

# **TEHNICI DE OPTIMIZARE A REZISTENȚEI LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE A UNOR ALIAJE CU-ZN ȘI CU-SN**

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

**Ing. Iosif LAZĂR**

Conducători științifici: prof.univ.dr.ing. Ilaire BORDEAȘU  
prof.univ.dr.ing. Ion MITELEA  
Referenți științifici: prof.univ.dr. Anton HADAR  
prof.univ.dr.ing. Adrean CÎRCIUMARU  
conf.univ.dr.ing. Cormeliu Marius CRĂCIUNESCU

Ziua susținerii tezei: 14 aprilie 2020

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 9. Inginerie Mecanică                      |
| 2. Chimie                                   | 10. Știința Calculatoarelor                |
| 3. Energetică                               | 11. Știința și Ingineria Materialelor      |
| 4. Ingineria Chimică                        | 12. Ingineria sistemelor                   |
| 5. Inginerie Civilă                         | 13. Inginerie energetică                   |
| 6. Inginerie Electrică                      | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor                 |
| 8. Inginerie Industrială                    | 16. Inginerie și Management                |

Universitatea Politehnica 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, 2020

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 Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Vasile Pârvan 2B,  
Tel./fax 0256 404677  
e-mail: editura@upt.ro

## CUVÂNT ÎNAINTE

Orice persoană, fără prea multe noțiuni despre curgerea cavitațională, care vede o suprafață metalică distrusă, cu ciupituri mai mult sau mai puțin adânci, pe suprafețe mai mici sau mai mari, are ca primă reacție de a atribui această degradare coroziunii chimice. Însă, în momentul în care constată că suprafața metalică este a unui oțel inoxidabil, sau a altui aliaj cu rezistență ridicată la coroziunea chimică, cum sunt bronzurile navale de înaltă rezistență (de tip CuNiAl sau AMPCO), realizează că, dincolo de efectul chimic coroziv, este și efectului hidrodinamic al curgerii.

O astfel de reacție a fost și a subsemnatului, până la momentul în care, în timpul cursului de „Mecanica fluidelor și Mașini hidraulice” din perioada studenției, am luat la cunoștință de acest fenomen complex de manifestare hidrodinamică, numit **cavitația**, cu efecte greu de controlat, chiar imposibile.

Perioada de activitate ca inginer m-a dus și spre cunoașterea componentelor afectate de cavitație, prin rotoarele pompelor centrifuge, din sistemele de alimentare cu apă, puternic erodate de cavitație.

Prin documentarea ulterioară, ca urmare a curiozității, am constatat că acest fenomen nu este doar specific rotoarelor mașinilor hidraulice și elicelor navelor fluviale și maritime, ci tuturor suprafețelor aflate în curgeri cavitaționale, iar efectul degradării structurii este unul complex, dependent de parametrii curgerii hidrodinamice și de toți factorii care determină tipul materialului.

Așadar, curiozitatea mi-a creat ambiția de a cunoaște mai multe despre acest domeniu nebulos al eroziunii prin cavitație, prin care să îmi ridic și gradul de pregătire profesională. Prin urmare, pașii mi-au fost conduși către Universitatea Politehnica Timișoara, unde am luat legătura cu cei doi mentori, Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeasu și prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea, cărora le mulțumesc pentru că au acceptat să stabilizez tema prezentei teze de doctorat **„Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziune prin cavitație a unor aliaje Cu-Zn și Cu-Sn”** și să mă conducă maiestos spre finalizarea obiectivelor propuse.

Ca o continuare a cercetărilor derulate în cadrul Laboratoarelor de Cavitație și de Ingineria și Știința Materialelor, ale Universității Politehnica Timișoara, prin programul de cercetare doctorală, al prezentei lucrări, s-a urmărit îmbunătățirea comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitație vibratoare a alamei CuZn39Pb3 și bronzului CuSn12-C, cu utilizare în fabricarea diverselor piese, cum sunt: elicele vapoarelor, corpurile și sertarele robinetilor și vanelor, corpurile pompelor volumice, diverse fittinguri, etc. În acest scop, cercetările s-au derulat pe stările de livrare ale celor două materiale, pe stările obținute prin tratamente termice volumice (4 în cazul alamei și 3 în cazul bronzului), precum și pe epruvete confecționate din bronz, ale căror suprafețe expuse atacului cavitației au fost acoperite, prin noi tehnologii, cu 5 tipuri de amestecuri polimerice modificate.

În decursul anilor de student doctorand, în diverse faze ale cercetării experimentale, prelucrării și interpretării datelor, am beneficiat de sprijinul permanent al d-lui cercetător dr.ing. Octavian Victor Oancă, al cadrelor didactice și al personalului tehnic din colectivele de Mașini Hidraulice și Ingineria Materialelor, din cadrul Facultății de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara, cărora le mulțumesc.

Mulțumesc d-lui prof.dr.ing. fizician Adrian Cîrciumaru de la Universitatea „Dunărea de Jos” din Galați, Centrul de Cercetare-Dezvoltare pentru Compozite cu Matrice Termorigide, care m-a sprijinit în acoperirea suprafețelor probelor cavitaționale din bronz, cu rășini polimerice create prin tehnologiile moderne dezvoltate de domnia sa în cadrul laboratoarelor universității.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, care mi-a fost alături, m-a înțeles și sprijinit în momentele dificile ale acestei perioade de grea încercare.

În final, îmi exprim speranța ca această lucrare să fie de un real folos cercetărilor din domeniul industriei constructoare și exploatare de echipamente hidromecanice și mașini hidraulice, elice de vapoare și alte piese ce lucrează în curenți cavitaționali.

Timișoara, 2020

Autorul

Lazăr , Iosif

**Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziune prin cavitație a unor aliaje Cu-Zn și Cu-Sn**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 183, Editura Politehnica, 2020, 200 pagini, 175 figuri, 19 tabele.

Cuvinte cheie: eroziunea prin cavitație vibratoare, adâncime medie de eroziune, rezistență la cavitație, rugozitate medie, alamă, bronz, amestecuri polimerice, pulberi copmpozite

Rezumat,

Teza tratează comportarea și rezistența la eroziunea cavitației vibratoare a aliajelor cu bază de cupru (alamă Cu Zn39Pb3 și bronz CuSn-12-C) în stare de livrare/semifabricat și în stări obținute prin tratamente termice volumice. De asemenea, sunt cercetate comportările la eroziunea cavitației a straturilor de amestecuri polimerice depuse pe suprafețele probelor din bronz CuSn12-C și a straturilor de pulberi compozite, cu bază de cupru, depuse HVOF pe suprafețe ale probelor din oțel carbon.

## CUPRINS

	CUVÂNT ÎNAINTE.....	3
	Lista figurilor.....	8
	Lista tabelelor.....	15
	INTRODUCERE.....	16
Cap.1	Documentare privind utilizarea aliajelor pe bază de cupru în fabricarea pieselor solicitate la cavitație.....	18
	1.1 Generalități privind aliajele pe bază de cupru și cerințele necesare pentru utilizarea lor în fabricarea pieselor solicitate la cavitație.....	18
	1.2 Utilizări la elice navale și mașini hidraulice.....	23
	1.3 Utilizări la armături și fittinguri.....	40
	1.4 Concluzii.....	43
	1.5 Obiectivele tezei de doctorat.....	43
	1.6 Noutatea tezei de doctorat.....	44
Cap.2	Materialele, aparatura de laborator și metodele utilizate în cercetarea experimentală.....	45
	2.1 Materialele cercetate.....	45
	2.2 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice.....	48
	2.3 Aparat de debitat și șlefuit.....	50
	2.4 Cuptoare pentru tratamente termice volumice.....	52
	2.5 Microscopie optice și electronice.....	52
	2.6 Rugozimetre.....	56
	2.7 Aparat pentru investigații sclerometrice.....	57
	2.8 Metode de evaluare a rezistenței la cavitație.....	57
	2.9 Concluzii.....	61
Cap.3	Cercetarea rezistenței la cavitația vibratoare a alamei CuZn39Pb3 și a bronzului CuSn12-C în stări de semifabricat.....	62
	3.1 Rezultatele cercetării la cavitație a alamei CuZn39Pb3.....	64
	3.1.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației.....	65
	3.1.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare..	67
	3.1.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației.....	67
	3.1.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație.....	68
	3.1.2.3 Morfologia structurii erodate.....	72
	3.2 Rezultatele cercetării la cavitație a bronzului CuSn12-C.....	74
	3.2.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației.....	74
	3.2.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare..	77
	3.2.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației.....	77
	3.2.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație.....	78
	3.2.2.3 Morfologia structurii erodate.....	81
	3.3 Compararea rezultatelor cercetării.....	83
	3.4 Concluzii.....	85
Cap.4	Cercetarea rezistenței la cavitație a unor aliaje cu bază de cupru supuse tratamentelor termice volumice.....	87

4.1 Rezultatele cercetării la cavitație a alamei CuZn39Pb3.....	87
4.1.1 <i>Tratamentele termice volumice</i> .....	87
4.1.2 <i>Rezultatele cercetării la cavitație</i> .....	89
4.1.2.1 <i>Călirea volumică de la 700°C</i> .....	89
4.1.2.1.1 <i>Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i> .....	89
4.1.2.1.2 <i>Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare</i> .....	91
4.1.2.1.2.1 <i>Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației</i> .....	91
4.1.2.1.2.2 <i>Profilograma suprafeței erodate prin cavitație</i> ...	93
4.1.2.1.2.3 <i>Morfologia structurii erodate</i> .....	94
4.1.2.2 <i>Călirea volumică de la 700 °C cu revenire la 250°C</i> .....	97
4.1.2.2.1 <i>Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i> .....	97
4.1.2.2.2 <i>Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare</i> .....	98
4.1.2.2.2.1 <i>Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației</i> .....	98
4.1.2.2.2.2 <i>Profilograma suprafeței erodate prin cavitație</i> .....	100
4.1.2.2.2.3 <i>Morfologia structurii erodate</i> .....	101
4.1.2.3 <i>Călirea volumică de la 700 °C cu revenire la 500°C</i> .....	104
4.1.2.3.1 <i>Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i> .....	104
4.1.2.3.2 <i>Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare</i> .....	106
4.1.2.3.2.1 <i>Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației</i> .....	106
4.1.2.3.2.2 <i>Profilograma suprafeței erodate prin cavitație</i> ..	108
4.1.2.3.2.3 <i>Morfologia structurii erodate</i> .....	109
4.1.2.4 <i>Călirea volumică de la 800 °C cu revenire la 600°C</i> .....	111
4.1.2.4.1 <i>Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i> .....	111
4.1.2.4.2 <i>Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare</i> .....	113
4.1.2.4.2.1 <i>Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației</i> .....	113
4.1.2.4.2.2 <i>Profilograma suprafeței erodate prin cavitație</i> ...	115
4.1.2.4.2.3 <i>Morfologia structurii erodate</i> .....	116
4.1.3 <i>Compararea rezultatelor cercetării</i> .....	118
4.1.4 <i>Concluzii</i> .....	122
4.2 <i>Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C</i> .....	123
4.2.1 <i>Tratamentele termice volumice</i> .....	123
4.2.2 <i>Rezultatele cercetării la cavitație</i> .....	125
4.2.2.1 <i>Călirea volumică de la 700°C</i> .....	125
4.2.2.1.1 <i>Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației</i> .....	125
4.2.2.1.2 <i>Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare</i> .....	127
4.2.2.1.2.1 <i>Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației</i> .....	127

	4.2.2.1.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație...	128
	4.2.2.1.2.3 Morfologia structurii erodate.....	130
	4.2.2.2 Călirea volumică de la 700 °C cu revenire la 250°C.....	131
	4.2.2.2.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației.....	131
	4.2.2.2.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare.....	133
	4.2.2.2.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației.....	133
	4.2.2.2.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație...	135
	4.2.2.2.2.3 Morfologia structurii erodate.....	136
	4.2.2.3 Călirea volumică de la 700°C cu revenire la 500°C.....	138
	4.2.2.3.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației.....	138
	4.2.2.3.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare.....	139
	4.2.2.3.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației.....	139
	4.2.2.3.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație...	141
	4.2.2.3.2.3 Morfologia structurii erodate.....	142
	4.2.3 Compararea rezultatelor cercetării.....	144
	4.2.4 Concluzii.....	151
Cap.5	Tehnici și materiale utilizate în acoperirea suprafețelor pentru protecție la solicitările cavitaționale.....	152
	5.1 Amestecuri polimerice modificate.....	152
	5.1.1 Materiale utilizate. Tehnologia de realizare a straturilor polimerice.....	152
	5.1.2 Morfologia structurii amestecurilor polimerice.....	155
	5.1.3. Cercetarea comportării la cavitația vibratoare.....	169
	5.1.3.1 Aparatura și metoda de cercetare.....	169
	5.1.3.2 Rezultate și discuții.....	170
	5.1.3.2.1 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor de tip 1 și 2.....	170
	5.1.3.2.2 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor de tip 3 și 4.....	174
	5.1.3.2.3 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor de tip 5.....	177
	5.1.4 Concluzii.....	181
	5.2 Straturi cu bază de cupru depuse prin pulverizare termică HVOF..	182
	5.2.1 Introducere.....	182
	5.2.2 Tipuri de materiale utilizate.....	182
	5.2.3 Metoda de realizare a straturilor.....	183
	5.2.4 Cercetarea experimentală. Rezultate și discuții.....	185
	5.2.5 Concluzii.....	189
Cap.6	6. Concluzii finale și contribuții originale. Perspective noi de cercetare	190
	6.1 Concluzii generale.....	190
	6.2 Contribuții personale și originale.....	191
	6.3 Perspective noi de cercetare.....	192
	BIBLIOGRAFIE.....	193

## LISTA FIGURILOR

- Fig. 1.1 Diagrama principalelor aliaje ale cuprului [109]  
Fig. 1.2 Diagrama de echilibru Cu-Zn [109]  
Fig. 1.3 Diagrama de echilibru Cu-Sn [109]  
Fig. 1.4 Variația unor proprietăți mecanice în funcție de conținutul în staniu [109]  
Fig. 1.5. Imagini ale elicelor de vapoare, realizate din aliaje de cupru [112], [114]  
Fig. 1.6. Aspectul microstructural în secțiune perpendiculară pe suprafața deteriorată după 165 minute de atac al cavității (mărire 500x) [68]  
Fig. 1.7 Aspectul macrostructural al eroziunii cu evidențierea adâncimii maxime de pătrundere în pala elicei din bronz Al-Ni (examen la stereomicroscop, (10X) [68])  
Fig.1.8 Curbele caracteristice ale eroziunii prin cavitație [57]; a) variația pierderii de masă cu durata atacului cavității; b) variația vitezei de eroziune cu durata atacului cavității  
Fig.1.9 Histograma comparației rezistenței la cavitație a mai multor metale și aliaje, testate în Laboratorul din Grenoble de Karimi și Heuze [57]  
Fig. 1.10 Variația pierderilor volumice cumulate cu durata atacului cavității pentru materiale destinate fabricării elicelor navale (prelucrare după [9], [13])  
Fig. 1.12 Pompa centrifugă folosită la pomparea apei de mare; a) Imaginea pompei (camera spirală din bronz-nichel-aluminiu); b) Rotor de pompă centrifugă, realizat din bronz-nichel-aluminiu, distrus prin eroziunea cavității, după circa 4000 ore de funcționare în apă de mare- conform [53]  
Fig. 1.13 Componentele pompei centrifuge, erodate prin cavitație  
Fig. 1.14 Electropompa Hobby TP 200 [115]  
Fig. 1.15 Pompa hidrofor Elpumps JPV 1300B rotor bronz, [115, 127]  
Fig. 1.16 CM 40-200 B Pentax Pompa de suprafața, [116]  
Fig. 1.17 Pompa de apă PENTAX CSB 150 pentru irigații [117]  
Fig. 1.18 Pompa N20 Tellarini [118]  
Fig.1.19 Pompe volumice cu pistoane axiale [119]; a) cu bloc rotitor înclinat; b) cu disc înclinat; c) desfășurare elemente componente  
Fig. 1.20 Pompe volumice cu pistoane radiale  
Fig. 1.21 Indicarea elementelor componente realizate din bronz sau alamă  
Fig. 1.22 Robinete și vane cu corpuri din bronz și ventile din alamă sau bronz  
Fig. 1.23 Supapă de siguranță folosită la centralele termice  
Fig. 1.24 Fitinguri din alamă și bronz  
Fig. 2.1 Structura alamei CuZn39Pb3 (imagine preluată din [60])  
Fig. 2.2 Structura bronzului CuSn12-C (imagine preluată din [124])  
Fig.2.3 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice; a) Imagine ansamblu (1-sonotroda; 2 - sistemul electronic de generare a frecvenței de vibrație și puterii necesare transductorului piezoceramic de 20KHz/500W; 3 - regulatorul de temperatură a apei; 4 - vasul cu lichid și serpentină de răcire; 5 - sistemul de ventilație/răcire a transductorului piezoceramic; 6- calculatorul prin care se conduc și controlează parametrii aparatului vibrator); b) Sistemul mecanic vibrator  
Fig. 2.4 Proba pentru cavitație  
Fig. 2.5 Balanța analitică de tip Zątklady Mechaniki Precyzyjnej WP 11  
Fig. 2.6 Aparatul de tăiat cu pânză BUEHLER 4000  
Fig. 2.7 Aparatul de înglobat la cald Buehler Simplimet 1000



