C036T1; **17.**OH12NDL; **18.**X20Cr13; **19.**OȚEL INOXIDABIL III-RNR; **20.**X10CrNi8/4PH

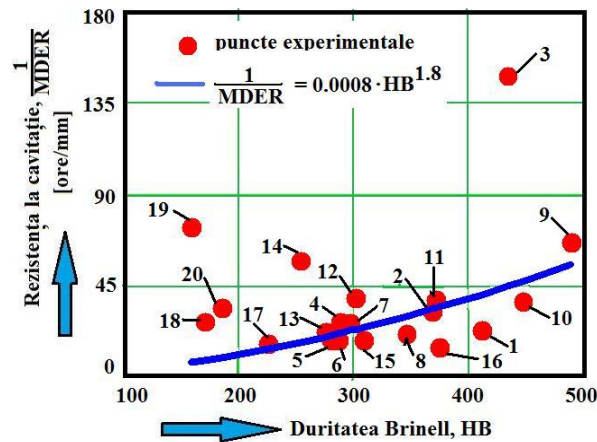


Fig.4.5 Variația rezistenței la cavitație cu duritatea oțelului

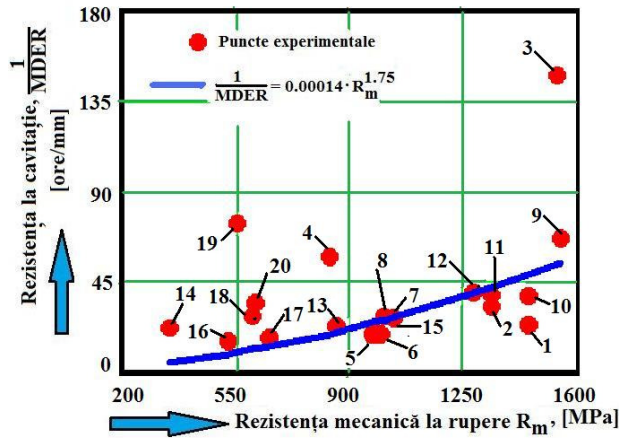


Fig.4.6 Variația rezistenței la cavitație cu rezistența mecanică la rupere a oțelului

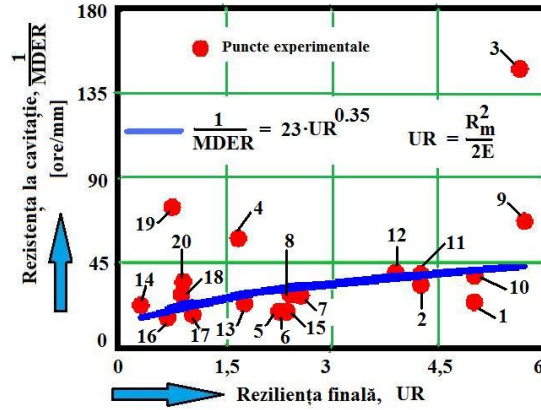


Fig.4.7 Variația rezistenței la cavitație cu reziliența finală a oțelului

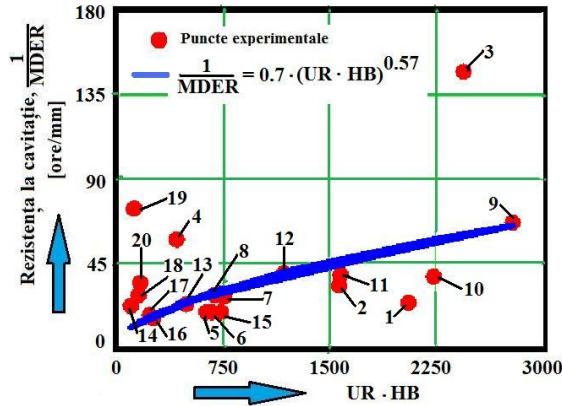


Fig.4.8 Variația rezistenței la cavitație cu reziliența finală și duritatea Brinell

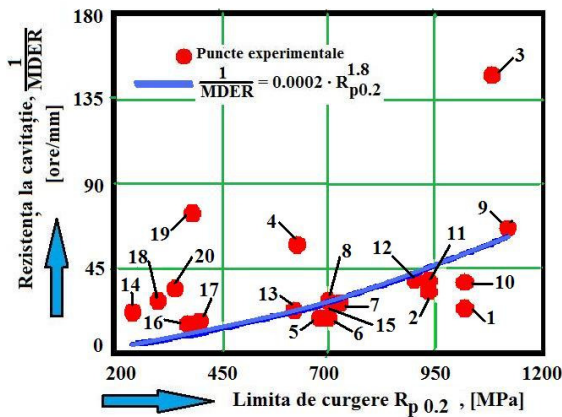


Fig.4.9 Variația rezistenței la cavitație cu limita de curgere a oțelului

Tabelul 4.4 Expresiile analitice ale curbelor de aproximație

Figura	Forma analitică	Coeficientul C	Coeficientul D	Observații
4.5	$1/MDER = C \cdot HB^D$	0,0008	1,8	
4.6	$1/MDER = C \cdot R_m^D$	0,00014	1,75	
4.7	$1/MDER = C \cdot UR^D$	23	0,35	$UR = R_m^2 / 2E$
4.8	$1/MDER = C \cdot (UR \cdot HB)^D$	0,7	0,57	
4.9	$1/MDER = C \cdot R_{p0.2}^D$	0,0002	1,8	

Analizând datele din tabelul 4.4, cu privire la forma relațiilor analitice și valorile coeficienților, pentru corelarea principalelor proprietăți mecanice HB, R_m , $R_{p0.2}$, se constată că:

- valorile parametrului D prezintă diferențe egale sau nesemnificative față de valorile stabilite de Hammitt și Garcia [54], [55], [56], [53], [48]. Această diferență arată că noile relații stabilite pot fi utilizate spre mărirea gradului de generalizare a relațiilor oferite de cei doi cercetători. De asemenea, prin comparație cu relațiile din tabelul 3.12 ce definesc curbele de aproximație se constată că parametrul de formă D este identic, ceea ce confirmă valabilitatea relațiilor stabilite de Hammitt și Garcia, pentru corelarea dintre parametrul $1/MDER$ și proprietățile materialului;

- corelările cu rezistența mecanică la rupere R_m și limita de curgere $R_{p0.2}$, prin relații similare, ca formă, celor stabilite de Hammitt-Garcia pentru duritate, realizate în cadrul tezei, oferă posibilitatea estimării rezistenței oțelurilor inoxidabile și după aceste caracteristici mecanice.

Totodată, consider că prin relațiile din tabelul 4.4, cu care s-au construit curbele de aproximație din fig.4.5-4.9, se arată că duritatea, limita de curgere și rezistența mecanică la rupere pot fi cuprinse într-o relație prin care să se arate tendința de comportare a materialului la eroziunea cavitației.

Folosind principiile de clasificare ale oțelurilor inoxidabile, cercetate în Laboratorul de Cavitație din Timișoara, descrise la subcapitolul 4.3.1, în diagramele din fig.4.10 și 4.11 s-a corelat rezistența la cavitație, exprimată prin parametrul $1/MDER$, cu proprietățile mecanice exprimate, prin coeficientul Φ , respectiv parametrul adimensional Φ_1 . Pentru adimensionalizare s-au utilizat proprietățile mecanice ale oțelului inoxidabil OH12NDL (tabelul 4.1 continuare), oțelul etalon pentru Laboratorul de Cavitație.

Curbele, notate cu I, II și III, spre deosebire de curbele stabilite de Sakai-Shima și Bordeășu, fig. 4.3, limitează superior domeniile de clasificare a oțelurilor cercetate, după valorile parametrului $1/MDER$, în conformitate cu datele din tabelul 4.2 și 4.3. Prin curba IV „*linie continuă*” s-a limitat inferior domeniul de existență al oțelurilor cercetate, iar prin cu curba „*linie întreruptă*” s-a dorit a se pune în evidență că orice creștere a parametrilor Φ și Φ_1 are loc doar prin tratamente ce duc la creșterea valorilor caracteristicilor mecanice (termice, termochimice, mecanice, neconvenționale, etc.).