- Fig. 2.8 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta
- Fig. 2.9 Cuptor electric pentru tratamentele termice ale aliajelor metalice
- Fig. 2.10 Microscopul optic „Optika”
- Fig.2.11 Microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax
- Fig. 2.12 Microscopul electronic cu baleiaj Philips XL 30 ESEM
- Fig. 2.13 Microscopul OPLIMPUS SYX7
- Fig. 2.14. Măsurarea rugozității cu rugozimetru digital Mitutoyo SJ 210pe trei direcții
- Fig. 2.15 Măsurarea rugozității pe trei direcții
- Fig. 2.16 Durimetru digital Vikers model HV-50AC
- Fig. 2.17 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională
- Fig. 2.18 Banda de dispersie, pentru bronzul AMPCO M45, stare livrată [79]
- Fig.3.1 Imagine din timpul cavității vibratoare; a) imaginea de ansamblu a aparatului vibrator standard; b) detaliu cu proba fixată în sonotroda și imersată în apă
- Fig. 3.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității
- Fig. 3.3 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 3.4 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 3.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 3)
- Fig. 3.6 Imagini macro (înregistrări cu aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavităție vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 3.7 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavităție (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 3.8 Schema de înregistrare a parametrilor rugozității
- Fig. 3.9 Parametrii rugozității suprafeței, rezultate prin eroziunea cavității, măsurati cu aparatul Mitutoyo la timpi caracteristici (Proba 3)
- Fig. 3.10 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavităție)
- Fig. 3.11 Histograma de comparație a evoluției adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu cea ai rugozității, cu durata expunerii la cavităția vibratoare (Proba 3)
- Fig. 3.12 Variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii și a parametrilor rugozității cu durata expunerii la cavităție (Proba 3)
- Fig. 3.13 Imagini SEM ale suprafețelor probelor testate la cavităție timp de 165 min
- Fig.3.14 Evoluția adâncimii medii cumulate de eroziune cu durata cavității
- Fig. 3.15 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 3.16 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 3.17 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 2)
- Fig. 3.18 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavităție vibratoare, timp de 165 mnute
- Fig. 3.19 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavităție (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 3.20 Parametrii rugozității suprafeței, rezultate prin eroziunea cavității, măsurati cu aparatul Mitutoyo la timpi caracteristici (Proba 2)
- Fig. 3.21 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.20 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (165 minute de expunere la cavităție)
- Fig. 3.22 Histograma de comparație a evoluției adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu cea ai rugozității, cu durata expunerii la cavităția vibratoare (Proba 3)
- Fig. 3.23 Variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii și a parametrilor rugozității cu durata expunerii la cavităție (Proba 3)
- Fig. 3.24 Imagini SEM, ale topografiei suprafeței cavității a bronzului aflat în stare de livrare
- Fig. 3.25 Variația adâncimilor medii de eroziune cu durata cavității (comparații)

- Fig. 3.26 Variația vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității (comparații)
- Fig. 3.27 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavității prin compararea valorilor parametrilor specifici
- Fig. 1.4 Ciclograma tratamentelor termice
- Fig. 4.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității
- Fig. 4.3 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 4.4 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 1)
- Fig. 4.6 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavităție vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 4.7 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavităție (Proba 2) (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 4.8 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavităție) (exemplificare pentru o măsurătoare - Proba 1)
- Fig. 4.9 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.8 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 (Proba 1)
- Fig. 4.10 Imaginea microscopică (a) și imagini SEM (b...e) după 165 minute de expunere la cavităție
- Fig. 4.11 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității
- Fig. 4.12 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 4.13 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.14 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 3)
- Fig. 4.15 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavităție vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 4.16 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavităție (Proba 3) (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 4.17 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavităție) (exemplificare pentru o măsurătoare-Proba 3)
- Fig. 4.18 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.17 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (Proba 3)
- Fig. 4.19 Imaginea microscopică (a) și imagini SEM (d...f), după 165 minute de expunere la cavităție
- Fig. 4.20 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității
- Fig. 4.21 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 4.22 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.23 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 2)
- Fig. 4.24 Imagini macro (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavităție vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 4.25 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavităție (Proba 2) (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 4.26 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavităție) (exemplificare pentru o măsurătoare -Proba 3)
- Fig. 4.27 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.26 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P - pentru fiecare tratament (Proba 2)
- Fig. 4.28 Imagini SEM obținute la microscopul electronic cu baleiaj, după 165 minute de expunere la cavităție
- Fig. 4.29 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității
- Fig. 4.30 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității
- Fig. 4.31 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.32 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 1)

- Fig. 4.33 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 4.34 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (Proba 1) (imagini din zona interioară a suprafeței cavității)
- Fig. 4.35 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare-Proba 1)
- Fig. 4.36 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.35 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (Proba 1)
- Fig. 4.37 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b...e), după 165 minute de expunere la cavitație
- Fig. 4.38 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.39 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.40 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.41 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici
- Fig. 4.42 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici
- Fig. 4.43 Ciclograma tratamentelor termice
- Fig. 4.44 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.45 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.46 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.47 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)
- Fig. 4.48 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A 480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute
- Fig. 4.49 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) din suprafața expusă după 65 minute (macro) – Proba 1
- Fig. 4.50 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare - Proba 3)
- Fig. 4.51 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.50 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (Proba 3)
- Fig. 4.52 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație
- Fig. 4.53 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.54 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.55 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici
- Fig. 4.56 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 2)
- Fig. 4.57 Imagini macro (înregistrări aparat Canon A 480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165 minute
- Fig. 4.58 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 65 minute (macro) – Proba 2
- Fig. 4.59 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare –Proba 2)
- Fig. 4.60 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.59 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (Proba 2)
- Fig. 4.61 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație
- Fig. 4.62 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.63 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.64 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

## 12 Lista figurilor

---

- Fig. 4.65 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 2)
- Fig. 4.66 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165 minute
- Fig. 4.67 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 165 minute (macro) – Proba 1
- Fig.4.68 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare – Proba 2)
- Fig. 4.69 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.68 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (Proba 2)
- Fig. 4.70 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație
- Fig. 4.71 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.72 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.73 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.74 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.75 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici
- Fig. 4.76 Comparații între valorile parametrilor specifici rezistenței alamei  $\text{CuZn39Pb3}$ , tratate termic și cei ai bronzului  $\text{CuZn12-C}$  tratat termic
- Fig. 4.77 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației
- Fig. 4.78 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- Fig. 4.79 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici
- Fig. 5.1 Imaginea probei cavitaționale, în secțiune, cu indicarea suprafețelor acoperite cu pelicule de polimeri; a) - secțiune prin probă; b) și c) - proba reală
- Fig. 5.2 Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 1 (Proba 1.1)
- Fig. 5.3. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 1 (Proba 1.2)
- Fig. 5.4. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 2 (proba 2.1)
- Fig. 5.5. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 2 (proba 2.2)
- Fig. 5.6 Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 1)
- Fig. 5.7. Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 2)
- Fig. 5.8. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 3 (proba 3.1)
- Fig. 5.9. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 3 (proba 3.2)
- Fig. 5.10. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 4 (proba 4.1)
- Fig. 5.11. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 4 (proba 4.2)
- Fig. 5.13. Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 4)
- Fig. 5.14. Analiza EDAX (a) și imagine SEM (b) pentru stratul din amestecul de tip 5

(Proba 5.1)

Fig. 5.15. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 5 (Proba 5.2)

Fig. 5.16. imagine microscopica RAMAN (a) și spectrele Raman (b, c și d) (Strat de amestec de tip 5)

Fig.5.17 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 1 depuse pe suprafața plană a probei 1.1; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în pelicula de polimer

Fig.5.18 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec depuse pe suprafața plană a probei 1.2; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2- perforări în pelicula polimerică; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig. 5.19 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 2, depuse pe suprafața plană a probelor 2.1; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în pelicula polimerică

Fig. 5.20 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 2 depuse pe suprafața plană a probelor 2.2; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig. 5.21 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 3; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig. 5.22 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 4; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig.5.23 Imagini fotografice comparative, ale suprafețelor metalice după 15 și 45 minute de expunere la atacul cavitației; a) suprafața probei 3.1 după 45 minute de expunere la cavitație, după ce stratul de amestec de tip 3 a fost expulzat; b) suprafața probei 4.2 după 45 minute de expunere la cavitație, după ce stratul de amestec de tip 4 a fost expulzat; c) suprafața metalică a probei, neprotejată cu straturi din amestecuri polimerice, după 15 minute de expunere la eroziunea cavitației; d) suprafața metalică a probei, neprotejate cu straturi din amestecuri polimerice, după 45 minute de expunere la eroziunea cavitației

Fig. 5.24 Evoluția comportării la cavitația vibratoare a stratului de amestec de tip 5 depus pe proba 5.1; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig. 5.25 Imagini ale suprafeței probei atacate de cavitație

a) după îndepărtarea peliculei de polimer de tip 5, de pe suprafața plană a probei 5.1 și 45 minute de expunere la cavitație; b) după 15 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz; c), după 45 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz

Fig. 5.26 Evoluția comportării la cavitația vibratoare a stratului de amestec de tip 5 depus pe proba 5.2; 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Fig. 5.28 Compararea comportării la cavitație vibratoare între straturile de polimer modificat și straturile de material compozit depuse HVOF pe suprafețe metalice; a) Compozit pe baza de cupru [10] ;b) Pulbere ceramică Thermico WC-9Co-5Cr-1Ni [23]

Fig. 5.29 Imaginea probei în plan vertical și indicarea suprafeței de acoperire

Fig. 5.30 Aspecte ale suprafețelor probelor cu stratul depus prin pulverizare termică

## 14 Lista figurilor

---

a) imagini macro; b) imagini microscopice (350x)

Fig. 5.31 Instalația robotizată de pulverizare termică, METCO SULZER (a) și schema de principiu a unei instalații de pulverizare cu plasmă (Principiul metodei HVOF de pulverizare termică) [23]) (b)

Fig. 5.32 Imagini ale curentului cavitațional; a)- în elicea navală [132]; b)- în rotorul de turbină hidraulică radial axială [133]

Fig. 5.33 Proba vibratoare (înregistrări realizate în Laboratorul de Cavitație al UPT [59]); a) imersată în apa fără vibrare; b) în timpul vibrației

Fig. 5.34 Evoluția pierderilor volumice și a degradării prin cavitația vibratoare a straturilor depuse prin pulverizare termică

## LISTA TABELELOR

- Tabelul 1.1 Compoziția chimică [57]  
Tabelul 1.2 Proprietățile mecanice [57]  
Tabelul 1.3. Compoziția chimică a aliajelor de cupru (bronzuri turnate) folosite la turnarea elicelor vapoarelor [111]  
Tabelul 1. 3. (continuare) Proprietatile mecanice ale aliajelor de cupru folosite la turnarea elicelor vapoarelor [111]  
Tabelul 1.4 Compoziția chimică a alamei și bronzurilor investigate [105]  
Tabelul 1.4 (continuare). Valorile caracteristicilor mecanice [105]  
Tabelul 1.5 Compozițiile chimice ale alamei și bronzurilor investigate [13]  
Tabelul 1.5 (continuare). Valorile caracteristicilor mecanice ale alamei și bronzurilor investigate [13]  
Tabelul 1.6 Aliaje ale cuprului folosite în cercetarea lui Horwath, J, F, [53]  
Tabelul 1.7. Date privind rezistența la cavitație a materialelor utilizate la cercetarea rotoarelor de pompă centrifugă în apă de mare Hrowath J.F. [53]  
Tabelul 3.1 Compararea cu parametrilor specifici  
Tabelul 4.1 Valorile durității HV 0.5  
Tabelul 4.2 Compararea cu parametrilor tratamentului de călire  
Tabelul 4.3 Compararea cu parametrilor materialelor de referință  
Tabelul 4.4 Duritatea HV0.5  
Tabelul 4.5 Compararea cu parametrilor materialelor de referință  
Tabelul 4.6 Compararea cu parametrilor materialelor de referință  
Tabelul 5.1. Compoziția chimică a pulberilor utilizate  
Tabelul 5.2 Imagini macro ale degradării stratului depus

## INTRODUCERE

Eroziunea cavitațională este cel mai nefast efect al cavitației, care apare în funcționarea mașinilor și instalațiilor hidraulice, datorită distrugerii structurii suprafețelor ce vin în contact cu lichidul, conducând la scoaterea din funcțiune, totală sau pentru reparare, a pieselor degradate.

Acest fenomen, identificat în anul 1848, odată cu verificarea primei nave moderne de pasageri, lansată la apă în 1843 [89], proiectată de Isambard Kingdom Brunel și construită de Great Britain din metal și propulsată de un motor cu aburi care acționa o elice navală din oțel, nu s-a reușit a fi eliminat, cu toată evoluția tehnologiilor de fabricație de noi materiale sau de modificare a structurii și proprietăților suprafețelor expuse cavitației.

Deși, în cercetările privind creșterea duratei de viață a pieselor ce lucrează în curenți cavitaționali se utilizează cele mai performante tehnologii și aparate de testare și analiză, nu s-a reușit elucidarea cauzelor care generează acest fenomen și nici nu au fost elaborate materiale perfect rezistente la distrugerea produsă de microjeturile și undele de șoc rezultate din implozia bulelor cavitaționale. Prin urmare, cercetările ce vizează complexitatea hidrodinamicii cavitației, dar și efectul mecanic de eroziune a materialelor, continuă să fie derulate pe instalațiile industriale și în laborator și rămân o preocupare permanentă a specialiștilor.

Cele mai ample cercetări, privind creșterea rezistenței la eroziunea cavitației, sunt realizate pe materialele folosite în fabricarea rotoarelor de mașini hidraulice și a elicelor de vapoare [1,2,3,9]. Practic, nu există țară exploataoare de nave maritime și fluviale, respectiv constructoare/posesoare de centrale hidroelectrice, echipamente și instalații hidraulice, în care acest fenomen să nu fie amplu cercetat de către specialiști, în situ sau în laborator [40]. Dintre acestea, cele mai cunoscute sunt: S.U.A, Japonia, Rusia, Suedia, Germania, China, Franța, India, Polonia, Cehia, Marea Britanie [1,2]. În România, cele mai ample studii, privind hidrodinamica și efectul eroziv ale cavitației, sunt realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [13], în laboratorul Universității Eftimie Murgu din Reșița [9], în laboratoarele Universității Dunărea de Jos din Galați [103, 104] și în laboratorul Universității Politehnica București [4,5].