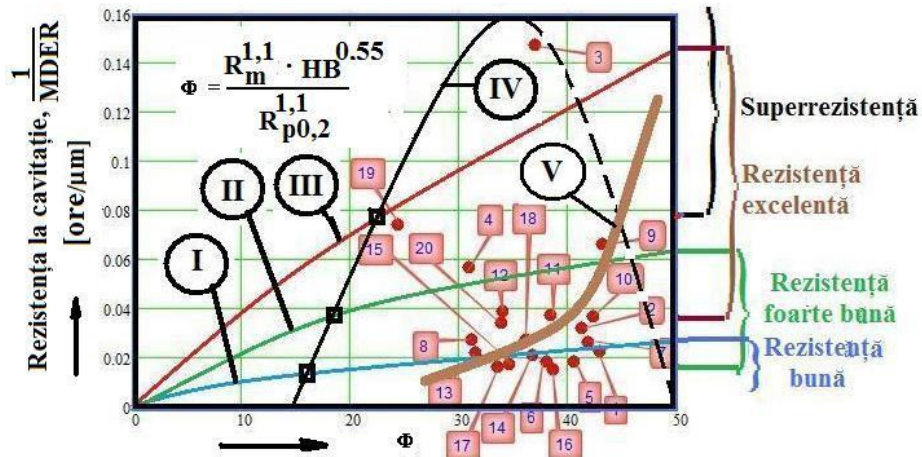


Fig. 4.10 Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței la cavitație

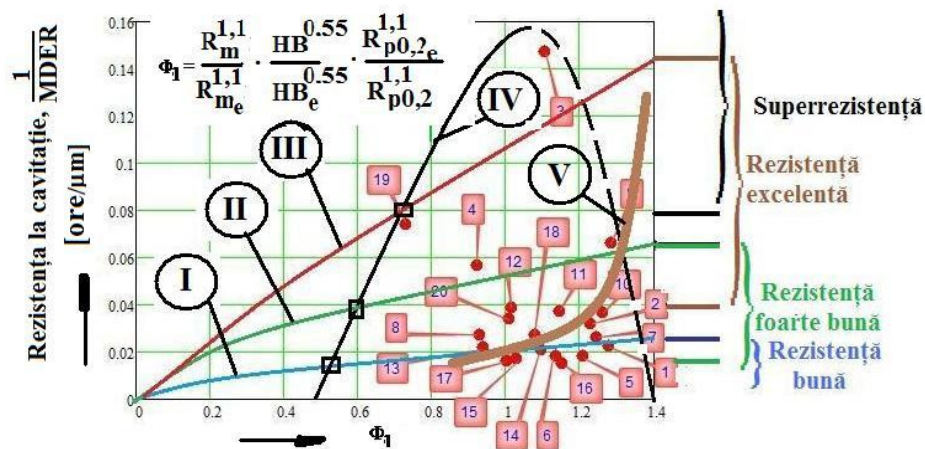


Fig. 4.11 Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței la cavitație

Ecuțiile curbelor din fig. 4.10 și 4.11, ce delimitează superior domeniile de rezistență la cavitație pentru oțelurile inoxidabile utilizate și cercetate în aparatul magnetostrictiv cu tub de nichel T1, sunt:

- **pentru corelarea cu parametrul Φ**
- pentru curba I

$$1/\text{MDER} = 0,022 \cdot (1 - e^{-0,031 \cdot \Phi}) + 0,022 \cdot 0,031 \cdot \Phi \cdot e^{-0,031 \cdot \Phi} \quad (4.24)$$

- pentru curba II

$$1/\text{MDER} = 0,062 \cdot (1 - e^{-0,021 \cdot \Phi}) + 0,062 \cdot 0,021 \cdot \Phi \cdot e^{-0,021 \cdot \Phi} \quad (4.25)$$

- pentru curba III

$$1/\text{MDER} = 0,31 \cdot 0,006 \cdot (1 - e^{-0,006 \cdot \Phi}) + 0,31 \cdot 0,006 \cdot \Phi \cdot e^{-0,006 \cdot \Phi} \quad (4.26)$$

• pentru corelarea cu parametrul Φ_1

- pentru curba II

$$1/\text{MDER} = 0,022 \cdot (1 - e^{-1,2 \cdot \Phi_1}) + 0,022 \cdot 1,2 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-1,2 \cdot \Phi_1} \quad (4.27)$$

- pentru curba II

$$1/\text{MDER} = 0,006 \cdot (1 - e^{-0,09 \cdot \Phi_1}) + 0,006 \cdot 0,09 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-0,09 \cdot \Phi_1} \quad (4.28)$$

- pentru curba III

$$1/\text{MDER} = 0,31 \cdot (1 - e^{-0,2 \cdot \Phi_1}) + 0,31 \cdot 0,2 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-0,2 \cdot \Phi_1} \quad (4.29)$$

Se observă că aceste relații au un termen exponențial în plus față de cele stabilite de Sakai-Shima [129], rel. (4.17) și Bordeasu [14], rel. (4.21), și parametrii de scară și formă au valori total diferite (492 și 1,887-modelul Sakai-Shima, respectiv 445 și 2,163 – modelul Bordeasu), din cauza ierarhizării pe cele 4 clase de rezistență și estimării parametrului $1/\text{MDER}$ prin $\text{ore}/\mu\text{m}$.

Prin curba IV s-a dorit limitarea inferioară a domeniilor din punct de vedere al proprietăților mecanice pe următoarele considerente:

1- în general oțelurile inoxidabile au proprietăți mecanice superioare oțelurilor slab aliate și nealiate, fără tratamente de durificare superficială sau structurală;
2. alegerea oțelurilor inoxidabile, pentru piese ce funcționează în regim de cavitație, se face, în principal pe criteriul proprietăților mecanice, fără a se ține seama, în faza inițială, de eventualitatea utilizării tratamentelor ce sporesc valoarea acestor proprietăți.

3. în ultimul timp, pentru creșterea rezistenței la cavitație, oțelurile folosite în fabricația elicelor navale, paletelor și rotoarelor de mașini hidraulice sunt supuse unor tratamente de durificare superficială și structurală, care duc la creșterea proprietăților mecanice, în special rezistența mecanică la rupere și duritate.

Interesant în această limitare este că punctele de intersecție dintre curba de delimitare a domeniului proprietăților (curba IV) cu cele de delimitarea a domeniilor de rezistență (cu bună rezistență spre cea cu superrezistență), duc la valori ale parametrului $1/\text{MDER}$, tabelul 4.5, care respectă, aproximativ, criteriul de dublare a intervalului, stabilit de Jurchela pentru R_{ns} (tabelul 4.2) în teza sa de doctorat [71].

Tabelul 4.5 Limitele pentru domeniile de rezistență la eroziune cavitațională

Parametrul de corelare	Clasa			
	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
	Parametrul rezistenței la cavitație $1/\text{MDER}$ [ore/ μm]			
Φ	>0,078	0,038-0,078	0,016-0,038	<0,016
Φ_1	>0,08	0,039-0,08	0,016-0,039	<0,016

Notă: Parametrul Φ s-a determinat cu relația $\Phi = \frac{R_m^{1,1} \cdot HB^{0,55}}{R_{p0,2}^{1,1}}$. În relația

$$\Phi_1 = \left(\frac{R_m}{R_{me}} \right)^{1,1} \cdot \left(\frac{R_{p0,2e}}{R_{p0,2}} \right)^{1,1} \cdot \left(\frac{HB}{HB_e} \right)^{0,55}$$

valorile notate cu „e” sunt ale oțelului

OH12NDL, etalon pentru Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara.

Curba V, fig. 4.10 și 4.11, prin care se aproximează valorile experimentale, sugerează că prin creșterea valorilor lui Φ și Φ_1 , respectiv a proprietăților mecanice rezistența la cavitație va spori. Această constatare justifică eforturile cercetătorilor în găsirea unor tehnologii de tratament prin care paletele și rotoarele mașinilor hidraulice să își sporească durata de viață la solicitările cavitaționale inevitabile.

Suprapunerea dintre clase, pentru valori ridicate ale parametrilor Φ sau Φ_1 , prin acest mod de limitare superioară, cum se poate observa în diagramele din fig. 4.10 și 4.11, arată, așa cum se întâmplă în realitate, că există oțeluri care prin proprietățile mecanice ce le pot dobândi, vor putea fi catalogate ca fiind cu bună sau foarte bună, respectiv cu foarte bună sau excelentă rezistență la cavitație. Prin urmare delimitarea, prin valori sigure, este imposibilă, pentru un proces de complexitatea cavitației.

4.3.4 Corelarea parametrului 1/MDER cu proprietățile mecanice și constituția chimică

Plecând de la corelațiile grafice din fig.4.4- 4.9 și folosind relațiile lui Sakai-Shima [129], îmbunătățite de Bordeasu [13], [14], s-au construit diagramele din figura 4.12 și 4.13 care constituie o generalizare pentru oțelurile inoxidabile, deoarece prin parametrii Ψ , respectiv adimensional Ψ_1 (folosind ca oțel de referință tot oțelul inoxidabil OH12NDL) se introduce și influența constituției chimice (prin Cr_e/Ni_e), care determină natura constituțiilor microstructurali [27], [13].

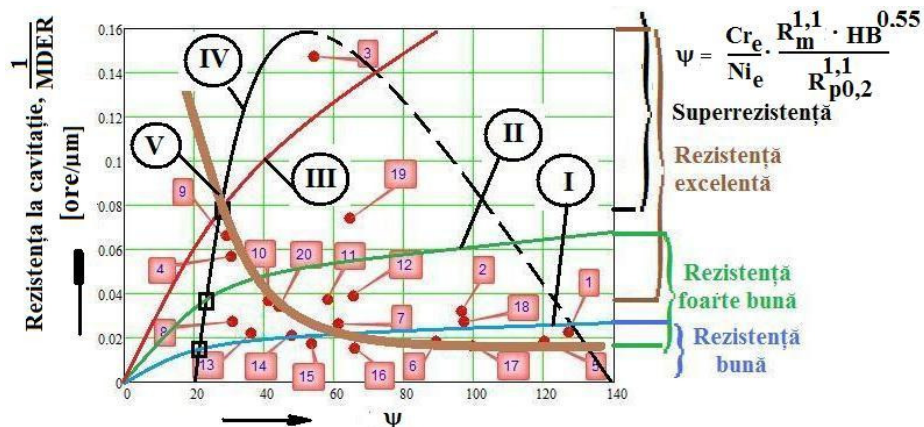


Fig. 4.12 Influența proprietăților mecanice și a constituției chimice asupra rezistenței la cavitație

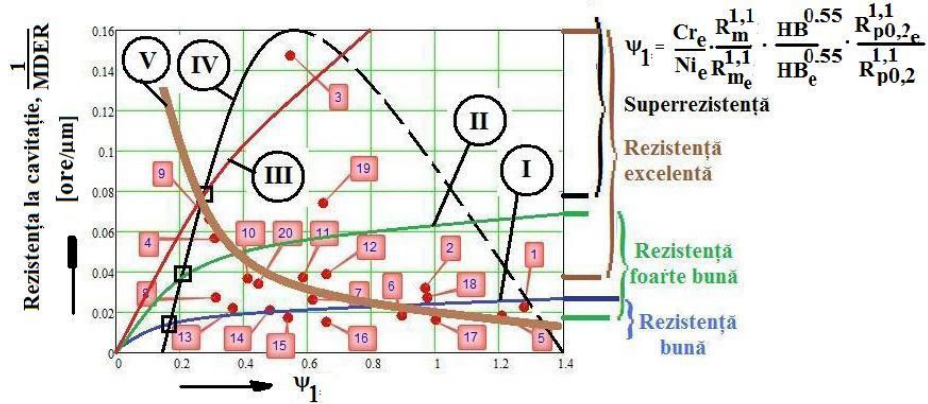


Fig. 4.13 Influența proprietăților mecanice și a constituției chimice asupra rezistenței la cavitație

Ecuțiile curbelor din fig. 4.12 și 4.13 sunt:

- **pentru corelarea cu parametrul ψ**

- pentru curba I

$$1/\text{MDER} = 0,024 \cdot (1 - e^{-0,031 \cdot \psi}) + 0,024 \cdot 0,031 \cdot \psi \cdot e^{-0,031 \cdot \psi} \quad (4.30)$$

- pentru curba II

$$1/\text{MDER} = 0,06 \cdot (1 - e^{-0,016 \cdot \psi}) + 0,06 \cdot 0,016 \cdot \psi \cdot e^{-0,016 \cdot \psi} \quad (4.31)$$

- pentru curba III

$$1/\text{MDER} = 0,22 \cdot (1 - e^{-0,01 \cdot \psi}) + 0,22 \cdot 0,1 \cdot \psi \cdot e^{-0,1 \cdot \psi} \quad (4.32)$$

- **pentru corelarea cu parametrul ψ_1**

- pentru curba I

$$1/\text{MDER} = 0,024 \cdot (1 - e^{-1,8 \cdot \psi_1}) + 0,024 \cdot 1,8 \cdot \psi_1 \cdot e^{-1,8 \cdot \psi_1} \quad (4.33)$$

- pentru curba II

$$1/\text{MDER} = 0,06 \cdot (1 - e^{-1,9 \cdot \psi_1}) + 0,06 \cdot 1,9 \cdot \psi_1 \cdot e^{-1,9 \cdot \psi_1} \quad (4.34)$$

- pentru curba III

$$1/\text{MDER} = 0,18 \cdot (1 - e^{-0,9 \cdot \psi_1}) + 0,18 \cdot 0,9 \cdot \psi_1 \cdot e^{-0,9 \cdot \psi_1} \quad (4.35)$$

Se constată că deși aceste relații au aceeași formă cu cele stabilite anterior, introducerea efectului dat prin raportul Cr_e/Ni_e parametrii de scară și formă au valori foarte diferite. Acest aspect demonstrează complexitatea procesului

cavitațional și dificultatea de a stabili un model general valabil, tocmai din cauza multitudinii factorilor ce determină rezistența la cavitație (vezi *capitolul 1 și 2*).

Și din aceste diagrame se observă că pentru punctele de intersecție dintre curbele de delimitare a domeniului de rezistență cu cel al proprietăților mecanice, corelate cu raportul Cr_e/Ni_e , în zona inferioară (stânga), se respectă, aproximativ, dublarea limitei intervalului de existență a unei clase de rezistență la cavitație, de la minim spre maxim, tabelul 4.6. Acest fenomen are loc indiferent dacă folosim, pentru corelarea dintre proprietăți mecanice și structură ψ sau parametrul adimensional ψ_1 , conform metodelor Bordeășu și Sakai-Shima.

Tabelul 4.6 Limitele pentru domeniile de rezistență la eroziune cavitațională

Parametrul de corelare	Clasa			
	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
	Parametrul rezistenței la cavitație1/MDER [ore/ μm]			
ψ	>0,077	0,038-0,77	0,017-0,038	<0,017
ψ_1	>0,077	0,038-0,07	0,017-0,039	<0,017

Notă: Parametrul ψ s-a determinat cu relația $\Psi = \frac{Cr_e}{Ni_e} \cdot \frac{R_m^{1,1} \cdot HB^{0,55}}{R_{p0,2}^{1,1}}$. În

relația $\Psi_1 = \frac{Cr_e}{Ni_e} \cdot \left(\frac{R_m}{R_{me}}\right)^{1,1} \cdot \left(\frac{R_{p0,2e}}{R_{p0,2}}\right)^{1,1} \cdot \left(\frac{HB}{HB_e}\right)^{0,55}$ valorile notate cu „e”,

pentru proprietățile mecanice, sunt ale oțelului OH12NDL, etalon pentru Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara.

Din delimitarea domeniilor diferitelor rezistențe, prin cel trei curbe, rezultă următoarele:

1. Extensia domeniilor de la bun spre superrezistentă este justificabilă, deoarece crearea unor proprietăți ridicate necesită aplicarea de tratamente adecvate și de noi tehnologii care să conducă la constituțiile chimice necesare obținerii unor constituenți structurali cu rezistență sporită la cavitație.
2. Limitarea la stânga este impusă pentru diferențierea de oțelurile cu proprietăți mecanice scăzute și care nu fac parte din categoria oțelurilor inoxidabile (oțeluri nealiate și slab aliate, metale monofazice, etc.).
3. Limitarea la dreapta domeniul de rezistență este dată pe considerentul că proprietățile mecanice și structura pot fi modificate prin diverse tratamente termice, termochimice, mecanice sau neconvenționale, care pot duce la o îmbunătățire substanțială a rezistenței la atacul eroziv al cavitației.
4. Aceste diagrame, permit anticiparea rezistenței la eroziunea prin cavitație a unui oțel inoxidabil, dacă se cunosc proprietățile mecanice și constituția chimică.