Ample rezultate, pe domeniul comportării și rezistenței materialelor la eroziunea cavitației, sunt oferite de cercetările derulate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [13, 55, 56, 45, 79], cu o experiență de peste 50 ani și cele în laboratorul Universității Eftimie Murgu din Reșița [9], cu o experiență de circa 15 ani.

Cercetările din cadrul prezentei teze au la bază experiențele Laboratoarelor Universității Politehnica Timișoara, cel de Cavitație (prin generarea și analiza eroziunii prin cavitație vibratoare) și cel de Știința și Ingineria Materialelor (prin știința materialelor, tratamentele termice volumice și de suprafață). Totodată aceste cercetări sunt o continuare a tradiției pentru că materialele (alama cuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C) au aplicații nu numai la piese puternic solicitate la cavitație, cum sunt elicele vapoarelor, ci și la alte piese și echipamente de conducere a curentului de fluid, control și reglare a debitului și presiunii [45].

Astfel, teza de doctorat, prin scop și obiective, pune în evidență comportarea și rezistența la cavitație a două aliaje cu bază de cupru (alama CuZn39Pb3 și bronzul



CuSn12-C) în stări livrate, stări rezultate în urma aplicării tratamentelor termice volumice și în cazul acoperirii cu 5 tipuri de amestecuri polimerice modificate și 4 straturi de compozite pe bază de cupru depuse prin pulverizare termică HVOF. Ca și conținut, este organizată pe 6 capitole, dintre care unul este destinat prezentării, succinte, a stadiului domeniilor de folosire a aliajelor cu bază de cupru, unul al prezentării celor două aliaje și aparatelor și procedurilor de cercetare experimentală, trei de cercetare experimentală, cu rezultate specifice, care arată comportarea și rezistența suprafețelor la atacurile microjeturilor create prin mecanismul cavității vibratoare și ultimul de sinteză a concluziilor de ordin general, a contribuțiilor personale semnificative și de descriere a noilor direcții de cercetare, ca o continuare a celor dezvoltate în teză.

# **CAP.1**

## **DOCUMENTARE PRIVIND UTILIZAREA ALIAJELOR PE BAZĂ DE CUPRU ÎN FABRICAREA PIESELOR SOLICITATE LA CAVITAȚIE**

Eroziunea cavitațională este cel mai nefast efect al cavitației, care apare în funcționarea mașinilor și echipamentelor hidraulice, datorită distrugerii materialelor solide din care sunt confecționate frontierele ce vin în contact cu lichidul. Acest fenomen a fost identificat, pentru prima oară, în anul 1848, odată cu verificarea primei nave moderne de pasageri, construită din metal și propulsată de un motor cu aburi care acționa o elice navală din oțel, construită de Great Britain, proiectată de Isambard Kingdom Brunel și lansată la apă în 1843. În anul 1875 Italianul Bartellor consemnează și el eroziuni de cavitație la elicele navelor Mauritania și Luisitania. Însă, efectele negative asupra performanței unei elice navale au fost identificate abia în 1893 de către Parsons, care a construit primul tunel pentru cavitație.

Cu trecerea timpului, s-a constatat că distrugeri, specifice cavitației, apar în toate echipamentele și instalațiile ce lucrează cu lichide (turbine și pompe hidraulice, aparate de comandă și control din instalațiile hidraulice de acționare, vane, fittinguri și pompe ale rețelelor de alimentare cu apă și irigații, etc), în care apar variații importante ale valorilor presiunii, prin scădere sub valoarea celei de vaporizare și creștere bruscă [65]. Cu toate cercetările, derulate pînă în prezent, în laborator sau în situ, pînă în prezent, nu s-a reușit elucidarea cauzelor care generează acest fenomen și nici nu au fost elaborate materiale perfect rezistente la distrugerea produsă de implozia bulelor cavitaționale. Astfel, eroziunea materialelor prin cavitație constituie o preocupare permanentă a specialiștilor ce a dus la investigații atît pe instalațiile industriale cît și în laborator.

Cum foarte multe piese, ce funcționează în condiții de cavitație sunt fabricate din aliaje ale cuprului, prezentul capitol este o documentare asupra principalelor astfel de aliaje destinate fabricării componentelor solicitate la cavitație.

Întrucât majoritatea studiilor, privind comportarea și rezistența la cavitație, sunt derulate în laborator, în cadrul acestui capitol sunt prezentate aparatele și metodele folosite pentru cercetare, investigare și evaluare.

### **1.1 Generalități privind aliajele pe bază de cupru și cerințele necesare pentru utilizarea lor în fabricarea pieselor solicitate la cavitație**

Aliajele pe bază de cupru (alamele și bronzurile) au o aplicabilitate foarte mare în industrie, datorită proprietăților tehnologice (obținere semifabricate prin turnare, laminare, forjare, adaptabilitate la prelucrările mecanice și la tratamentele termice, etc) și caracteristicilor fizico-mecanice care le conferă rezistențe la coroziunea chimică a mediului de exploatare, la solicitări termice și hidrodinamice, de tipul cavitației. În figura 1.1 sunt prezentate cele mai uzuale aliaje ale cuprului, cu aplicabilitate industrială [108, 109].

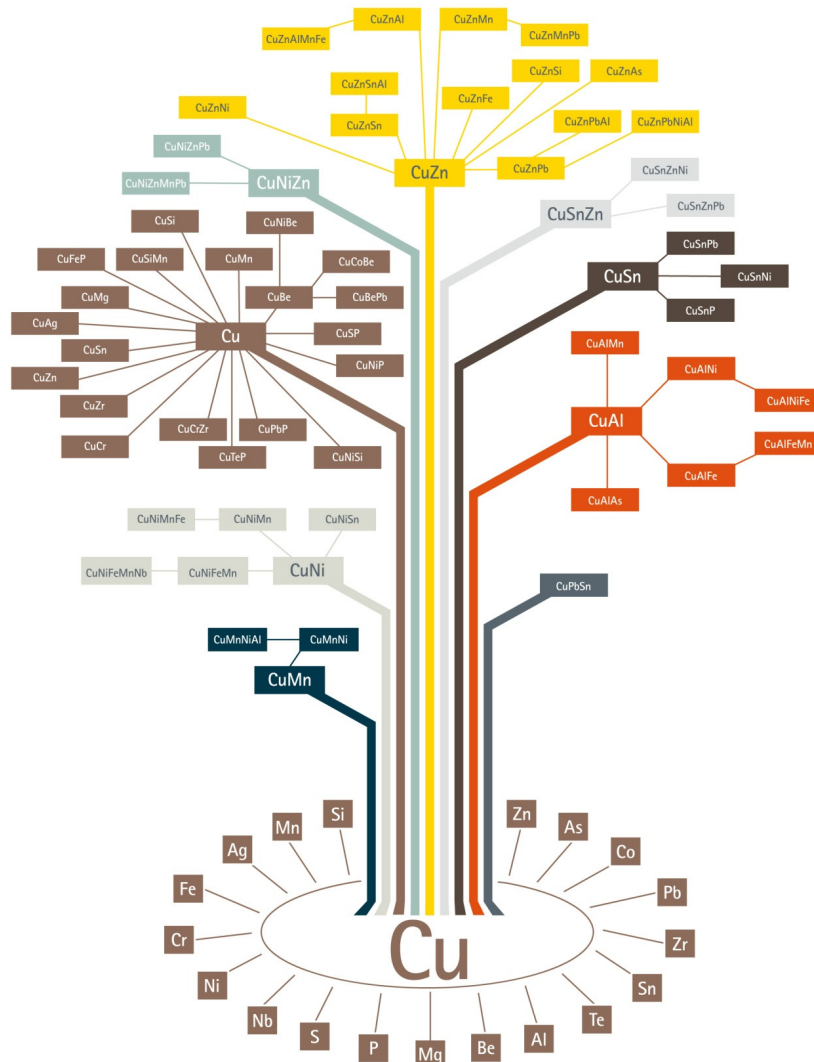


Fig. 1.1 Diagrama principalelor aliaje ale cuprului [109]

În cadrul lucrării de doctorat se acordă o atenție sporită acelor alame și bronzuri care sunt folosite la fabricarea pieselor solicitate la cavitație. Astfel de piese se găsesc în componența echipamentelor hidromecanice (în special la pompe: carcase și rotoare), în structura sistemelor hidraulice de acționare (fitingurile, corpurile robinetelor, corpurile și rotoarele pompelor și motoarelor volumice), în structura sistemelor de irigații și alimentări cu apă (corpul și sertarele vanelor, camerele spirale și rotoarele pompelor centrifuge), precum și la turnarea elicelor navelor maritime și fluviale, [13, 14], [20], [37], [56], [79], [87], [101-104].

**Alama** este un aliaj cupru-zinc care, funcție și de numărul și gradul elementelor de aliere și însoțitoare (plumb, staniu, mangan, aluminiu, fier, nichel), este caracterizat de proprietăți diferite, precum: rezistență mecanică, prelucrabilitate,

ductilitate, rezistență la uzură, duritate, nu devine fragilă la temperaturi scăzute, prezintă valori ridicate ale conductivității electrice și celei termice, și rezistență ridicată la coroziune [60], [108, 109].

Alamele folosite pe scară industrială conțin max. 45% Zn, iar diagrama binară de echilibru, fig.1.2, se caracterizează prin: 6 soluții solide, din care 3 pe bază de compuși electronici. Acestea sunt:  $\alpha$  = Cu(Zn), c.f.c.;  $\beta$  = sol.sol. pe baza compusului CuZn, c.v.c- cu transformarea  $\beta \rightarrow \beta'$  la răcire, 453-470°C;  $\gamma$  = sol.sol. pe baza compusului Cu<sub>5</sub>Zn<sub>8</sub>, cubic complex;  $\varepsilon$  = sol.sol. pe baza compusului CuZn<sub>3</sub>, hexagonal compact și  $\eta$  = Zn(Cu), h.c. Mai poate să apară și faza  $\delta$  care este stabilă numai la cald [109].

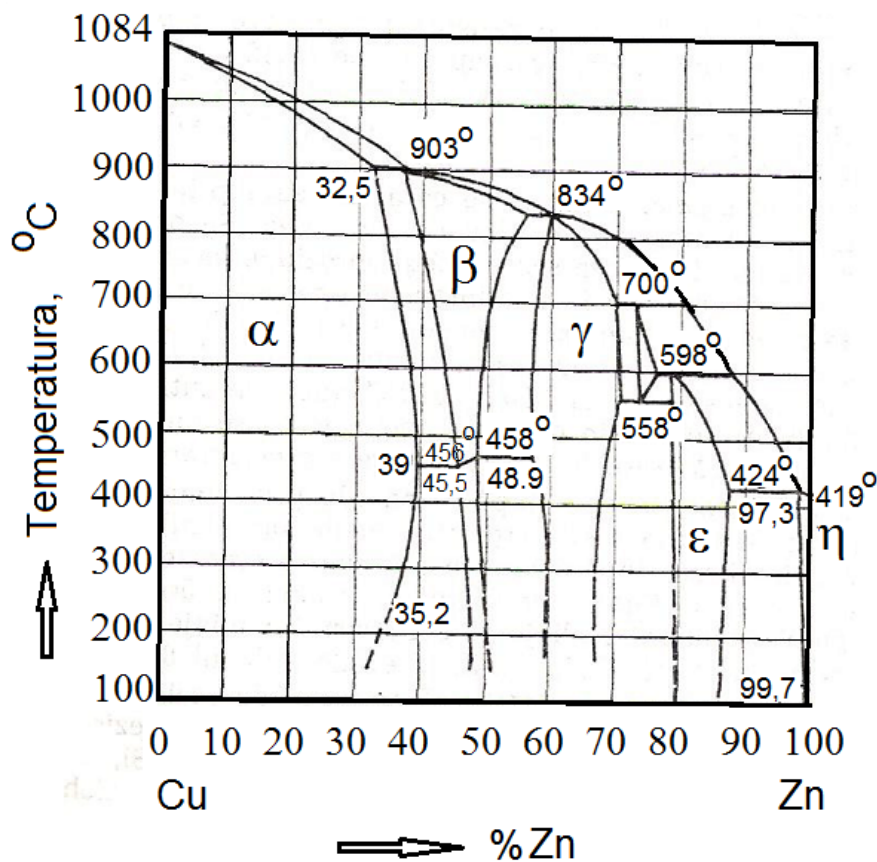


Fig. 1.2 Diagrama de echilibru Cu-Zn [109]

Cercetările arată că utilizarea **alamelor** (turnate, forjate sau laminate) la fabricarea pieselor solicitate la cavitație depinde de caracteristicile mecanice și de gradul de aliere [9], [13], [37], [43, 44], [58], [69], [74], [91], [108], [111], [125]. Pentru piesele ce funcționează în medii chimic corozive, cum este apa marină și oceanică, comportarea și rezistența la eroziunea cavitației este foarte mult influențată de materia organică dizolvată și de substanțele coloidale prezente în apa marină naturală sau poluată [67, 68], [75]. O astfel de alamă se obține prin alierea cuprului

și zincului cu mangan, fier și staniu, plumb și aluminiu, aliaj care este ușor de prelucrat și folosită la turnarea elicelor vapoarelor.

**Bronzurile** sunt aliaje ale cuprului cu staniu și au fost primele, cunoscute în istorie, în urmă cu aproximativ patru mii de ani, ca metale folosite pentru realizarea diverselor obiecte. Ele au fost atât de importante, încât o perioadă din istoria omenirii este denumită Epoca Bronzului [109].

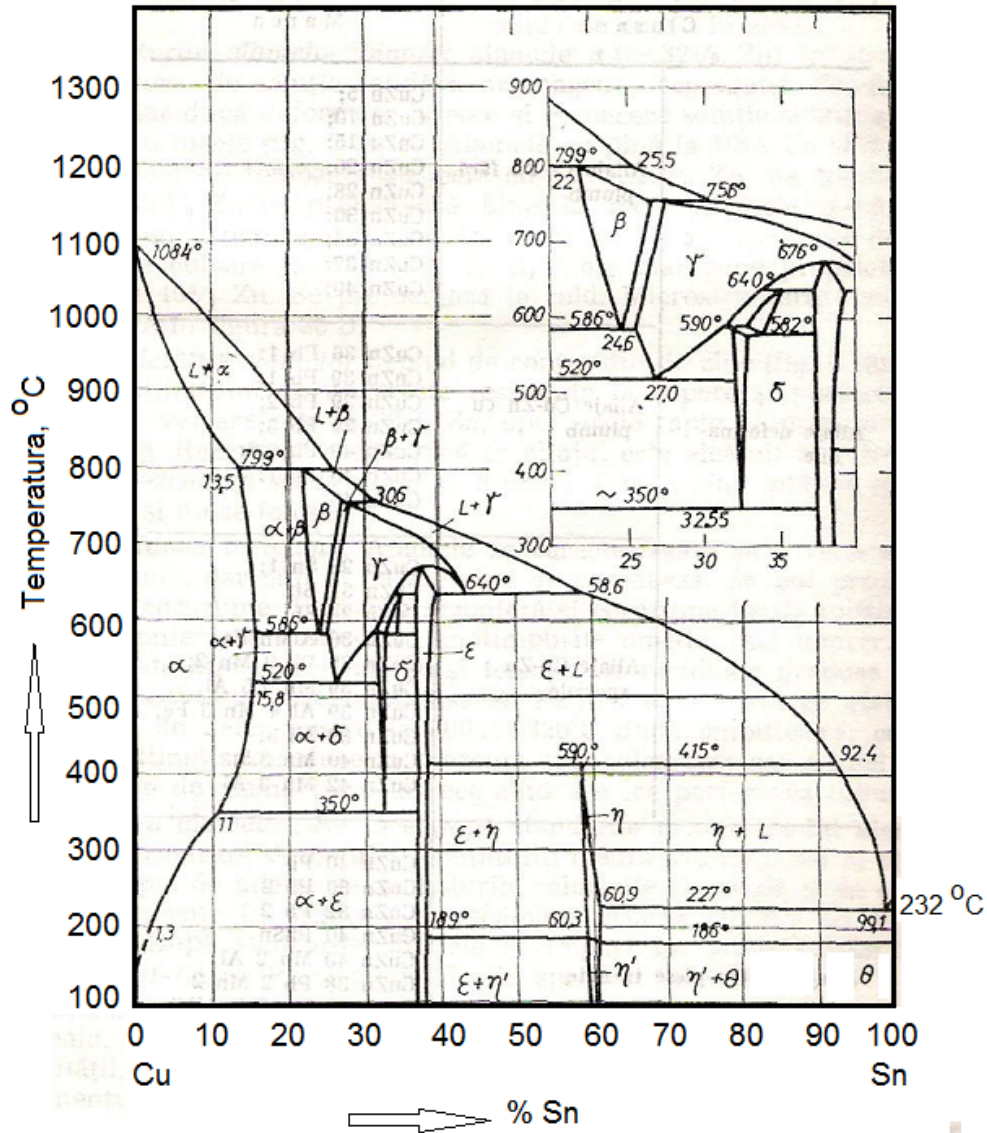


Fig. 1.3 Diagrama de echilibru Cu-Sn [109]

Bronzurile folosite pe scară industrială, conțin max. 25-30%Sn, iar diagrama de echilibru, fig.1.3, se caracterizează prin: 7 soluții solide( α – Cu(Sn)); β – soluție

solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_5\text{Sn}$ , c.v.c;  $\delta$  - soluție solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ , cubic complex;  $\epsilon$  - soluție solidă pe baza compusului  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ , hexagonal compact;  $\eta$  - [compus  $\text{CuSn}$ ];  $\omega$  - soluție solidă  $\text{Sn}(\text{Cu})$ ; 3 peritectice și un eutectoid [60], [103].