Spre deosebire de fig. 4.10 și 4.11, în fig. 4.12 și 4.13, **curba V**, prin care se aproximează valorile experimentale, sugerează că prin creșterea lui ψ , sau ψ_1 , rezistența la cavitație scade. Consider că acest fenomen are loc ca urmare a creșterii domeniului de ferită (componenta structurală cu cea mai mică rezistență la cavitație) prin creșterea valorii raportului Cr_e/Ni_e .

Și din diagramele prezentate în fig. 4.12 și 4.13 rezultă aceeași concluzie, din punct de vedere al suprapunerii, în zonele ridicate ale valorilor parametrilor ψ și ψ_1 consemnată la ierarhizarea după valorile parametrilor Φ , respectiv Φ_1 , anume că

pot fi concepute oțeluri, cu combinații de structuri și proprietăți mecanice prin care să poată fi catalogate ca fiind cu bună sau foarte bună rezistență, respectiv cu foarte bună sau excelentă la cavitație.

4.4 Concluzii

1. S-a creat un model ce permite anticiparea rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile, care constituie o generalizare a relațiilor oferite de Sakai-Shima și Bordeasu, prin faptul că permite ierarhizarea oțelurilor inoxidabile, cercetate în Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara, pe patru clase de rezistență la cavitație (bună, foarte bună, excelentă și superrezistență) și delimitează domeniul acestora după valorile parametrilor Φ , Φ_1 , ψ și ψ_1 .
2. Pentru anticiparea comportamentului la cavitație al oțelurilor inoxidabile, destinate echipamentelor hidromecanice, se pot folosi diagramele din figurile 4.10 și 4.13, calculând coeficienții Φ , respectiv Φ_1 , sau raportul Cr_e/Ni_e și coeficienții ψ , respectiv ψ_1 .
3. În vederea creșterii gradului de aplicabilitate a relațiilor și diagramelor construite în acest capitol este necesară lărgirea bazei de date de oțeluri inoxidabile, cercetate și în aparate vibratorii cu alți parametri funcționali.
4. Metoda prezentată confirmă necesitatea introducerii în normele standard a unor prevederi legate de rezistența la distrugere prin cavitație pentru oțelurile utilizate în turnarea paletelor și rotoarelor de mașini hidraulice, precum și a elicelor navale. Necesitatea este impusă de faptul că ordonarea materialelor după rezistența la distrugere cavitațională ($1/MDER$) are criterii diferite de cele standard de clasificare a materialelor (în particular a oțelurilor) pe grupe de calitate.
5. Se impune verificare metodei prin extinderea la alte aparate vibratorii, cu parametri diferiți de ai aparatului vibrator magnetostrictiv T1, dar și la alte categorii de oțeluri, precum și la oțeluri inoxidabile durificate superficial și structural.
6. Creșterea cantității de crom, care implică creșterea valorii raportului Cr_e/Ni_e , va duce la scăderea rezistenței la cavitație prin extinderea domeniului alfa-ferit (ferita-componenta cu cea mai scăzută rezistență la cavitație).

CAP.5. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Studiile bibliografice, cercetările experimentale și analizele realizate în cadrul programului de doctorat și prezentate în teză conduc la următoarele concluzii, cu caracter general:

- cercetarea eroziunii prin cavitație continuă să fie o problemă de actualitate și este mult amplificată în ultimii ani, ca urmare a ritmului ascendent de dezvoltare și rețehnologizare 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 produsă prin cavitație, în laborator, este necesară dacă prin ea se pune în evidență și influența factorilor ce definesc marca de oțel asupra comportării și rezistenței sale la cavitație;
- evaluarea comportării materialelor la eroziunea cavitației este indicat să se facă atât pe baza curbelor și parametrilor caracteristici cât și pe baza microfotografiilor suprafețelor degradate, realizate la diverși timpi intermediari și final ai atacului cavitației;
- mecanismul eroziunii prin cavitație, al aliajelor feroase, este dependent de ponderea elementelor de aliere. Aliajele cu un conținut redus de elemente de aliere prezintă o rupere ductilă, la aliajele bogat aliate eroziunea se produce prin propagarea fisurilor de oboseală, la scară microscopică, în toată suprafața, iar în cazul aliajelor mediu aliate, eroziunea se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere izolate și dispersate pe toată suprafața;
- creșterea rezistenței aliajelor feroase, în particular a oțelurilor inoxidabile, la atacurile cavitație, se poate face prin diverse procedee de durificare structurală și superficială (termic, chimic, sau de altă natură). Alegerea acestuia depinde de dimensiunile piesei ce urmează a funcționa în regim cavitațional.
- toate cele opt oțeluri cercetate pot fi utilizate în fabricarea paletelor și rotoarelor de mașini hidraulice (turbine și pompe), dar și a elicelor navelor maritime și fluviale;
- oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel (de aproximativ 10 %) și variabil în crom, cu microstructuri în care austenita este majoritară, prin proprietățile mecanice dobândite pot duce la creșterea rezistenței la cavitație, oferind, astfel, soluții noi de oțeluri pentru fabricarea paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice;
- prin creșterea valorilor proprietăților mecanice R_m , $R_{p0,2}$ și duriității din suprafața atacată, rezistența oțelurilor la eroziunea prin cavitație se va îmbunătăți;
- conținutul de carbon influențează comportarea și rezistența oțelurilor la eroziunea prin cavitație. Oțelurile cu circa 0,1 % carbon prezintă o comportare și rezistență la cavitație superioară celor cu circa 0,036 % carbon;
- cavitația produsă în cele două aparate vibratoare (magnetostrictiv cu tub de nichel T1 și cu cristale piezoceramice T2) este de intensități diferite, dar se manifestă identic din punct de vedere al mecanismului degradării suprafețelor atacate;
- amplitudinea vibrațiilor este principalul parametru funcțional al aparatului vibrator, care determină profunzimea eroziunii în structura materialului, iar frecvența vibrațiilor influențează extinderea ariei eroziunii;

- 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;
- pentru oțelurile inoxidabile cu circa 10% nichel, cantitatea de crom are un efect important în stabilirea rapoartelor dintre constituenții microstructurali și asupra valorii proprietăților mecanice și, implicit, asupra rezistenței lor la eroziunea cavitațională, însă creșterea conținutului în crom, în general peste 10 %, slăbește rezistența la cavitație a oțelului inoxidabil, datorită extinderii domeniului de ferită;
- rezistența la cavitație este foarte redusă în primele faze de atac cavitațional, datorită distrugerii vârfurilor asperităților generate prin acest procedeu. După îndepărtarea asperităților viteza de eroziune se reduce; rezistența la cavitație crescând ca urmare a durificării;
- adâncimea maximă a eroziunii, MDE_{max} , măsurată la un moment dat, oferă indicii despre intensitatea distrugerii cavitaționale, dar poate fi utilizată ca element de referință pentru compararea materialelor după rezistența la eroziunea cavitațională, fiind dependentă de locul în care s-a făcut secțiunea și mai ales de dimensiunile grăunților ce sunt expulzați într-un anumit moment al atacului cavitației;
- 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 valoare a vitezelor, ca urmare a intensităților erozive diferite;
- 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;
- cea mai ridicată rezistență la cavitația vibratoare, indiferent de aparatul utilizat, dintre cele opt oțeluri cercetate, o are oțelul cu 0,1% carbon și 6% crom, a cărei microstructură este compusă din 32% martensită și 68% austenită, iar cea mai scăzută o are oțelul cu 0,036% carbon și 18% crom, cu microstructura compusă din 93% austenită și 7% ferită;
- am pus în evidență, efectul și influența pe care o are procentul de crom în compoziția chimică a oțelurilor inoxidabile cu circa 10 % nichel, asupra rapoartelor dintre constituenții microstructurali, asupra valorii proprietăților mecanice și, implicit, asupra rezistenței lor la eroziunea prin cavitația vibratoare;
- am arătat că amplitudinea vibrațiilor este principalul parametru funcțional al aparatului vibrator, care determină profunzimea eroziunii în structura materialului, iar frecvența vibrațiilor influențează extinderea ariei eroziunii;
- pentru oțelurilor inoxidabile, testate în aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1, s-a dezvoltat o **metodă nouă**, care corelează parametrul caracteristic rezistenței la cavitație, $1/MDER$, 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 bune 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 cu bulele cavitaționale;

- oțelurile inoxidabile pot fi grupate după rezistența la cavitație funcție de valoarea raportului Cr_e/Ni_e și parametrii $\Phi, \Phi_1, \Psi, \Psi_1$;
- necesitatea standardizării criteriilor de ordonare a materialelor după rezistența la distrugere prin cavitație, deoarece acestea nu concordă cu criteriile standard de clasificare pe grupe de calitate (oțeluri carbon nealiate, oțeluri aliate pentru construcții, oțeluri inoxidabile, etc.);
- se impune lărgirea bazei de date de oțeluri inoxidabile, cercetate și în aparate vibratorii cu alți parametri funcționali.