Întrucât cele mai uzuale bronzuri, cu aplicabilitate industrială, au o structură bifazică, alcătuită din  $\alpha$  și  $\alpha + \delta$ , în diagrama din fig.1.4 sunt prezentate variațiile rezistenței la rupere și alungirii la rupere cu conținutul de staniu.

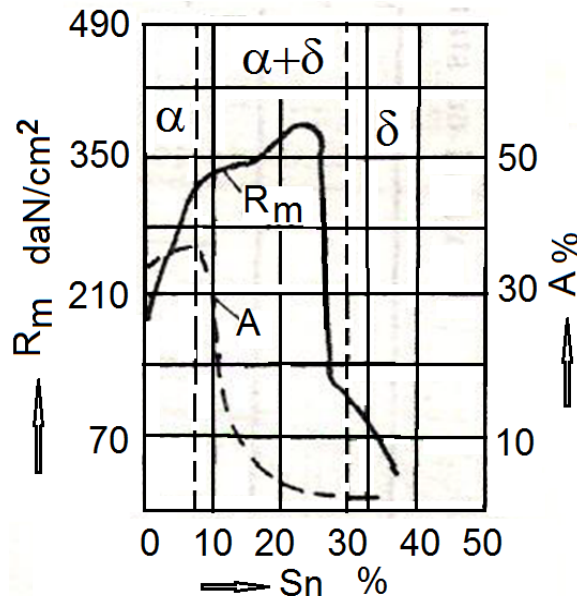


Fig. 1.4 Variația unor proprietăți mecanice în funcție de conținutul în staniu [109]

Caracteristica **bronzurilor Cu-Sn** este turnabilitatea, ca urmare a unei fluidități bune și a intervalului larg de solidificare. De asemenea, această categorie de bronzuri își îmbunătățește substanțial proprietățile fizico-mecanice și structurale atât prin tratamentele termice de recoacere pentru omogenizare, recoacere pentru recristalizare și călire cât și prin aliere cu Zn, P și Ni.

Bronzurile se folosesc foarte mult în stare turnată. Uneori, semifabricatele din bronz sunt forjate, cum sunt cele cu 4-8% staniu, care sunt mai dure, mai rezistente și mai rigide, decât alamele forjate, având limită de curgere ridicată și bună rezistență la coroziune. Din acest motiv aceste tip de bronz se folosește în fabricarea arcurilor.

Adăugarea de cantități mici de fosfor (0.01-0.45 %) crește și mai mult duritatea, rezistența la oboseală și la uzură, ceea ce permite utilizarea lor la piese supuse solicitărilor termice și cavitaționale cum sunt supapele [110].

Comparativ cu alamele, **bronzurile** sunt mult mai utilizate în fabricarea pieselor solicitate la cavitație, în special a celor ce funcționează în apă marină, datorită unei rezistențe superioare la coroziunea chimică și prin cavitație. Dintre acestea, se remarcă **bronzurile cu aluminiu** (folosite la componente ale pompelor și supapelor de presiune), **respectiv cu aluminiu și mangan**, prin proprietățile mecanice ridicate, comparabile cu cele ale aliajelor de Ti, W și oțelurilor aliate [43, 44], [69], [74], [89], [110]. Dacă, în plus conțin și alte elemente de aliere, precum nichelul,

rezistența la eroziunea cavitației se îmbunătățește substanțial, motiv pentru care sunt folosite la piese ce lucrează într-un regim hidrodinamic de cavitație avansată cum sunt elicele supercavitaționale ale navelor maritime de mare viteză [9], [13], [20], [37], [53], [67], [68].

Capacitatea bronzurilor de a face față solicitărilor hidrodinamice cavitaționale, depinde de compoziția chimică, respectiv de natura elementelor chimice de aliere și însoțitoare.

Mai jos redăm influențele și altor elemente chimice de aliere și însoțitoare, față de cele la care am făcut referire anterior, asupra caracteristicilor structurale, fizice, chimice și mecanice ale bronzurilor folosite în fabricarea pieselor solicitate la eroziunea prin cavitație.

- Manganul are o acțiune dezoxidantă și conduce la obținerea unui bronz dens, cu proprietăți mecanice îmbunătățite;
- Plumbul, până la 2%, nu schimbă proprietățile mecanice ale bronzului, dar îi îmbunătățește proprietățile de prelucrare prin așchiere și rezistența la coroziune în mediu de acizi;
- Siliciul, chiar și în proporții de zecimi de procente, scade mult elasticitatea inițială a aliajului, motiv pentru care se evită rămânerea siliciului în bronz, nelegat de oxigen.
- Oxigenul, formează compusul  $\text{SnO}_2$ , sub formă de incluziuni dure și fragile;
- Fosforul în cantități sub 0,3% este necesar pentru dezoxidarea cuprului, înainte de introducerea staniului, iar în cantități mai mari de 0,3% duce la creșterea rezistenței mecanice a bronzului prin formarea constituentului structural  $\text{Cu}_3\text{P}$ , dur și fragil. Totodată, fosforul micșorează tendința de saturare cu gaze a bronzului, mărește intervalul de cristalizare și fluiditatea lui, ușurând lipirea și sudarea.

În concluzie, alegerea alamelor și bronzurilor, în fabricarea pieselor solicitate la cavitație, depinde de structură, proprietățile chimice, fizice și mecanice, precum și de capacitatea acestora de a suporta tehnologii adecvate de elaborare, prelucrare și tratamente termice, prin care să se asigure o durată mare de exploatare prin comportament și rezistență sporită la impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate la implozia bulelor de cavitație.

## 1.2 Utilizări la elice navale și mașini hidraulice

Cum primele constatări ale eroziunii prin cavitație au fost realizate pe elicele vapoarelor maritime, actualmente nu există țară exploatoare de nave maritime și fluviale, în care acest fenomen să nu fie cercetat de specialiști. Cele mai cunoscute sunt: S.U.A, Japonia, Rusia, Suedia, Germania, China, Franța, India, Polonia, Cehia, Marea Britanie [28, 29], [32, 33], [41], [57], [67, 68], [75], [93].

Istoria studiilor realizate pe elicele navale arată că, dacă până în 1980 acestea erau realizate în proporție de 80 % din oțeluri și doar 20 % din bronz și alamă, după acest an, ca urmare a evoluției tehnologiilor de elaborare, prelucrare și tratament, ponderea s-a inversat [32], [67], [89].

Pe măsura dezvoltării sistemului hidroenergetic, respectiv a echipamentelor hidromecanice (turbine și pompe hidraulice), s-au intensificat și cercetările privind fenomenul cavitațional, în special pe cele legate de comportarea și rezistența la eroziunea cavitației a materialelor utilizate în fabricarea rotoarelor acestora.

Documentarea întreprinsă în acest capitol arată că aliajele de cupru sunt utilizate și la astfel de echipamente (în special la pompe), în realizarea unor componente aflate în câmpul hidrodinamic și care, în timp, suferă eroziuni, ca urmare

a impactului cu microjeturile și undele de șoc generate de implozia sau explozia bulelor de cavitație [1-5], [17], [39-42], [48, 49], [79], [88], [90], [92].

Studiile și cercetările realizate pe materialele folosite în fabricarea elicelor vapoarelor și a componentelor de mașini hidraulice, supuse eroziunii prin cavitație, au drept scop identificarea factorilor ce pot contribui la îmbunătățirea comportării și rezistenței. În această direcție se înscriu și cele realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, concretizate prin numeroase teze de doctorat (ex. Mircea Octavian Popoviciu (1971), Arpad Kuzman (1992), Bordeasu (1997), Georgevici (2003), Padurean (2005), Dimian (2012), Jurchela (2012), Oanca (2013), Katona (2017), Micu, Sălcianu și Ghera (2016) etc), precum și ale cercetătorilor străini, dintre care amintim: Heymann (1960), Noskievic (1983), Edel și Pîlaev (1968), Thiruvengadam (1971), Hammitt și Garcia (1980), Steller J.K. (1992), Steller K. (1983), J.P. Franc și colaboratorii (2004), Fr. Avelan (2011) cavitație [1-5], [17], [39-42], [45], [48, 49], [88], [90].

În cele ce urmează, în acest subcapitol, vom face referire la tipurile de alame și bronzuri folosite în fabricarea elicelor navale, precum și o prezentare a componentelor de mașini și alte componente hidraulice realizate din aceste aliaje.

#### **a) Utilizări la elicele navale**

Elicea de vapor este un organ supus la solicitări ciclice foarte mari, care, la navele maritime și oceanice. funcționează în mediul coroziv al apei și care, datorită amplasării sale, este foarte expus la șocuri generate de vortele cavitaționale, atașat pe vârful palelor. De la o anumită valoare a eforturilor, elicea este supusă și unei coroziuni fisurante sub tensiune care, combinat cu efectul variației solicitărilor, poate provoca apariția fisurilor de oboseală în condiții de coroziune, ducând în final la ruperi. Totodată deteriorarea prin eroziunea cavitației nu este aceeași pentru toate părțile elicei, deoarece acestea nu lucrează în condiții identice. Apariția cavitației se datorează funcționării paletelor elicei într-un curent de șiaj complex și variabil, peste o anumită turație, fiind în funcție de formele navei ca și de materialul din care este executată elicea [37], [102, 103], [110, 111].

După cum se poate observa în figura 1.5 elicele de vapoare, maritime sau fluviale, indiferent de formă și dimensiune, prezintă cele mai mari distrugereri pe pale, în zona periferică pe bordul pe extradados, înspre bordul de fugă. Toate elicele prezentate în aceste imagini sunt realizate prin turnare, din bronz sau alame.



a) Elice în vârtej cavitațional



b) Elicea erodată de cavitație





Fig. 1.5. Imagini ale elicelor de vapoare, realizate din aliaje de cupru [112], [114]

După cum se observă în imaginile din fig.1.5 cea mai solicitată parte a elicei, la cavitație, este pala, butucul fiind foarte puțin afectat de eroziune. Partea din paletă, afectată puternic de eroziunea cavitației, este fața de sucțiune (extradosul palei). Butucul elicei este, însă, supus unor tensiuni importante datorită montării elicei pe axul portelice și, datorită vitezei periferice mici eroziunea pe suprafața acestuia, chiar și în zona de racordare cu pala, este scăzută [28-33], [37], [99, 100], [110, 111].

Cercetările, privind modul de deteriorare a elicelor din aliaje de cupru, ce funcționează în medii de apă sărată (marină și oceanică), arată că coroziunea acestora diferă astfel [103, 104]:

- dacă elicea este imobilă sau are turație scăzută în apă de mare, gradul de eroziune (îndepărtare de material) este de ordinul 0,05 mm/an;
- la elicele în funcțiune, după câteva luni, apar rugozități, gradul de uzură fiind de (3 - 4) ori mai mare spre extremitățile palelor, ceea ce face ca luciul palei să dispară. La această uzură se adaugă și o uzură locală sub formă de ciupituri (pitting) pe suprafețele marginilor (bordurilor) palelor, care se adâncesc, datorită depresiunilor ce apar în interiorul lor, afectând performanțele elicei (scade viteza de înaintare și crește consumul de combustibil).

Cele mai cunoscute universități din țară, 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, realizate pe materiale destinate elicelor navale sunt: Universitatea

Politehnica din București (Departamentul de Hidraulică, Mașini Hidraulice și Ingineria Mediului [4, 5], Centrul de Cercetări Energetice și Protecția Mediului și Centrul pentru Expertizarea Materialelor Speciale [68], [103], [104]), Universitatea Politehnica din Timișoara (Colectivul de Mașini Hidraulice din cadrul Departamentului Mașini, Mecanice, Utilaje și transporturi, Centrul Național pentru Ingineria Sistemelor cu Fluide Complexe) [8-22], [45], [55, 56], [79], [85-88], [89] și Universitatea Dunărea de Jos din Galați (Departamentul Hidrodinamică Navală, Centrul de Cercetare Hidrodinamică, Structuri și Tehnologii Navale) [13], [103, 104].

Dintre multiplele rezultate, ale cercetărilor efectuate de centrele menționate, se remarcă cele obținute în cadrul centrului de Expertizare a Materialelor Speciale, din cadrul Universității Politehnica București, care, folosind microscopie electronică de mare rezoluție și tehnici moderne de investigare structurală prin difracție de raze X (XRD), au pus în evidență modul de evoluție a eroziunii cavitației în structura unor bronzuri și alame, fig.1.6.

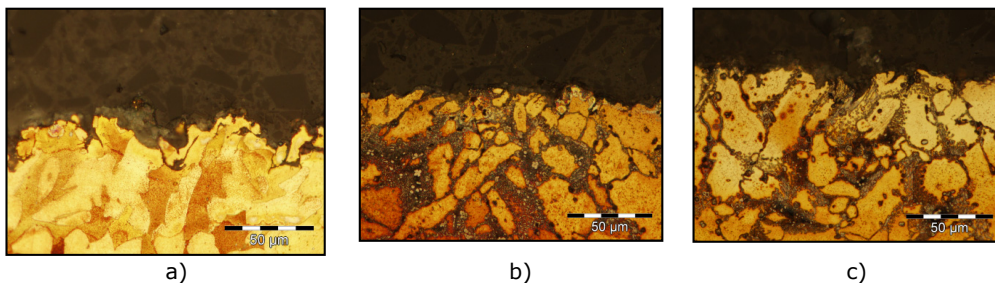


Fig. 1.6. Aspectul microstructural în secțiune perpendiculară pe suprafața deteriorată după 165 minute de atac al cavitației (mărire 500x) [68]

De asemenea, studiile de rezistență la eroziunea cavitației, realizate de cercetătorii străini, pentru diverse companii, pe diverse aliaje ale cuprului, folosite la elicele navale, arată degradări diferite. Astfel:

- cercetările companiei Materion Brush [68, 69], asupra bronzului cu mangan (C67300) și bronzului cu staniu și plumb (C94100), au arătat că acestea au o foarte scăzută rezistență, distrugerea cavitațională fiind extrem de rapidă;
- cercetările lui Jasionowski [28, 29], [32, 33], asupra a trei stări ale bronzului cu aluminiu BA1055 (turnat fără tratament, călit la 950 °C urmat de revenire la 400 °C și respectiv călit de la 950 °C și revenit la 600 °C) arată că cea mai ridicată rezistență este obținută prin tratamentul de călire cu revenire la 600 °C;
- un rezultat interesant este cel obținut de Mânzană [68] în cadrul Universității Oxford, cu ajutorul microscopului electronic de baleiaj tip Hitachi S530 dotat cu software-ul Digital Image Processing System 2.6 și Digital Image Scanning System 5, pe o porțiune din vârful palei unei elice navale, realizată din bronz Cu-Al, care a funcționat în regim de cavitație aproape 10 ani, fig. 1.7. Investigația a evidențiat structură de zone cu smulgeri de grăunți, cu aspect neuniform al craterelor și fisurilor intergranulare.

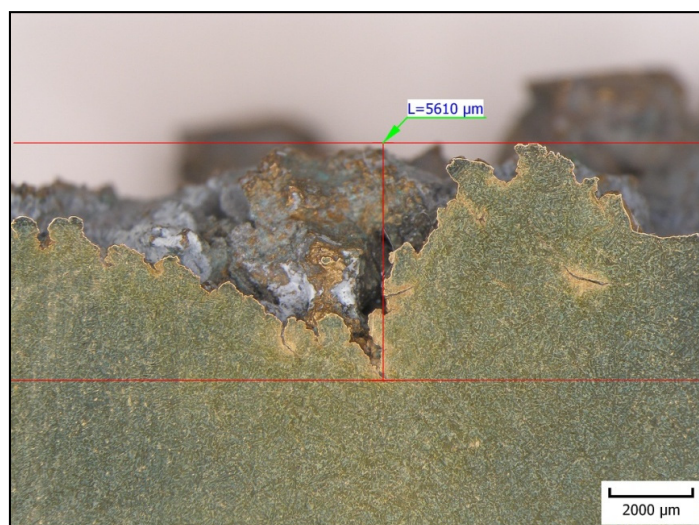


Fig. 1.7 Aspectul macrostructural al eroziunii cu evidențierea adâncimii maxime de pătrundere în pala elicei din bronz Al-Ni (examen la stereomicroscop, (10X) [68])

Interesante sunt și rezultatele de comportare și rezistență la eroziunea produsă prin cavitație vibratoare, obținute de Karimi și Heuze [57] pe trei tipuri de bronzuri, ale căror compoziții chimice și caracteristici mecanice sunt date în tabelele 1.1 și 1.2. Din modul de comportare pe parcursul atacului cavitației, din analizele structurale realizate prin microscopie electronică și din compararea curbelor specifice, fig.1.8, autorii constată diferențe reduse (între 20 și 40 %) rezistențele la cavitație ale celor trei aliaje, cauzate de microstructura eterogenă și proprietățile mecanice, dependente de raportul dintre mangan și cupru. Concluziile, la care cei doi cercetători ajung, sunt:

- 1- aliajul cu cea mai mică rezistență este Sonoston S, iar cu cea mai ridicată este aliajul Incramute
- 2- rezistența mai bună a aliajului Incramute, care are un conținut mai redus de mangan față de aliajele Sonoston, se datorează matricii constituită din faza austenitică  $\gamma$ , cu rețea CFC care duce la o deformare prin alunecare într-o manieră similară aliajului de cupru aluminiu. În plus rezistența mai mare este favorizată și de caracterul ductil ( $A = 31\%$ ).

Tabelul 1.1 Compoziția chimică [57]

Aliajul	Compoziția chimică						
	Mn	Cu	Al	Fe	Ni	Si	C
Sonoston tip H	51.2	38.4	4.2	4.9	1.6	0.05	0.07
Sonoston tip H	55.6	34.0	4.4	4.5	1.5	0.14	0.012
Incramute IN	41.0	56.2	1.4	1.2	0.1	0.09	0.018

Tabelul 1.2 Proprietățile mecanice [57]

Proprietatea	Sonoston tip SH	Sonoston tip S	Incramute IN
$R_{p0.2}$ [MPa]	289	305	220
$R_m$ [MPa]	458	439	540
A [%]	18	18	31
E [MPa]	67000	61000	89000
KCU [J.cm <sup>2</sup> ]	35	ND	ND
Duritatea matricei [HV <sub>min</sub> ]	167	156	130
$\sigma_D$ 10 <sup>7</sup> cicluri [MPa (Air)]	35	ND	ND
$\frac{\sigma_D(A3)}{R_{p0.2}}$	0.07	0.10	0.30

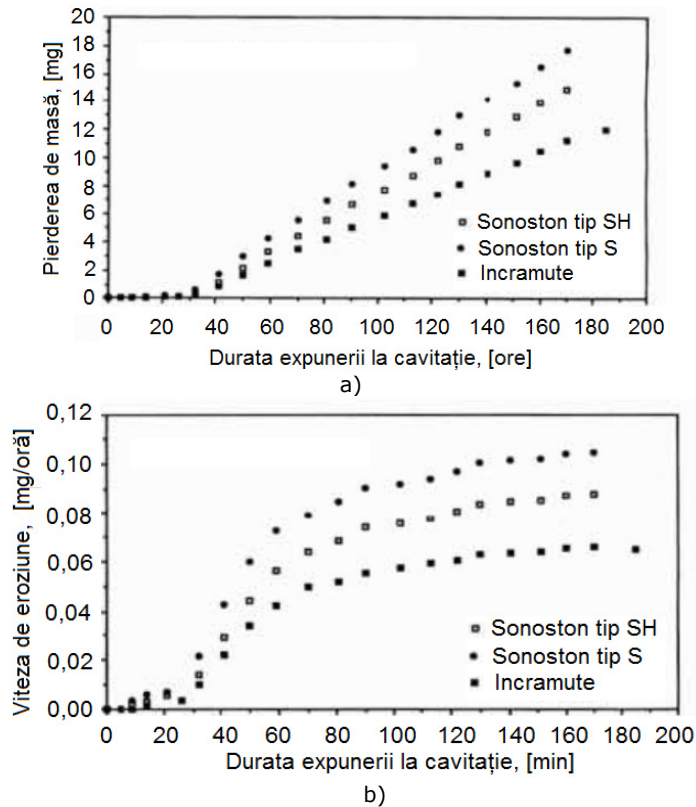


Fig.1.8 Curbele caracteristice ale eroziunii prin cavitație [57]

a) variația pierderii de masă cu durata atacului cavitației  
b) variația vitezei de eroziune cu durata atacului cavitației

Comparând cu rezultatele obținute pe mai multe metale și aliaje metalice, fig.1.9, folosind ca indicator durata de incubație, constată că bronzurile cercetate se

încadrează în categoria materialelor cu rezistență medie (bună) la eroziunea generată prin cavitație; cea mai bună rezistență având-o aliajul CuAl9Ni5Fe4 (AMPCO M4).

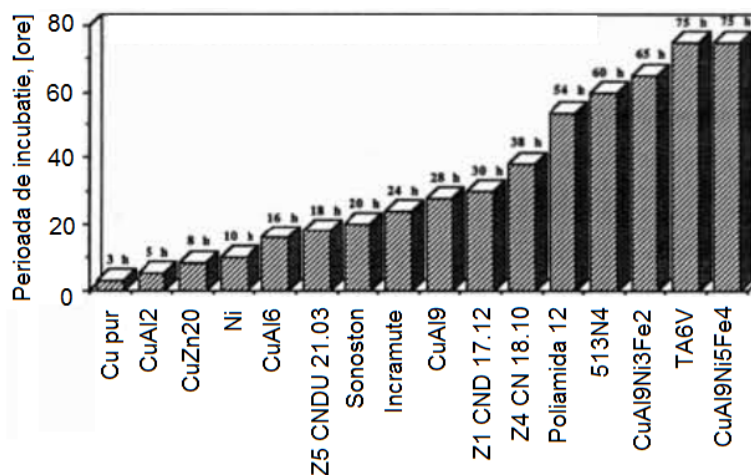


Fig.1.9 Histograma comparării rezistenței la cavitație a mai multor metale și aliaje, testate în Laboratorul din Grenoble de Karimi și Heuze [57]

În tabelul 1.3 sunt date compozițiile chimice și proprietățile mecanice recomandate de literatura de specialitate [111] pentru bronzurile și alamele folosite la turnarea elicelor vapoarelor exploatare în apă dulce sau sărată

Registrul Naval Roman recomandă bronzurile și alamele din tabelul 1.4 [105].

Tabelul1.3. Compoziția chimică a aliajelor de cupru (bronzuri turnate) folosite la turnarea elicelor vapoarelor [111]

Tipul de bronz	Compoziția chimică [%]							
	Cu	Al	Mn	Zn	Fe	Ni	Sn	Pb
CU1	52-62	0.5-3.0	0.5-4.0	35-40	0.5-2.5	max.1.0	0.1-1.5	max.0.5
CU2	50-57	0.5-2.0	1.0-4.0	33-38	0.5-2.5	3.0-8.0	max.1.5	max.0.5
CU3	77-82	7.0-11.0	0.5-4.0	max.1.0	2.0-6.0	3.0-6.0	max.0.1	max.0.03
CU4	70-80	6.5-9.0	8.0-20.0	max.5.0	2.0-5.0	1.5-3.0	max.1.0	max.0.05

CU1-Bronz cu Mn; CU2-Bronz cu Ni și Mn; CU3-Bronz cu Ni și Al;  
CU4- Bronz cu Mn și Al

Tabelul 1.3 (continuare) Proprietățile mecanice ale aliajelor de cupru folosite la turnarea elicelor vapoarelor [111]

Tipul de bronz	R <sub>p0.2</sub> [MPa] min.	R <sub>m</sub> [MPa] min.	A [%] min.
CU1	175	440	20
CU2	175	440	20
CU3	245	590	16
CU4	275	630	18

Tabelul 1.4 Compoziția chimică a alamei și bronzurilor investigate [105]

Categoria	Compoziția chimică, [%]							
	Cu	Al	Mn	Ni	Fe	Zn	Sn	Pb
1	55-62	0,5-0,3	0,5-4,0	max.1,0	0,5-2,5	restul	max.1,5	max.0,5
2	50-57	0,5-2,0	1,0-4,0	2,5-8,0	0,5-2,5	restul	max.1,5	max.0,5
3	77-82	7,0-11,0	0,5-4,0	3,0-6,0	2,0-6,0	max.1,0	max.0,1	max.0,03
4	70-80	6,5-9,0	8,0-20,0	1,5-3,0	2,0-5,0	max.6,0	max.1,0	max.0,05

Suma impurităților este stabilită cu acordul RNR

Tabelul 1.4 (continuare). Valorile caracteristicilor mecanice [105]

Categoria aliajului după normele RNR	Valorile minime ale caracteristicilor mecanice		
	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	A5 [%]
1	440	175	20
2	440	175	20
3	590	245	16
4	630	275	18

Din categoria materialelor prezentate în tabelul 1.4, în laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara au fost testate aliaje din categoria 1 (alama navală), 3 (bronz naval) și 4 (bronz naval), ale căror compoziții chimice și caracteristici mecanice sunt prezentate în tabelul 1.5. Testele au fost realizate pe aparatul magnetostrictiv cu tub de nichel, (A = 90 μm, f = 7000 ± 3 % Hz, Diametru proba = 14 mm, mediu lichid = apă dublu distilată). În diagrama din fig.1.10 sunt prezentate curbele caracteristice de pierdere masică, care conform normelor ASTM G32-2010, caracterizează rezistența și comportarea acestora la cavitația vibratoare.

Tabelul 1.5 Compozițiile chimice ale alamei și bronzurilor investigate [13]

Aliaj pe bază de cupru	Compoziția chimică, %					
	Zn	Al	Ni	Mn	Fe	Cu rest
<b>Alama navală (1)</b>	38,62	-	-	-	-	61,38
<b>Bronz naval (3) (CuNiAl III RNR)</b>	-	11,13	6,32	1,32	6,07	75,17
<b>Bronz naval (4) (CuNiAl I RNR)</b>	-	10,86	5,46	1,22	5,23	77,24

Tabelul 1.5 (continuare). Valorile caracteristicilor mecanice ale alamei și bronzurilor investigate [13]

Aliaj	Rezistența la tracțiune, $R_m$ MPa	Limita de curgere, $R_{p0.2}$ MPa	Alungirea la rupere, A %
Alama navală (1)	372	145	19
Bronz naval (3) (CuNiAl III RNR)	504	266	15
Bronz naval (4) (CuNiAl I RNR)	627	269	17

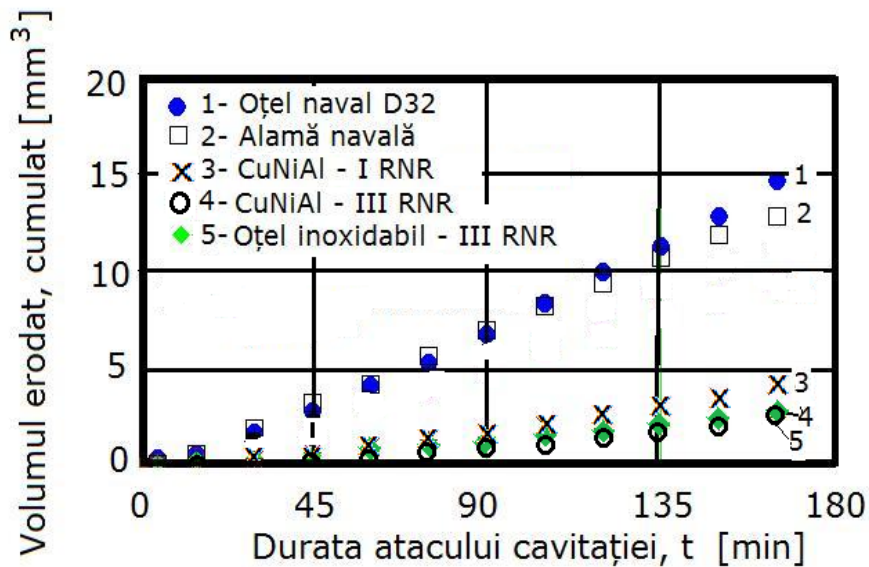


Fig. 1.10 Variația pierderilor volumice cumulate cu durata atacului cavitației pentru materiale destinate fabricării elicelor navale (prelucrare după [9], [13])

Analiza rezultatelor cercetării întreprinse pe alama și bronzurile din tabelul 1.3 a condus la următoarele concluzii [9], [13], [20], [85], [79], [87]:

- aliajul 1 și aliajul 4 au fost apreciate ca fiind cu slabă rezistență la eroziunea cavitației, fiind recomandate doar la fabricarea elicelor navelor de apă dulce (fluviale) [2], [5], [13]. Pentru a fi utilizate la fabricarea elicelor navelor maritime, unde intervine și coroziunea chimică, elicele, din aceste materiale, trebuie supuse unor tratamente termice volumice adecvate, sau tratamentelor noi de suprafață, cu scopul creșterii rezistenței la atacul generat de undele de șoc și microjeturile cavitaționale;

- aliajul 3 a fost apreciat ca fiind cu foarte bună rezistență la eroziunea cavitației, motiv pentru care a fost recomandat atât în fabricarea elicelor navelor maritime cât și a celor fluviale [5], [13].

În ultima perioadă, evoluțiile în metalurgie au dus la elaborarea unor bronzuri cu excelente calități anticavitaționale (rezistențe foarte mari), de tip AMPCO, cum sunt: AMPCO 45 (10% Al, 5% Ni, 2,5 %Fe, 1,0 % Mn, rest Cu,  $R_m = 814$  MPa,  $R_{p0.2} = 517$  MPa, HRB = 98,  $A_5 = 15$  % [106] și AMPCO M4 (10,5% Al, 5% Ni, 4.8 %Fe, 1,5 % Mn, rest Cu,  $R_m = 1000$  MPa,  $R_{p0.2} = 793$  MPa, HRC = 29,  $A_5 = 8$  % [107]). Dezavantajul acestor bronzuri îl reprezintă prețul de cost ridicat, motiv pentru care se continuă cercetările pe vechile bronzuri și alame, prin folosirea tehnologiilor de tratament termic sau de acoperire cu polimeri, care să contribuie la creșterea rezistenței la cavitație și la solicitările mecanice ale vibrațiilor create prin siajul și hidrodinamica vârtejului atașat.