Contribuții personale și originale

- am participat la proiectarea și realizarea unui aparat nou T2, cu cristale piezoceramice (amplitudinea vibrațiilor = 50 μm , frecvența vibrațiilor = 20kHz, diametrul epruvetei = 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 modificarea și perfecționarea generatorului electronic de ultrasunete al aparatului vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1, folosind componente mai silențioase și fiabile;
- am pus în evidență tendința de influență a principalelor proprietăți mecanice ($R_m, HB, R_{p0,2}$), de care depinde alegerea materialului din punct de vedere al solicitărilor mecanice, asupra comportării cavitaționale a celor opt oțeluri inoxidabile cercetate, aducându-se elemente noi față de cele prezentate în literatura de specialitate;
- am arătat că rezistența și comportarea oțelurilor la eroziunea prin cavitație este influențată de valoarea conținutului de carbon. Astfel, am arătat că oțelurile cu circa 0,1 % carbon prezintă o comportare și rezistență la cavitație superioară celor cu circa 0,036 % carbon;
- s-a justificat de ce, dintre cele opt oțeluri cercetate, indiferent de aparatul utilizat, oțelul cu 0,1% carbon și 6% crom, a cărei microstructură este compusă din 32% martensită și 68% austenită are cea mai ridicată rezistență la cavitația vibratoare, iar cea mai scăzută o are oțelul cu 0,036% carbon și 18% crom, cu microstructura compusă din 93% austenită și 7% ferită;
- am arătat diferențele ce apar la procesele erozive ale cavitației produsă în cele două aparate T1 și T2, din punct de vedere al inițierii și dezvoltării acesteia în suprafața expusă atacului;
- am justificat necesitatea cercetării probelor cu diametre diferite, pentru a evidenția efectul acestora asupra gradului de distrugere prin cavitația vibratoare;
- am arătat că modelul analitic, stabilit pentru curbele de pierdere masivă cumulată $m(t)$ și viteza sa de eroziune $v(t)$, poate fi utilizat și la descrierea curbelor adâncimii medii de pătrundere a eroziunii $MDE(t)$ și vitezei adâncimii medii de eroziune $MDER(t)$;
- am dezvoltat modelele stabilite de Sakai-Shima și apoi Bordeașu, prin care se corelează parametrul caracteristic rezistenței la cavitație, $1/MDER$, cu proprietățile mecanice, prin introducerea influenței compoziției chimice și a microstructurii prin introducerea conținutului de Cr_e și Ni_e și am construit o nouă relație pentru evaluarea rezistenței oțelurilor inoxidabile testate în aparatul vibrator magnetostriktiv cu tub de nichel T1, din cadrul Laboratorului de Cavitație din U.P. Timișoara;

- am investigat modul în care constituenții structurali, funcție de gradul de finețe, omogenitate și cota procentuală de participare (determinată pe baza diagramei lui Schöffler), tind să influențeze rezistența oțelurilor la eroziune cavitațională;
- am arătat că raportul dintre intensitățile de distrugere prin cavitația produsă în aparate vibratorii cu parametri funcționali nu este unul constant, el depinzând de parametrii funcționali ai aparatului, caracteristicile mecanice, structurale și compoziția chimică a materialului;
- am arătat că se pot genera oțeluri cu structuri combinate, în care austenita este componenta majoritară (austenită-martensită, austenită-ferită), care să aibă rezistență similară sau superioară celor cu structuri martensitice, dar cu proprietăți superioare pentru sudare.

CAP.6 PERSPECTIVE

Pe baza studiilor bibliografice și a rezultatelor cercetărilor obținute în cadrul tezei consider că pentru cercetările viitoare este necesară abordarea următoarelor direcții:

- dezvoltarea de noi oțeluri inoxidabile cu structuri preponderent austenitice, destinate paletelor și rotoarelor mașinilor hidraulice, datorită disponibilității lor la procesul de sudare din timpul reparațiilor curente și capitale și care, prin proprietățile mecanice dobândite în urma tratamentelor termice specifice, asigură creșterea rezistenței la cavitație;

- lărgirea bazei de date de oțeluri inoxidabile, cercetate în aparate vibratorii cu alți parametri funcționali, pentru creșterea gradului de aplicabilitate a relațiilor construite în această lucrare și de clasificare după rezistența 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;

- studierea variației microdureții suprafeței atacate cu durata cavitației vibratorii;

- construirea unor metode energetice de evaluare a comportamentului și rezistenței oțelurilor inoxidabile la cavitația vibratoare;

- utilizarea programelor profesionale și a metodelor numerice în evaluarea distrugerilor produse prin cavitație;

- verificare metodei de estimare și ierarhizare la cavitație, dezvoltată în teză, prin extinderea la alte aparate vibratorii, cu parametri diferiți de ai aparatului vibrator magnetostrictiv T1, dar și la alte categorii de oțeluri, precum și la oțelurile inoxidabile durificate superficial și structural .

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

Ing. Adrian KARABENCIOV doctorand

1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate ISI

1. I. Bordeasu, **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. I. Pădurean, **A. Karabenciov**, "Influence of structural state on cavitation erosion of martensitic stainless steel GX4CrNi13-4, heat treated", *Metalurgia International*, vol. XV, no.10, pp.46-49, 2010

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

1. I. Bordeasu, B. Ghiban, M.O. Popoviciu, V. Bălășoiu, N. Birău, **A. Karabenciov**, „The Damage of Austenite - Ferrite Stainless Steels by Cavitation Erosion”, *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, pp.0147-0148, 22-25th October 2008
2. A.D. Jurchela, I. Bordeasu, **A. Karabenciov**, O. Oancă, „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. Oancă, "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*, vol. I, pp. 553-556, mai 2011

3. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

1. **A. Karabenciov**, I. Bordeasu, 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
2. A.D. Jurchela, **A. Karabenciov**, N. Birău, „Considerations on the effect microstructure and mechanical properties of steels with constant chromium content on the resistance to cavitation erosion”, *Machine Design* 2010,

3. Monograf University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, pp.383-386, 2010
4. **A. Karabenciov**, A.D. Jurchela, N. Birău, E. Dimian, A. Lustyan, T. Bînzar, I. Bordeaşu, „The study of cavitation erosion behaviour of a range of stainless steels with constant content of carbon and chromium”, Buletinul Institutului Politehnic din Iaşi, Tomul LVI (LX), Fasc. 2A, pp. 175-180, Iaşi, 2010
5. I. Bordeaşu, M. Popoviciu, **A. Karabenciov**, A.D. Jurchela, C. Chiriţa, “New contributions în the correlation of Mechanical properties with the cavitation Resistance of stainless steels”, Buletinul Institutului Politehnic din Iaşi, Tomul LVIII (LXII), Fasc. 1, pp. 34-41, 2012

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

1. I. Bordeaşu, M. Popoviciu, V. Bălăşoiu, 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. Bordeaşu, 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