Repararea elicei deteriorate se face diferit, funcție de locul în care apare deteriorarea. Pentru stabilirea proporției reparațiilor admise și metodei de reparare elicea se împarte în funcție de gradul de solicitare, în trei zone, conform figurii 1.11 [104, 105], [126].

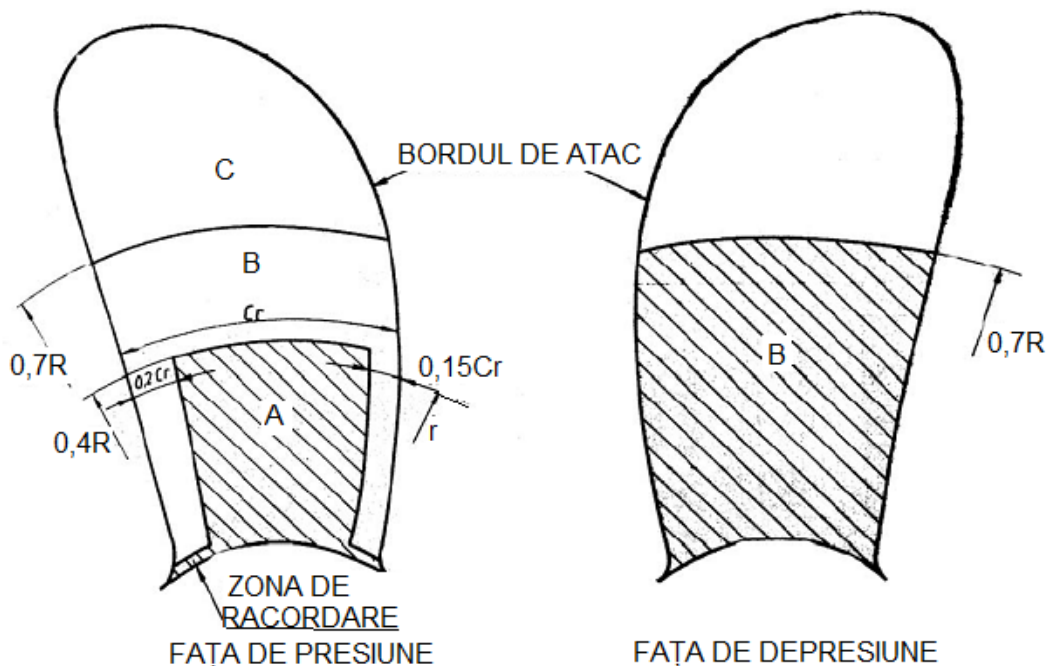


Fig. 1.11. Împărțirea palei elicei în zone de reparare, funcție de gradul de solicitare [62], [91],

În mod normal, în zonele A și B, de obicei, eroziunile sunt mici și nu se fac reparații. Dacă acestea depășesc anumite limite, impuse de normele RNR, atunci se analizează și se decide modul de reparare.



În zona C apar cele mai mari distrugerii, cauzate de eroziunea prin cavitație și coroziunea chimică. Uneori, adâncimile craterelor depășesc ordinul a 10 mm, vârful palei luând o formă de franjuri. Repararea defectelor din această zonă se face prin sudare, funcție de natura aliajului de cupru folosind vergele cu diametre între 3-10 mm și diferite procedee, după preîncălziri prealabile și detensionări la finalizare. Spre exemplu [105], [126].

- pentru bronzurile cu aluminiu se folosește procedeul MIG;
- pentru bronzuri cu aluminiu și mangan se sudează cu electrozi din grafit, sau se folosește unul din procedeele, MIG, sau WIG;
- pentru bronzuri cu nichel și mangan se folosește procedeul WIG sau cu flacără oxigaz.

#### **b) Utilizări la mașini hidraulice**

Din documentarea realizată, rezultă că din categoria mașinilor hidraulice, cele care au componente realizate din bronzuri și alame, dispuse pe circuitele aflate în curenți cavitaționali și afectate de eroziune sunt pompele. Aceste componente sunt carcasele (camerele spirale) și rotoarele.

Toate studiile arată că pompele fac parte din categoria mașinilor hidraulice care, cea mai mare parte din timp, funcționează în condiții de cavitație avansată.

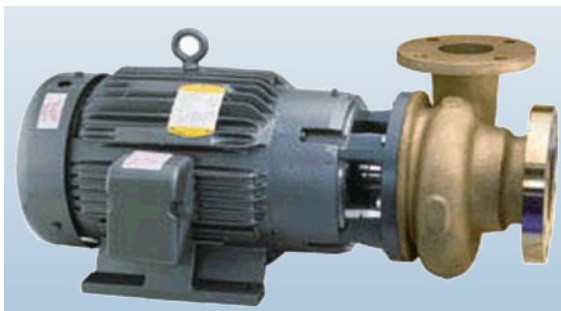
Durata de viață a pieselor aflate în câmpurile hidrodinamice cavitaționale este dictată de tipul pompei, regimul de exploatare și natura lichidului vehiculat. Pentru cele care lucrează cu lichide vâscoase, cum sunt pompele volumice, distrugerea organelor ce vin în contact cu lichidul este determinată de eroziunea abrazivă, cea cavitațională fiind, practic, inexistentă. În schimb, cele care lucrează cu lichide cu o vâscozitate redusă, în special cu apă, efectul cavitației, prin eroziunea produsă, este foarte mare.

Folosirea aliajelor de cupru (alamă sau bronz), în realizarea corpurilor sau rotoarelor, în locul unor oțeluri și fonte, dincolo de proprietățile mecanice acceptabile, printre rațiuni sunt aspectul comercial, rezistența la cavitație și coroziune chimică, capacitatea de turnare și prelucrare mecanică.

Cel mai elocvent studiu, cu privire la aplicațiile aliajelor de cupru, în special a bronzurilor, în turnarea rotoarelor, este cel realizat de Horwath, J, F, [53], în cadrul firmei Ampco Pumps Company, pe diverse pompe centrifuge, utilizate în pomparea apei de mare. Cercetarea acestuia este derulată pe pompe centrifuge cu rotoare din diverse materiale, tabelul 1.6. Rezultatele cercetării pun în evidență efectul cumulat al coroziunii chimice și cavitaționale, cu puternică amprentă a cavitației, fig.1.12; funcție de materialul de fabricație, pierderea de masă, prin eroziunea cavitației, fiind diferită, tabelul 5. Datele din tabelul 1.7 arată că rotorul din bronz aliat cu aluminiu, sau mangan, se comportă mai bine decât cele turnate din oțel, iar rotorul turnat din alamă se comportă mai bine decât cel realizat din fontă.

Tabelul 1.6 Aliaje ale cuprului folosite în cercetarea lui Horwath, J, F, [53]

Tipul de aliaj	Compoziția chimică, [%]					Adâncimea de eroziune, MDE [mm]		Pierdere de masă prin eroziune [mg/cm <sup>2</sup> /zi]	
						28 zile-jet de împingere 20 °C	14 zile-20° C	Apă stătătoare	Apă curgătoare (Viteza apei 10m/s)
	Al	Fe	Ni	Mn	Zn				
Bronz aluminiu	8,2	1,7	-			0,04	0,19	0,15	0,17
Bronz Ni-Al	8,2	2,9	4,3	2,4		0,0	0,32	0,04	0,10
Bronz Ni-Al	8,8	3,8	4,5	1,3		0,0	0,28	0,04	0,16
Bronz Mn-Al	7,6	2,8	3,1	10		0,01	0,24	0,04	0,11
Bronz de înaltă rezistență	0,8	0,8	0,2	0,5	3,7	0,03	0,08	0,09	0,73
	Sn	Zn	Pb						
Gunmetal	9,7	1,4	0,6	-	-	0,02	0,32	0,14	0,74
Gunmetal	5,1	5,0	4,3	--		0,023	0,39	0,22	1,66



a)



b)

Fig. 1.12 Pompa centrifugă folosită la pomparea apei de mare  
a) Imaginea pompei (camera spirală din bronz-nichel-aluminiu)

b) Rotor de pompă centrifugă, realizat din bronz-nichel-aluminiu, distrus prin eroziunea cavitației, după circa 4000 ore de funcționare în apă de mare- conform [53]

Tabelul 1.7. Date privind rezistența la cavitație a materialelor utilizate la cercetarea rotoarelor de pompă centrifugă în apă de mare Hrowath J.F. [53]

Aliajul	Rezistența la eroziunea cavitație, exprimată prin masa pierdută într-o zi [mg]
Oțel stelite laminat	0,6
Ampco-Trode 200: (83,1% Cu; 12,4 % Al; 4,1 % Fe)	3,2
Ampco 20 (83,1% Cu; 12,4 % Al; 4,1 % Fe)	5,8
Oțel inoxidabil sudat (2 straturi de sudură, cu 17%Cr și7%Ni)	6,0
Oțel inoxidabil laminat ( cu 26 % Cr și 13 % Ni)	8,0
Oțel inoxidabil laminat, călit (cu 12 % Cr)	9,0
Oțel inoxidabil turnat (cu 18 % Cr și 8 % Ni)	13,00
Oțel inoxidabil turnat (cu 12 % Cr)	20,0
Bronz manganos, turnat	80,0
Oțel turnat (slab aliat)	105,0
Alamă	156,0
Fontă	224,0

Cavitația în pompe este, de asemenea, foarte mult studiată, mai ales că se caută creșterea presiunii la intrare, prin folosirea unor rotoare impulsor, cu scopul de a proteja rotorul la eroziune, dar și pentru creșterea eficienței energetice a pompei. În imaginile de mai jos, fig.1.13, se vede efectul cancerigen al cavitației asupra a două tipuri de rotoare de pompă centrifugă și asupra unei camere spirale, exploatate în apă dulce.

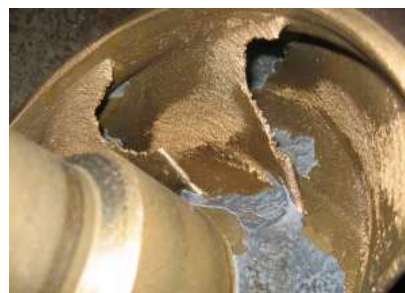


Înainte de exploatare



Distrus de cavitație

a) Rotor de pompă centrifugă din bronz [112, 113]



b) Rotor de pomă centrifugă cu ax comun din bronz, [112], [127]



c) cameră spirală, [114]

Fig. 1.13 Componentele pompei centrifuge, erodate prin cavitație

În cele ce urmează se prezintă imagini cu tipuri de pompe ale căror componente sunt realizate din bronz, exploatate în diverse domenii, unde cavitația se face prezentă.

**1) Electropompa Hobby TP200, fig. 1.14.**

Această pompă are rotorul și camera spirala turnate din bronz și este folosită la transvazarea băuturilor alcoolice (vin, țuică), laptelui și apei.



Fig. 1.14 Electropompa Hobby TP 200 [115]

**2) Pompa hidrofor Elpumps JPV 1300B rotor bronz, fig.1.15**

Această pompă, are rotorul din bronz și carcasa din fontă. Este concepută pentru furnizarea apei curate sau a altor lichide non-agresive. Are ca aplicație alimentarea locuințelor și în irigații. Ca orice hidrofor lucrează la suprafață.



Fig. 1.15 Pompa hidrofor Elpumps JPV 1300B rotor bronz, [115, 127]

**3) CM 40-200 B Pentax Pompa de suprafață, fig.1.16**

Acest tip de pompă este utilizată cu precădere în sistemele de irigații. Funcție de durata de exploatare, rotorul este turnat din fontă, oțel inoxidabil sau înalt aliat și bronz.



Fig. 1.16 CM 40-200 B Pentax Pompa de suprafata, [116]

**4) Pompa de apa PENTAX CSB 150 pentru irigații, fig. 1.17**

Acest tip de pompă, are rotorul din bronz și este destinată vehiculării debitelor mari, cu aplicație agricolă și industrială, unde durata de exploatare este mare.



Fig. 1.17 Pompa de apa PENTAX CSB 150 pentru irigații [117]

**5) Pompa N20 Tellarini, fig. 18**

Caracteristica acestei pompe, de tip centrifugă, este reversibilitatea, ceea ce o face și mai expusă la eroziunea prin cavitație, deoarece pe axul său nu se poate monta un rotor impulsor. Ea poate fi manipulată ușor și pusă în funcțiune cu ajutorul unei bormașini, viteza de rotație fiind de 1400-2800 rot/min. Atât carcasa, cât și rotorul sunt turnate din bronz; axul pe care se fixează rotorul fiind din oțel aliat.

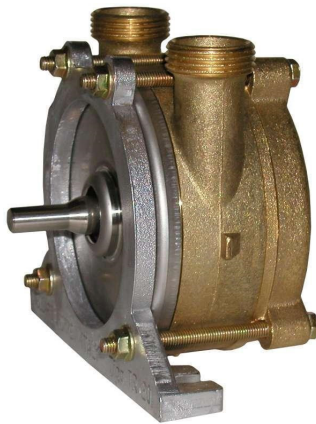


Fig. 1.18 Pompa N20 Tellarini [118]

În domeniul acționărilor hidraulice, majoritatea pompelor volumice și motoarelor hidraulice rotative, cu pistoane axiale și radiale, au butucul rotoric sau cel de distribuție, realizat din bronz. Motivul principal, este cel de frecare redusă, între pistoane și alezajele din corpul rotoric, sau blocul de distribuție. Cum, majoritatea acestor pompe lucrează cu uleiuri hidraulice, cu vâscozitate ridicată, efectul eroziv al cavitației este redus, datorită faptului că presiunea de vaporizare este scăzută, comparativ cu apa, iar eventualele microjeturi și unde de șoc, generate la imploziile bulelor de cavitație, sunt atenuate,

Imaginile de mai jos (fig.1.19 și 1.20), exemplificative, au drept scop de a pune în evidență componentele pompelor volumice, fabricate, cu precădere, din bronz.