1. I. Bordeaşu, A. Jurchela, **A. Karabenciov**, D. Bordeaşu, Fl. Bodin, „Nickel’s Influence over Cavitational 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. Karabenciov**, A.D. Jurchela, N. Birău, E. Damian, A. Lustyan, T. Bînzar, I. Bordeaşu, „The study of cavitation erosion behaviour of a range of stainless steels with constant content of carbon and chromium”, Buletinul Institutului Politehnic din Iaşi, ISSN 1011+2855, Tomul LVI (LX), Fasc. 2a, pp. 175-180, Iaşi, 2010, p. 175-180
3. A. Jurchela, I. Bordeaşu, **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
4. A.D. Jurchela, I. Bordeaşu, **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
5. A.D. Jurchela, I. Bordeaşu, **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
6. A.D. Jurchela, I. Bordeășu, **A. Karabenciov**, I. Mitelea, N. Birău, „Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicole 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
 7. 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 6th International Conference, Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA'09, Nyíregyháza, Hungary, pp.225-228 noiembrie, 2009
 8. **A. Karabenciov**, I. Bordeășu, A.D. Jurchela, I. Mitelea, A.T. Lustyan, „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, vol.15, pp.773-780, Sebeș, 5-6 iunie 2009
 9. 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
 10. 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
 11. 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
 12. 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
 13. **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

6. Lucrări științifice acceptate spre publicare în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate ISI Proceedings

1. 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 Controlled Content of Chromium and Carbon”, 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012, în curs de publicare
2. **A. Karabenciov**, 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, 2012, în curs de publicare

BIBLIOGRAFIE

1. Amza. Gh., ș.a., Sisteme ultraacustice, Editura Tehnică, București 1988.
2. Anton I., Cavitația, Vol I, Editura Academiei RSR, București, 1984.
3. Anton I., Cavitația, Vol II, Editura Academiei RSR, București, 1985.
4. Anton I., Turbine hidraulice, Ed. Facla Timișoara, 1979.
5. Anton I., Kuzman-Anton A.F., s.a., Studii și cercetări pentru determinarea comportării la cavitație a oțelurilor marca T07CuMoMnNiCr165-Nb și T09CuMoMnNiCr185-Ti destinate turnării rotoarelor monobloc pentru turbinele Francis, Contr. Cercet. St. 96/1985.
6. Birău N., **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Jurchela A., Dimian E., 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, vol.17, pp.431-434, Sebeș, 4-5 iunie 2010
7. Balazas P.I., Rezultatele protecției turbinelor hidraulice de la CHE Kaunas împotriva distrugerilor prin cavitație, Culegere “Fenomenul de cavitație la turbinele hidraulice” (traducere din limba rusă), 1967, pag. 58 – 64
8. Băran Gh., Teza de doctorat: Contribuții la studiul cavitației și eroziunii cavitaționale. Facultatea Energetica, I.P.B.,1978.
9. Băran, Gh., Băran, N., 2002, Erosive abrasion of some types of steel and of pumps for hydrotransport, UPB, Sc. Bulletin Series D Mech. Eng., v. 64, nr. 1, București, ISSN 1454-2358, p. 43-52.
10. Băran, Gh., Ciocănea A., 2005, Curgeri cavitaționale și abrazive, Ed. Printech, ISBN 973-718-267-7, 175 pag.
11. Bogaciov I. N., Miuț R I., Vekslev I. G., Rezistența cavitațională a oțelurilor austenito - feritice (în limba rusă), Energomasinostroenie, Nr. 9, Leningrad, 1963.
12. Bordeasu I., Distrugeri cavitaționale, Editura MacroSOFT, Timișoara, 1998.
13. Bordeasu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006.
14. Bordeasu I., Teză de doctorat: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, 1997
15. Bordeasu I., Anton L.E., Baya A., Jurchela A.D., Considering cavitation erosion a mechanic phenomena, against chemical corrosion, Annals of DAAAM for 2008 Proceedings of The 19th International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on New Generation of Intelligent Systems and Solutions”, ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5, Trnava, Slovakia, 2008.
16. Bordeasu, I., Anton, M.I., *Correlation Between Cavitation Rate with Both Parameters of the 6. Vibratory Apparatus and the Physico-mechanical Properties of the Material*, Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, 7-10 April, France, 1998, p. 199-202.
17. Bordeasu I., Bădărău R., Jurchela A.D., The deformations and microstructural transformations analyses produced by cavitation to the austenitic stainless steel, Machine Design, University of Novi Sad, Faculty of Technical Science, Novi Sad, 2008, ISBN 978-86-7892-105-6, pp 411-414.

18. Bordeaşu 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, pp.425-430, Sebeș, 4-5 iunie 2010
19. Bordeaşu I., Ghiban B., Popoviciu M. O., Bălășoiu V., Birău N., **Karabenciov A.**, The damage of austenite-ferrite steels by cavitation erosion, Annals of DAAAM for 2008 Proceedings of The 19th International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on New Generation of Intelligent Systems and Solutions”, ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5, Târnava, Slovakia. pp.0147-0148. 2008.
20. Bordeaşu I., Jurchela A.D., **Karabenciov A.**, Bordeaşu D., Bodin F., „Nickel’s Influence over Cavitation Erosion of Stainless Steels with Constant Chromium Content”, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timișoara Transactions on Mechanics, Special Issue, Tom 53 (67), pp.421-424, Timișoara 2008
21. Bordeaşu I., **Karabenciov A.**, Jurchela A.D., Bădărău R., Bălășoiu 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, 2009
22. Bordeaşu I., Popoviciu, M., Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening, Machine Design, PP. ISSN 1821-1259, 2012.
23. Bordeaşu I., Popoviciu M., Durabilitatea cavitațională a oțelurilor folosite în fabricarea pieselor solicitate cavitațional, Analele Universității din Oradea , fascicola Mecanica, Oradea, 1993.
24. Bordeaşu I., Popoviciu M. O., Bălășoiu V., Jurchela A. D., **Karabenciov A.**, The influence of the vibratory test facility type and parameters upon the cavitation erosion evolution, IAHR, 2010 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 12 012037.
25. Bordeaşu I., Popoviciu M., **Karabenciov A.**, Jurchela A. D., New contributions on the correlation of mechanical properties with the cavitation resistance of stainless steels, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași, Tomul LVII (LXI), Fasc. 4, 2011.
26. Bordeaşu I., Popoviciu M., **Karabenciov A.**, Jurchela A.D., Chirița C., “New contributions in the correlation of mechanical properties with the cavitation Resistance of stainless steels”, Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Tomul LVIII (LXII), Fasc. 1, pp. 34-41, 2012
27. Bordeaşu, I., Popoviciu, M.O., Mitelea, I., Anton, L.E., Bayer, M., Funar, S.P. Cavitation Eroded Zones Analysis for G-X 5CrNi13.4 Stainless Steel, Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of The 18th International DAAAM Symposium “Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Creativity, Responsibility and Ethics of Engineers”, Zadar Croația, 2007, pp.105-106
28. Bordeaşu I., ș.a., An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves, Scientific Bulletin “Politehnica” University of Timișoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), ISSN:1224-6077, Timișoara, 2004, p.253-258
29. Bregliozzia G., Di Schinob A., Ahmeda S.I.-U., Kennyb J.M., Haefkea H., Cavitation wear behaviour of austenitic stainless steels with different grain sizes, www.sciencedirect .com.
30. Brigham R. J. e.a. 1973. Corrosion NACE, Vol. 29, No. 33.

31. Brooks J. W. 1987. Thèse de doctorat (Ph. D.). Université de Birmingham.
32. Brujan E.A., Al-Hussany A.F.H., Williams R.L., Williams P.R., Cavitation erosion in polymer aqueous solutions. *Wear*, 264 (2008), 1035-1042.
33. Chastell D., ș.a., *Corrosion Scientifique*, Vol. 19. pp 335. 1979.
34. Crawford A.E., *Tehnică de ultrasunete*, Dunod, Paris, 1959.
35. 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.
36. Dimian E., Bordeășu 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, pp.453-438, Sebeș, 4-5 iunie 2010
37. Dumitrescu S., ș. a. 1990. *Calculul elicei*. București: Editura Academiei Române.
38. Edwin L., Frances A., Margaret W.,- *Statistics Manual*, Dover Publications, Inc. New York.
39. Erdman-Jesnitzer F. & Louis H. 1973. ASTM STP 567. pp171.
40. Frank J.P., Michel J.M., *Fundamentals of cavitation*. Kluwer Academic Publishers-Dordrecht/Boston/London. 2004.
41. Franc J.P., ș.a., *La Cavitation, Mecanismes physiques et aspects industriels*, Press Universitaires de GRENOBLE, 1995.
42. Frunzăverde D., Muntean S., Mărginean G., Câmpian V., Marșavina L., Terzi R., Șerban V., Failure analysis of a Francis turbine runner, 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Timișoara. 2010.
43. Fujikawa S., Akamatsu T., Proc. 10th Int. Shock Tube Symp, Dep. of Aeronautical Engineering, Kyoto University, Japan, pp. 174. 1975.
44. Fujikawa S., Akamatsu T., *Bull. Jpn. Soc. Mech., Eng.*, Vol. 21, Nr. 152. 1978.
45. Gal C., ș.a., Proiectarea asistată de calculator a ghidurilor de undă pentru ultrasunete, Sesiunea de comunicări științifice a tinerilor absolvenți, Timișoara, 1988.
46. Galperin M.I., ș.a., Prevenirea distrugerilor prin cavitație și repararea acestora în condiții de exploatare „Energomașinostroenie”, 1963, Nr. 2
47. 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.
48. Garcia R., Hammitt F. G., Nystrom R.E., *Corelation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement*, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1960.
49. Georgevici I. , Teză de doctorat, Contribuții privind dezvoltarea unor țeluri inoxidabile cu transformare martensitică directă, 2003
50. Geru N., s.a., *Analiza structurii materialelor metalice*, Editura Tehnică, București, 1991.
51. Gherșghel D.A., ș.a., *Aparate cu ultrasunete*, Editura Tehnică, București, 1984.
52. Graham A. J. & Youngblood J. L. 1970. *Metal Trans.*, Vol. 1, pp. 423.
53. Hammitt F.G., *Cavitation and Multiphase Flow Phenomena*, McGraw Hill International Book Company, 1980.
54. Hammitt F.G., Bhatt N.R., *Cavitation Damage resistance of Hardened Steels*, Univ. Michigan, 1970, p.1-36.

55. 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.
56. Hammitt F.G., Nath A., De M.K., Erosion of ferrous and aluminum alloys in cavitating adiois, Report No. UMICH 014456-53-I, University, Michigan, 1980.
57. Hattori S., Ishikura R., Zhang Q., [Construction of Database on Cavitation Erosion and Analyses of Carbon Steel Data](#), Cav2003, GS-11-002. 2003.
58. Hattori S., Ishikura R., Revision of cavitation erosion database and analysis of stainless steel data [www.sciencedirect .com](http://www.sciencedirect.com).
59. 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 2010, Pages 443-448.
60. Hattori S, Mikami N., Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, *Wear*, Volume 267, Issue 11, 29 October 2009, Pages 1954-1960.
61. Heatcock, ș.a., Proc. of 5th int. Conf. On Erosion by Solid and Liquid Impact. Pp. 63-1. 1979
62. Heatcock ș.a. 1982. *Wear*, Vol. 81. pp. 311.
63. Heymann F.J.: On the time dependence of the rate of erosion due to impingement or cavitation. [in:] *Erosion by Cavitation or Impingement*, A symposium presented at the 69th Annual Meeting, ASTM, Atlantic City. ASTM Special Technical Publication no.408, pp. 70-100. 1966.
64. Heymann F. J., *Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion*, ASTM STP, Vol.474, pp212, 1970.
65. Hobbs J.M., Experience with a 20 – KC Cavitations erosion test, *Erosion by Cavitations or Impingement*, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
66. Hobbs J.M., *Vibratory cavitation erosion testing at NEL*, Confernce Machynery Groop, Edinburgh, 1974.
67. Hooper L. J., *Experimental Investigation of Initiation of Cavitation Behind an Accelerated Circular Disc*, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery Sendai, 1962.
68. Hobbs J.M., Experience with a 20 – KC Cavitations erosion test, *Erosion by Cavitations or Impingement*, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
69. Hrelescu M., *Cercetări asupra alierii oțelului moale în arcul electric cu elemente care să confere metalului depus rezistență la cavitatie*, Teza de doctorat, Timișoara, 1967
70. Ito T. 1962. An experimental investigation into the unsteady cavitation of marine propellers. IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai. 1962.
71. Jurchela, A.D., *Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitatie vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel*, Teza de doctorat, Timișoara, 2012
72. Jurchela A.D., Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Oancă O., 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
73. Jurchela, A.D., **Karabenciov A.**, Birău N., Considerations on the effect microstructure and mechanical properties of steels with constant chromium content on the resistance to cavitation erosion, *Machine Design* 2010,

- Monograf University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, pp.383-386, 2010
74. Jurchela, A.D, Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Podoleanu C., 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
 75. Jurchela A.D., Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Mitelea I., Lupu D.R., Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului aliat tratat cu fascicule 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
 76. Jurchela A.D., Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Mitelea I., Rezistența la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicule 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
 77. Jurchela A.D., Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Mitelea I., Birău N., 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
 78. Jurchela A.D., **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Mitelea I., Birău N., Dimian E., Cavitation erosion resistance of unalloyed titanium treated with electron beam, Proceedings of the 6th International Conference, Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA'09, Nyíregyháza, Hungary, pp.225-228 noiembrie, 2009
 79. Jurchela A.D., Bordeasu I., **Karabenciov A.**, Birău N., Dimian E., 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
 80. Jurchela A.D., Bordeasu 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, 2012, în curs de publicare
 81. **Karabenciov A.**, Dimian M.E., Jurchela A.D., Oancă 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, vol. I, pp. 553-556, mai 2011
 82. **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Jurchela A.D., Study of Stainless Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Carbon and 10 % Nickel, Machine Design 2009, Monography University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, pp.421-426, 2009
 83. **Karabenciov A.**, Jurchela A.D., Birău N., Dimian E., Lustyan A., Bînzar T., Bordeasu 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, Tomul LVI (LX), Fasc. 2A, pp. 175-180, Iași, 2010

84. **Karabenciov A.**, Jurchela A.D., Bordeasu 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, Timisoara, September 20-24, 2010
85. **Karabenciov A.**, Jurchela A.D., Birau N., Dimian E., Lustyan A., Binzar T., Bordeasu I., The study of cavitation erosion behaviour of a range of stainless steels with constant content of carbon and chromium, Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, ISSN 1011+2855, Tomul LVI (LX), Fasc. 2a, pp. 175-180, Iasi, 2010, p. 175-180
86. **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Jurchela A.D., Mitelea I., Lustyan A.T., Asupra rezistentei la eroziune cavitatieala a titanului aliat tratat cu fascicole laser, A IX-a Conferinta nationala multidisciplinara cu participare internationala, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii romaneesti, Stiinta si Inginerie, vol.15, pp.773-780, Sebes, 5-6 iunie 2009
87. **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Jurchela A.D., Dimian E., Birau N., Badarau R., Influenta microstructurii si a proprietatilor mecanice ale otelurilor cu continut controlat de nichel asupra rezistentei la distrugerea prin cavitatie. A-X-a Conferinta nationala multidisciplinara cu participare internationala, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii romaneesti, Stiinta si Inginerie, vol.17, pp.493-444, Sebes, 4-5 iunie 2010
88. **Karabenciov A.**, Bordeasu I., Mitelea I., Jurchela A.D., Considerations on the Cavitation Erosion Behavior of Two Stainless Steels with Similar Ratios of Structural Constituents, 21st International Conference on Metallurgy and Materials, 2012, in curs de publicare
89. 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.
90. Karimi A., Leo W.R., Phenomenological model for cavitation erosion rate, Computational Material Science and Engineering, 95, 1-4. 1987.
91. Karimi A., Martin J. L., International Metals Revue, Vol. 312, Nr. 1. 1986.
92. Knapp R., a. o., - Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, 1970.
93. Kojaeu A.F.- Experienta reconditionarii rotorului si a camerei turbinelor hidraulice de mare putere, 1965.
94. Kreanin I.R. Oteluri noi si asimilarea acestora pentru turbinele hidraulice de mare putere, "Energomașinostroenie", 1967, Nr. 9
95. Kuzman-Anton A.F., Contributions to the study of cavitation erosion on Kaplan turbine runners, Conference "Hydroforum ", Gdansk, 1985.
96. Kuzman-Anton A.F., Influenta unor proprietati fizice ale lichidului asupra incipientei si eroziunii cavitatieonale, Teza de doctorat, Timisoara, 1992.
97. Kuzman-Anton A.F., Potencz I., Rezistenta la eroziune cavitatieala a unor oțeluri indigene, Buletinul Stiintific si Tehnic al Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, Tom 23(37), Fascicula 1 -1978
98. Lambert, Teza de doctorat, Deformatia plastica si rezistenta la cavitatie a oțelurilor inoxidabile austenitice, 1998
99. Louis H., Tai P.T., Wehlage T., Yabuki A., Cavitation erosion prediction by quantification of surface integrity, International Conference, Cambridge, 1992.
100. Man M. C., Gabe D. R., Corrosion Scientifique, Vol. 21, No. 9. pp. 713. 1981.
101. Manning P. E. ș.a., Corrosion NACE, Vol. 35, No. 4. 1979.
102. Matsumura M., ASTM A STP 664. pp. 434. 1977.