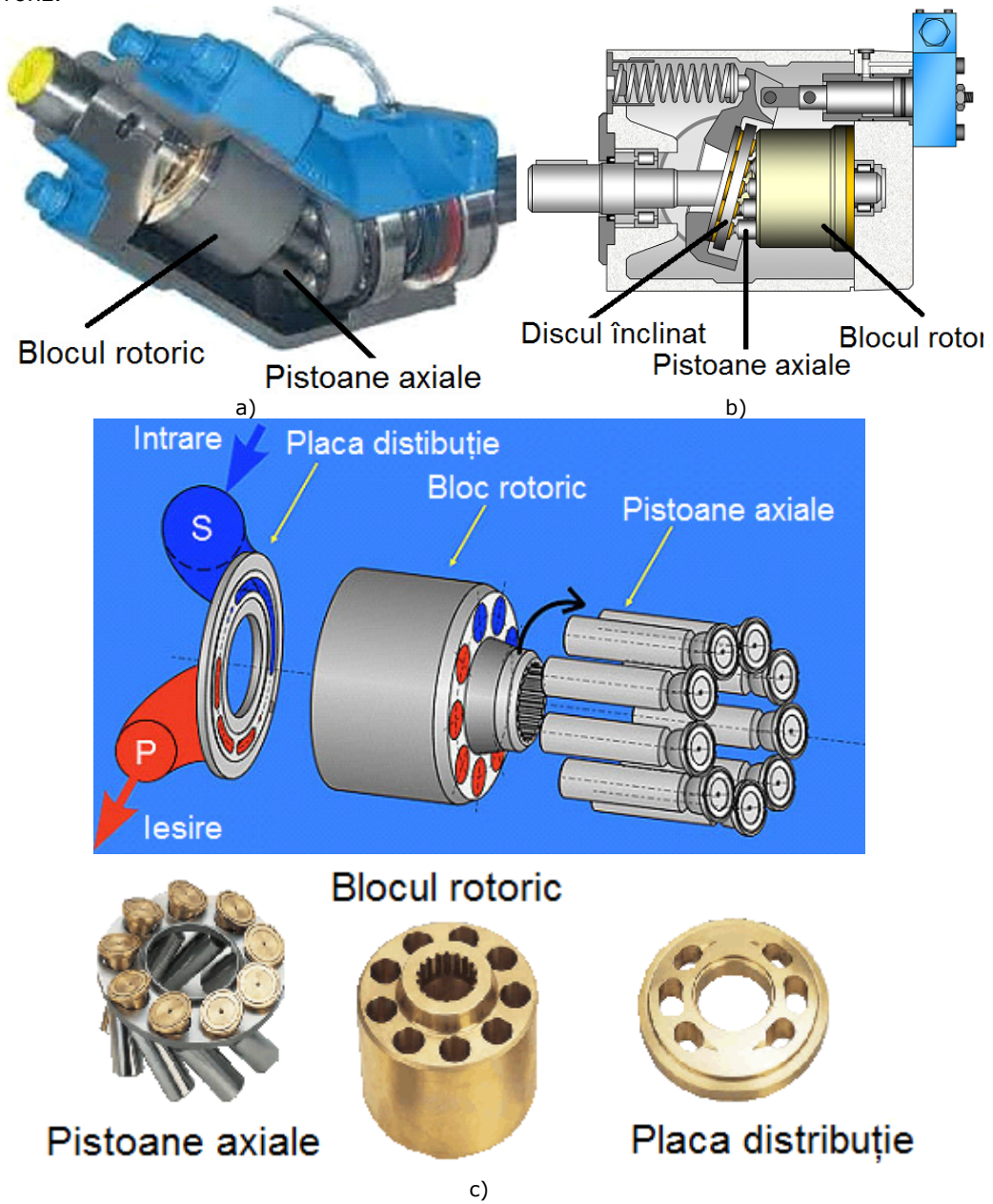
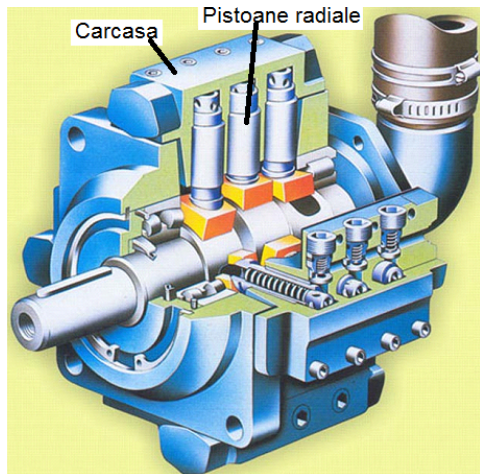
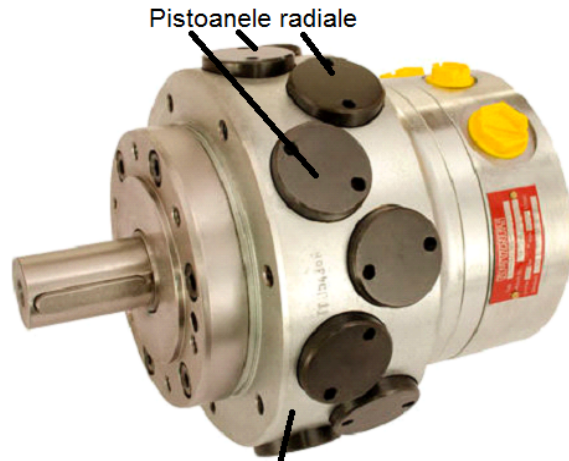


Fig.1.19 Pompe volumice cu pistoane axiale [119]  
 a) cu bloc rotoric înclinat; b) cu disc înclinat; c) desfășurare elemente componente



a) [119]



b) [120]

Fig. 1.20 Pompe volumice cu pistoane radiale

Din cele prezentate mai sus se constată că în domeniul pompelor hidraulice bronzurile și alamele se folosesc foarte mult în turnarea rotoarelor și a carcaselor (camerelor spirale), componente supuse solicitărilor de eroziune, generate de exploatarea în regimuri de curgere cavitațională.

### 1.3 Utilizări la armături și fittinguri

Actualmente, chiar și în România, dezvoltarea și modernizarea urbană și rurală, reflectate în gradul de civilizație, printre altele, sunt caracterizate și de sistemul rețelilor de alimentare cu apă și irigații. Nu există tip de astfel de rețea ca să nu aibă incorporate vane, robineti și fittinguri, de diverse forme și dimensiuni.

În ultimul timp, căutate au cele realizate din oțeluri inoxidabile, bronzuri sau alame, datorită rezistenței la coroziunea chimică, abrazivă și cavitațională, chiar și în condiții de presiune ridicată, cum sunt evacuatoarele/supapele de condens termodinamic.

În imaginile din fig.1.21-1.24 sunt redată câteva exemple de vane/robineti și fittinguri din alame sau bronzuri [121, 122].



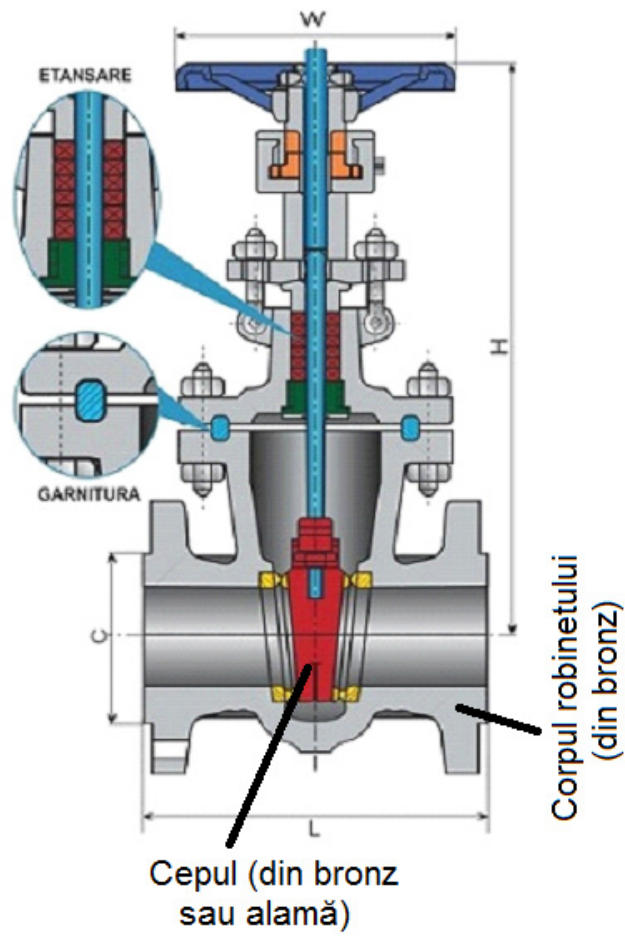


Fig. 1.21 Indicarea elementelor componente realizate din bronz sau alamă



Fig. 1.22 Robinete și vane cu corpuri din bronz și ventile din alamă sau bronz



Fig. 1.23 Supapă de siguranță folosită la centralele termice



Fig. 1.24 Fitinguri din alamă și bronz

Datorită regimurilor de curgere, inevitabil, acestea sunt supuse eroziunilor cavitaționale, abrazive și chimice. Prin urmare, cum ventilele, cepurile, corpurile vanelor și robinetelor, dar mai ales fittingurile deteriorate, indiferent cum, nu pot fi recondiționate, singura soluție, fiind înlocuirea, obiectivul tezei, de a cerceta diverse tehnologii prin care să se îmbunătățească comportarea și rezistența la eroziunea cavitației, a alamelor și bronzurilor, utilizate în fabricarea acestora, este de actualitate și binevenită pentru fabricanții de echipamente și piese hidraulice.

#### 1.4 Concluzii

Fenomenul de cavitație, fiind unul complex, este amplu studiat în condiții de simulare în laborator, datorită multiplelor domenii în care se face prezentă prin efectele sale, în special prin cel de distrugere a materialelor din care sunt realizate piesele cu care vine în contact și îi mărginesc domeniul de manifestare.

Se constată o amplă utilizare a aliajelor de cupru (alamă, bronz) în realizarea celor mai diverse piese (elice de nave maritime și fluviale, rotoare de mașini hidraulice, vane, robinete, fittinguri, etc) ce funcționează în câmpuri hidrodinamice, cu diverse intensități ale fenomenului cavitațional, care le produce degradarea prin eroziune, ca urmare a solicitărilor create sub impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate prin implozia bulelor de cavitație.

Cercetările de laborator, oferite de literatura de specialitate, au avut și au drept scop găsirea celor mai bune tehnologii de fabricare și tratament prin care rezistența la cavitație să se mărească, astfel încât durata lor de exploatare, în cavitație, să crească semnificativ.

Se constată scăderea interesului pentru folosirea oțelurilor inoxidabile la realizarea unor astfel de piese, cu trecerea spre bronzuri și alame, în special când exploatarea are loc în medii chimic agresive, cum este cea a elicelor navelor maritime și oceanice, unde rata de utilizare, a ajuns până la circa 82%.

Pentru îmbunătățirea comportării la eroziunea cavitației, cu creșterea rezistenței acestor aliaje ale cuprului, este absolut necesară aplicarea tehnologiilor adecvate care să contribuie la obținerea unor structuri și proprietăți fizico-mecanice favorabile. Evidențierea factorilor care influențează aceste modificări, este posibilă prin cercetările de laborator, cu folosirea celor mai performante aparate de generare a eroziunii și de investigare microstructurală; evaluarea rezultatelor obținute făcându-se prin raportarea la rezultatele existente în laborator sau oferite de literatura științifică, cu metodele permise de standardele din domeniu (cum este ASTM G32-2010) și cu cele devenite cutume ale laboratorului și acceptate de specialiști.

#### 1.5 Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- cercetarea comportamentului și rezistenței la cavitație vibratoare a bronzului CuSn-12C și alamei CuZn39Pb3, folosite în turnarea pieselor, de tipul celor prezentate mai sus, solicitate la eroziunea prin cavitație și supuse unor tratamente termice volumice specifice prin care să se îmbunătățească comportarea și rezistența la cavitație, față de starea inițială, comparabilă cu a altor materiale cu rezultate apreciable.
- cercetarea comportării și a mecanismului de degradare a straturilor de rășini polimerice, la solicitările produse prin cavitația vibratoare;
- aprofundarea mecanismului de degradare prin eroziunea cavitației, produsă suprafețelor probelor de bronz și alamă, supuse la diverse regimuri de tratament termic volumic, precum și suprafețelor acoperite cu rășini polimerice și cu straturi realizate din pulberi compozite pe bază de cupru, în aparatul vibrator standard, cu cristale piezoceramice, T2 (amplitudinea vibrațiilor = 50 μm, frecvența vibrațiilor = 20000 ±1% Hz, diametrul probei = 15,8 mm), aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara;
- investigarea morfologiei și caracterizarea macro- și microstructurală a suprafețelor solicitate la eroziunea cavitației cu aparatură optică și electronică

- de ultimă generație, cu studierea mecanismului de generare și propagare a fisurilor și ruperilor;
- evaluarea rezultatelor obținute, pe baza metodei comparative, cu cele specifice materialelor de referință ale laboratorului, folosind curbele și parametrii specifici recomandați de normele ASTM G32-2010 [99], precum și imaginile microstructurii erodate, obținute prin microscopie optică și electronică.

### **1.6 Noutatea tezei de doctorat**

Noutatea tezei de doctorat constă în identificarea procedeelor de tratamente termice volumice pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziunea prin cavitație a bronzului CuSn12-C și alamei CuZn39Pb3, destinate fabricării elicelor de vapoare, rotoarelor de pompe hidraulice, organelor vanelor și robinetelor, precum și a diverselor fittinguri, supuse atacurilor cavitației. De asemenea, se cercetează comportarea la cavitația vibratoare a unor noi tipuri de amestecuri polimerice, depuse pe suprafețele probelor de cavitație, realizate din bronz CuSn12-C, precum și a unor pulberi pe bază de cupru depuse prin pulverizare termică HVOF pe suprafețe de oțel.

## **CAP. 2**

# **MATERIALELE, APARATURA DE LABORATOR ȘI METODELE UTILIZATE ÎN CERCETAREA EXPERIMENTALĂ**

Cercetările efectuate în cadrul lucrării de doctorat vor fi derulate pe o alamă Cu-Zn-Pb și un bronz Cu-Sn, în stări de livrare și patru respectiv trei stări rezultate în urma aplicării tratamentelor termice volumice, prin care se urmărește îmbunătățirea rezistenței la eroziunea cavitației.

Experimentele de comportare și rezistență la cavitație, precum și evaluarea, sunt realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, în conformitate cu normele internaționale, cutuma și metodele specifice laboratorului.

Pentru tratamentele termice și investigațiile structurale se folosesc cuptoarele și microscopul optice și electronice din cadrul Laboratorului de Știința și Ingineria Materialelor.

Pentru alte investigații, care nu se pot realiza în cadrul laboratoarelor Universității Politehnica Timișoara se apelează la firme din țară. Este cazul firmei Inteliform SRL Timișoara care oferă sprijin în utilizarea rugozimetrelor pentru înregistrarea profilogramei suprafețelor erodate prin cavitația vibratoare.

### **2.1 Materialele cercetate**

Materialele cercetate sunt două aliaje ale cuprului cu zincul (alamă) și staniul (bronz). Rațiunea pentru care sunt cercetate aceste două aliaje este că utilizarea lor la piese (corpuri și ventile de robinete, rotoare de pompe, elice de vapoare, etc) ce funcționează în regimuri de cavitație, este necesar a li se cunoaște comportarea la eroziunea produsă prin cavitație, mai ales că, repararea prin sudare (obișnuită pentru piesele erodate de cavitație), este dificilă și nu se recomandă, în special la alame [58], [77], [125], [122]. Așadar, prin cercetarea acestor două aliaje ale cuprului se deschide și calea spre găsirea tehnologiilor prin care să se mărească rezistența la solicitările cavitaționale.

**1-** Alama, procurată de la firma SC Color-Metal SRL, sub formă de bară cu diametrul de 20 mm, pe lângă zinc mai conține ca element chimic principal și plumb. Simbolizarea sa, conform EN 10204:2004, este CuZn39Pb3.

Analizele, realizate în laboratoarele de specialitate din cadrul Universității Politehnica Timișoara, au condus la următoarele rezultate:

- Compoziția chimică: 57.7 % Cu, 38.49 % Zn, 3.3 % Pb, 0.2 % Fe, 0.1 % Ni, 0.2 % Sn, 0.01 % Al.
- Proprietățile mecanice: rezistența la rupere  $R_m = 502$  MPa, limita de curgere  $R_{p0.2} = 365$  MPa, Durezza Brinell = 115 daN/mm<sup>2</sup>, alungirea la rupere  $A_5 = 18$  %, modulul de elasticitate longitudinal  $E = 97$  GPa, densitatea  $\rho = 8.47$  g/cm<sup>3</sup>;
- structură bifazică formată din soluția solidă  $\alpha$  și compusul electronic  $\beta'$ , fig.2.1, [109, 110], [122].