103. Milicenco S.L., Repararea distrugerilor prin, cavitație la turbine hidraulice (traducere din limba rusă), 1971
104. Mitelea I., - Studiul metalelor, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1983.
105. Mitelea, I., Georgevici, I., Noi oțeluri inoxidabile în construcția echipamentelor pentru generarea puterii hidroelectrice, Simpozionul internațional „Zilele Academice Timișene, Ediția a VII-a, Timișoara, 24-25 mai 2001, Secția Materiale avansate, p. 64-69
106. Mitelea, I., Georgevici, I., Radu, B., Particularities of microstructural transformation during tempering stainless steel 13/6/1 (13%Cr, 6%Ni, 1%Mo), Buletinul Științific al Universității „Politehnica” Timișoara, Tom 47 (61), Seria Mecanică, fascicola 2, 2002, ISSN 1224-6077 p. 107-112
107. 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, p. 117-120
108. Mitelea I., Popoviciu M., Bordeasu I., ș.a., La resistance a l'erosion cavitationnelle des joints soudés en aciers inoxydables martensitiques, Buletin științific și Tehnic, Universitatea Tehnică Timișoara, Vol 37 (51), 1992.
109. Mustapha A.B., Etude des mécanismes de fissuration par fatigue-corrosion de différents types d'aciers inoxydables, Thèse de doctor. Montreal. 1983.
110. Noskievic J., The extended mathematical model of cavitation and erosion wear, Proc 6 th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1983.
111. Okada, T., Iwai, Z., Hattori, s., Tanimura, N., Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse, Wear 184, 1995, p.231-239
112. Pîlaev N.I., ș.a., Despre metodele electrochimice de protecție a turbinelor hidraulice de eroziunea de la cavitație, "Energomașinostroenie", 1968, Nr. 2
113. Pîlaev N. I., Edel I., U., Kavitația v ghidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad, 1974
114. Pădurean I., Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile, Teză de doctorat, Timișoara, 2005.
115. Pădurean I., **Karabenciov A.**, "Influence of structural state on cavitation erosion of martensitic stainless steel GX4CrNi13-4, heat treated", Metalurgia International, vol. XV, no.10, pp.46-49, 2010
116. Pereira F., Prédiction de L'Erosion de Cavitation: Approche Énergétique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne
117. Pilic-Rabadam L., Djordjevic V., - Utjecaj slanosti na brzinu erozije kavitacijom domaćih materijala za gradnju brodskih vijaka , VI Simpozijum Teorija i Praksa Brodogradnje, Sveska 2, Beograd, 1984.
118. Popoviciu M., Bordeasu I., *A quantitative method of estimating the cavitation behaviour of materials tested in a magnetostrictive facility*, Buletinul Științific , Universitatea „Politehnica” Timișoara, Vol 41 (55), 1996.
119. Popoviciu M., Bordeasu I., A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Vol II, Timișoara, 1994.

120. Popoviciu M., Bordeasu I., Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, Vol 39 (53), Fascicula 1-2, 1994.
121. Popoviciu M., Bordeasu I., Considerations upon the stating of cavitation average service life of Nodular Cast Irons and the alloys utilised for naval propellers, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, Vol 40(51), 1993.
122. Popoviciu M., Bordeasu I., Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationnelle, Bulletin Științific și Tehnic, Universitatea Tehnică, Timișoara, Vol 40(51), 1993.
123. Popoviciu O.M., Bordeasu I., Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice, Editura Politehnica, Timișoara, 1998.
124. Popoviciu M., Kuzman-Anton A. F., Contributions to the study of cavitation erosion on Kaplan turbine runners, Conference "Hydroforum ", Gdansk, 1985.
125. Popoviciu M., ș.a., Studiul experimental al rezistenței la eroziune cavitațională a două materiale utilizate în construcția de turbine hidraulice Contr. Cercet. St. 81/1978.
126. Poyet P. e.a. 1975. Memorie Scientifique, Revue Metalurgique. pp 133.
127. Preece C.M., ș.a. 1977. ASTM STP 664. pp. 409.
128. Rao P. V., ș.a. 1981. ASTM.
129. Sakai I. Shima A., On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials, Report No. 385, Tokyo. 1987.
130. Scheffel M., ș.a., Dispozitive cu ultrasunete, Partea a II a, Editura Tehnica, București, 1989
131. Scotto V. e.a. 1979. Corrosion- Scientifique, Vol. 19. pp 237.
132. Simoneanu R., Cavitation pit counting and steady - state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995
133. Simoneanu R, ș.a., Cavitation erosion and deformation mechanisms of Ni and Co austenitic stainless steels, erosion by liquid and solid impact, Proceedings of ALSI-VII, Cambridge, pp32.1-32.8. 1987.
134. Songzhou K. E. & Herman H. 1982. Wear, Vol. 80.
135. Stefec R., Franz F. 1978. A study of the pitting corrosion of cold-worked stainless steel. Corrosion -Scientifique, Vol. 18. pp. 161-167.
136. Steller K., Prediction of cavitation damage in hydraulic turbomachinery, Proc of the seventh Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapest, 1983.
137. Steller J. K., International cavitation erosion test - test facilities and experimental results, 2 - emes Journées Cavitation, Paris, March, 1992.
138. Steller K., Bugola R., Steller J., Cavitation roads and their erosive effects, 2 - emes, Journées Cavitation, Paris, 1992
139. Steller J. K., International cavitation erosion test - summary of results, International Conference, Cambridge, 1992
140. 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
141. Thiruvengadam A., Preiser H. S., - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 - 3, 1963.
142. Thiruvengadam A., Cavitation erosion, Applied Mechanics, Vol 24, Nr. 3, 1971.
143. Vaidya S. & Preece C. M. 1978. Metall. Trans. A., Vol. 9A.

144. Veerabhadra Rao P., Syamala Rao B. C., Lakshmana Rao N.s. Erosion and Cavity Characteristics in Rotating Components, J.T.E.V.A, Vol 8, No. 3. 1980.
145. Vyas B. & Preece C. M. 1973. ASTM STP 567. pp77.
146. Vyas B. & Preece C. M. 1977. Metall. Trans. A., Vol. 9A. pp 915.
147. Zheng Y.G., Luo S.Z., Ke W., Cavitation erosion–corrosion behaviour of CrMnB stainless overlay and 0Cr13Ni5Mo stainless steel in 0.5M NaCl and 0.5M HCL solutions, www.sciencedirect .com.
148. *** (2010). *Standard method of vibratory cavitation erosion test*, ASTM, Standard G32-10
149. ***Contract IDEI Cod 34/2007, DEZVOLTAREA DE MODELE PENTRU EVALUAREA COMPORTĂRII MATERIALELOR LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE, Faza 2009.
150. ***Contract de Cercetare Nr. 174/30.12.2010, CERCETARI ȘI EXPERIMENTARI PRIVIND CRESTEREA, PERFORMANTELOR TURBINELOR FRANCIS FVM DE 57.5 – 128.5 DE LA, CHE BRADISOR – ETAPA A III-A.
151. ***Grant CNCISIS 154, Proiect TIP A, Tema 4, Contract nr. 32940/22.06.2004- Studiul deformării și fisurării produse prin eroziune cavitațională la oțelurile inoxidabile austenitice folosite la turnarea paletelor de turbină hidraulică
152. ***<http://pt.scribd.com/doc/87391466/3/Turbina-Pelton>
153. ***<http://pt.scribd.com/doc/87391466/3/Turbina-Banki>
154. ***<http://pt.scribd.com/doc/87391466/3/Turbina-Francis>
155. ***<http://pt.scribd.com/doc/87391466/3/Turbina-Kaplan>