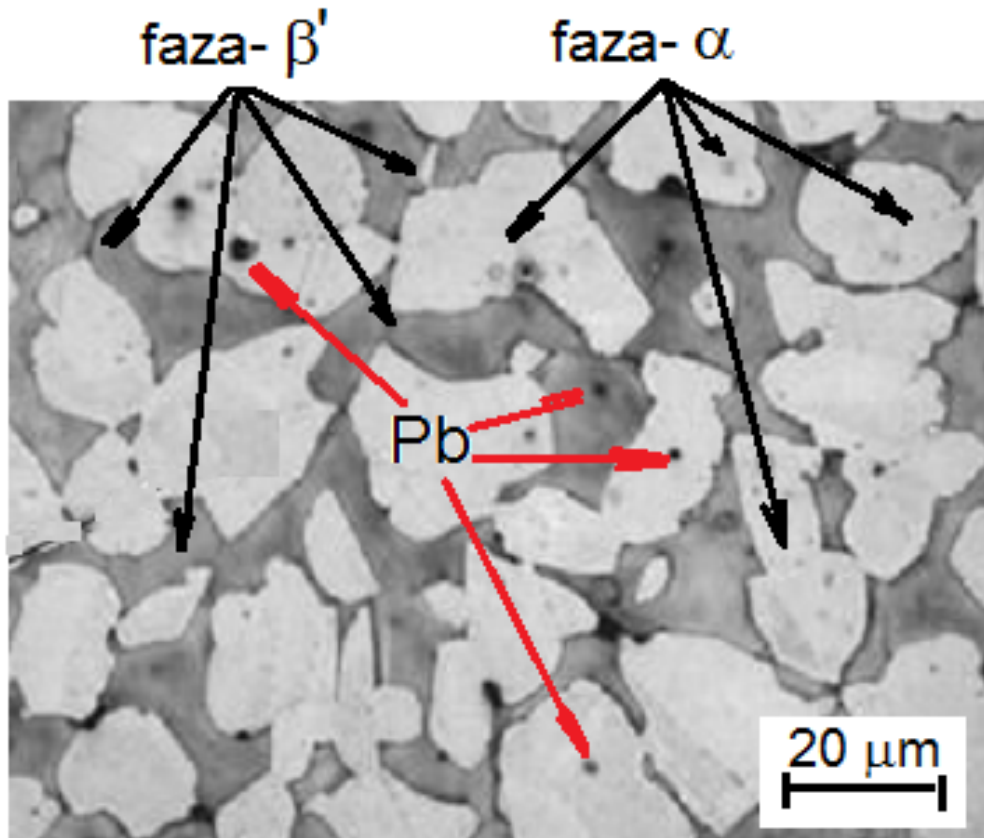


Fig. 2.1 Structura alamei CuZn39Pb3 (imagine preluata din [60])

Alegerea acestei alame, cu o structură bifazică ( $\alpha$  cu rețea c.f.c. și  $\beta'$  cu rețea c.v.c.), s-a făcut din considerentul că aceste categorii de alame sunt mai puțin utilizate la piese ce lucrează în medii puternic corozive sau supuse la solicitările mecanice de intensitate ridicată, dar destul de mult la diverse piese supuse uzurilor de frecare [43, 44], [75], [109], [60]. Deși, sunt utilizate în turnarea corpurilor și ventilelor robinetelor care, la anumite regimuri de funcționare, sunt supuse la uzare prin cavitație, literatura de specialitate nu oferă date despre comportarea și rezistența acestor tipuri de alame la eroziunea produsă la regimurile cavitaționale de curgere. Fiind componente ale sistemelor ce transportă lichide reale, unele cu particule solide în suspensie, ca urmare a mecanismului hidrodinamic, traseul de curgere se deteriorează mult mai rapid, datorită efectului cumulativ de eroziune abrazivă și cavitațională. Obișnuit, pentru piesele intens solicitate la cavitație, cum sunt elicele vapoarelor, alamele folosite în turnarea acestora au un conținut sub 0.5 % Pb [60], [84], deși proprietățile lor mecanice, cu efect asupra rezistenței la eroziunea prin cavitație, nu au valori mult superioare celor specifice alamelor cu conținut de 2.5...3.5 % Pb. De asemenea, datorită capacității bune de prelucrare prin așchiere, alamele cu conținut de plumb au o largă utilizare în fabricarea scaunelor de închidere ale ventilelor supapelor de presiune și robinetelor din sistemele hidraulice de acționare [84], [109] care, la

anumite regimuri de exploatare, sunt supuse solicitărilor cavitaționale, de o intensitate mai mică.

**2-** Bronzul, primit de la Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați, este de tip Cu-Sn, cu conținut de Pb, Fe, Ni, și Zn, simbolizat CuSn12-C, conform DIN EN 1982, a fost ales din considerentul că este recomandat acolo unde solicitările sunt mari și unde este nevoie de rezistență la uzură în condiții de coroziune și cavitație [67], [123];

Analizele, realizate în laboratoarele de specialitate din cadrul Universității Politehnica Timișoara, au condus la următoarele rezultate:

- compoziția chimică: 85.16 % Cu, 11.18 % Sn, 0.4856 % Zn, 0.7983 % Pb, 0.5226 % Fe, 0.6933 % Ni, 0.2 % Sn, 0.0304 % Mn, 0.0382 %S, 0.0714 %Sb, <0.003 %P;
- proprietățile mecanice: rezistența la rupere  $R_m = 312$  MPa, limita de curgere  $R_{p0.2} = 157$  MPa, Duritatea Brinell = 97 daN/mm<sup>2</sup>, alungirea la rupere  $A_5 = 9$  %, modulul de elasticitate longitudinal  $E = 97$  GPa, densitatea  $\rho = 8.77$  g/cm<sup>3</sup>;
- structură bifazică formată din grăunți de soluție solidă  $\alpha$ , iar la conținuturi mai mari de staniu, din grăunți de soluție  $\alpha$  și grăunți de eutectoid ( $\alpha + \delta$ ) [124], fig.2.2.

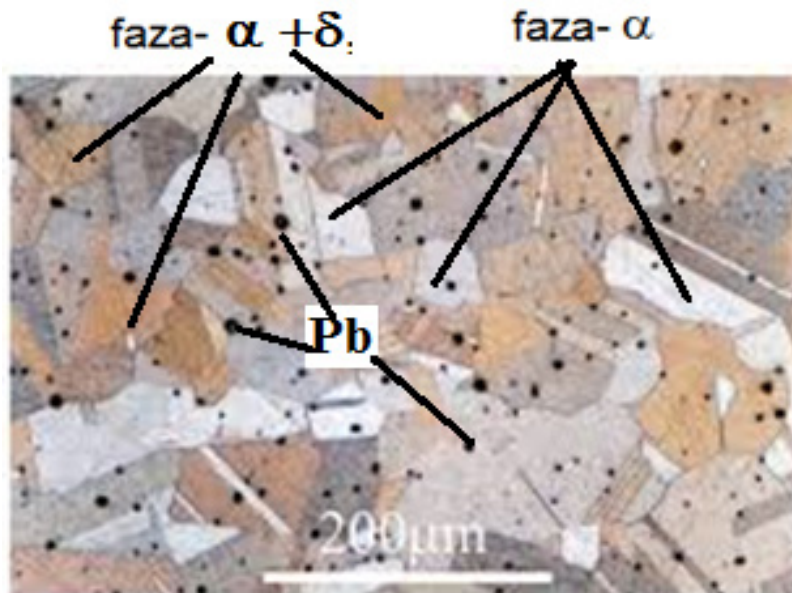


Fig. 2.2 Structura bronzului CuSn12-C (imagine preluată din [124])

Alegerea acestui tip de bronz este determinată de faptul că are o bună rezistență la acțiunea apei sărate, a soluțiilor neutre de săruri, a acizilor sulfurici și fosforici, a atmosferelor cu H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, dar sunt atacate de acizii azotic și clorhidric, precum și de soluțiile tari de baze, motiv pentru care, încă, se utilizează la turnarea elicelor de vapoare. Totodată, frecvența de utilizare în fabricarea corpurilor de vane și robinete, este mai ridicată decât a alamelor CuZnPb.

Alt motiv, pentru cercetarea rezistenței la cavitație, este legat de proprietăți tehnologice cum ar fi: antifricțiune ridicată, rezistență la oboseală mare, prelucrabilitate prin așchiere bună, durificare prin ecrusare, sudabilitate satisfăcătoare și ceea ce este cel mai important o foarte bună rezistență la uzură în

condiții de frecare cu ungere. Această proprietate este determinată de structura eterogenă specifică a bronzurilor cu staniu: soluția solidă  $\alpha$  reprezintă constituentul moale care se uzează în timpul exploatarei și creează canale de lubrifiere, în timp ce faza  $\delta$  reprezintă constituentul dur care preia solicitările mecanice.

## 2.2 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice

Aparatul folosit în generarea cavitației este cel standard cu cristale piezoceramice, fig.2.3, din cadrul Laboratorului de Cavitație [10], [12], [17], [55, 56], [79], [89], al Universității Politehnica Timișoara, ai cărui parametri funcționali, sunt controlați și păstrați în limitele admisibile de normele ASTM G32-2010, sunt:

- Amplitudinea vibrațiilor (dublă) = 50  $\mu\text{m}$
- Frecvența vibrațiilor =  $20 \pm 0.02$  kHz
- Puterea generatorului electronic de ultrasunete = 500 W
- Mediu lichid = apa dublu distilată
- Temperatura lichidului =  $22 \pm 1^{\circ}$  C

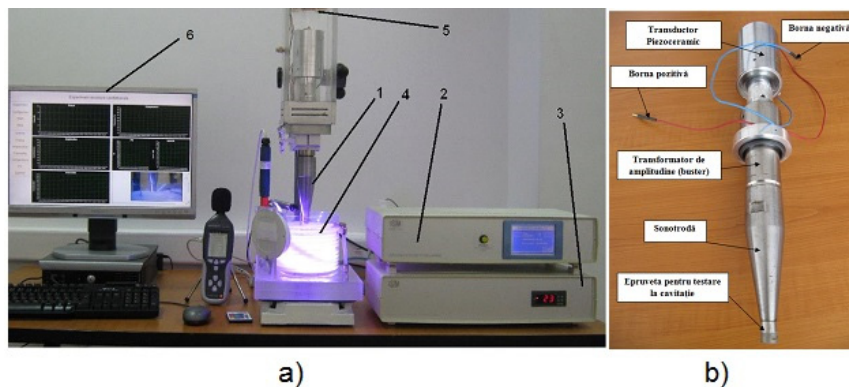


Fig.2.3 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice

a) Imagine ansamblu (1- sonotroda; 2 - sistemul electronic de generare a frecvenței de vibrație și puterii necesare transductorului piezoceramic de 20KHz/500W; 3 – regulatorul de temperatură a apei; 4 – vasul cu lichid și serpentină de răcire; 5 – sistemul de ventilație/răcire a transductorului piezoceramic; 6- calculatorul prin care se conduc și controlează parametrii aparatului vibrator); b) Sistemul mecanic vibrator

În vederea realizării testelor de cavitație, probele vor fi aduse la forma și dimensiunile din fig. 2.4, iar suprafețele ce vor fi supuse atacului cavitației vor fi lustruite la o rugozitate  $Ra \cong 0.02 \mu\text{m}$ . Pentru rigoare, conform cerințelor de laborator, pentru fiecare stare a materialelor cercetate, sunt testate cel puțin trei probe.



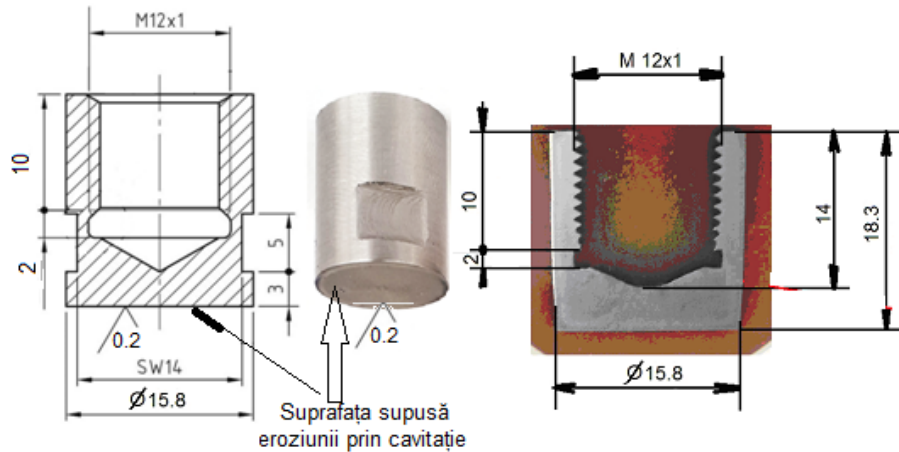


Fig. 2.4 Proba pentru cavitație

Conform metodologiei stabilite în cadrul Laboratorului de Cavitație, în concordanță cu cerințele impuse de normele ASTM G32-2010 [56, 57], [79], [99], durata totală a unui test de eroziune la cavitație vibratoare este de 165 minute. Aceasta este divizată în perioade intermediare de 5, 10 și 15 minute cu scopul urmăririi comportării suprafeței atacate la cavitație. La finalul fiecărei perioade se fac poze cu aparatul de fotografiat Canon Power Shot A480, și cu microscopul Wifi Celestrone, ale căror rezoluții permit, mai mult, evidențierea extinderii distrugerilor pe suprafață și mai puțin în profunzime.

Etapile parcurse, succesiv, în derularea procedurii de testare la cavitație sunt [9], [56], [57], [79], [89]:

- 1- înainte de începerea programului experimental de testare la cavitație, proba se spală succesiv în apă sub presiune, la rețeaua de apă potabilă și în alcool (acetonă) și se usucă în curent de aer cald;
- 2- proba se cântărește la balanța analitică Zatkłady, fig.2.5, ce permite citirea cu o precizie de  $10^{-5}$  grame și se notează masa inițială;
- 3- proba se montează în sonotroda sistemului vibrator și se imersează în apa distilată pe o adâncime de circa 8-10 mm;
- 4- se pornește generatorul electronic de ultrasunete, care pune în rezonanță sistemul mecanic vibrator, cu prima durată a atacului cavitației;
- 5- la terminarea perioadei de testare se parcurg etapele de spălare, uscare și cântărire;
- 6- se fotografiază, cu aparatele Canon Power Shot A480 și cu microscopul Wifi Celestrone, suprafața probei expusă cavitației, cu scop de urmărire a evoluției ariei de extindere a eroziunii și, eventual, se analizează și la microscopul optice și electronice;
- 7- se reia procedura de testare cu respectarea etapelor 3, 4, 5 și 6, până la expirarea duratei totale de testare, de 165 minute.



Fig. 2.5 Balanța analitică de tip Zařklady Mechaniki Precyzyjnej WP 11

Pentru evitarea influenței mediului coroziv, pe perioadele de stagnare a atacului cavitației, probele sunt păstrate în exicatori, cu scopul ca rezultatele cercetării, respectiv pierderile de masă, să nu fie afectate la continuarea studiului.

### **2.3 Aparat de debitat și șlefuit**

Pentru investigarea macro- și micrografică la microscopul optic și electronic, probele sunt secționare axial în două jumătăți și pregătite pentru lustruire și atac metalografic.

Aparatele utilizate în acest scop, prezentate mai jos sunt în dotarea Laboratorului de Știința și Ingineria Materialelor, al Universității Politehnica Timișoara. Aparatul de tăiat cu pânză și lichid de răcire de tip Buehler 4000, fig. 2.6, este folosit la tăierea probelor, perpendicular pe suprafața atacată.



Fig. 2.6 Aparatul de tăiat cu pânză BUEHLER 4000

După debitare, probele sunt înglobate în rășină polimerică cu ajutorul aparatului Buehler Simplimet 1000, Fig. 2.7 și lustruite pe aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta, dotat cu un cap de șlefuire/lustruire, fig.2.8.



Fig. 2.7 Aparatul de înglobat la cald Buehler Simplimet 1000



Fig. 2.8 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta

Alegerea hârtiei abrazive, pâslei abrazive și a emulsiilor, pentru șlefuire și lustruire, în vederea obținerii unor suprafețe oglindă, fără rizuri, se face din catalogul

producătorului de echipament, conform recomandărilor, funcție de tipul bronzului. La finalul operației de lustruire, piesa înglobată în rășină este spălată, uscată și atacată metalografic.

#### **2.4 Cuptoare pentru tratamente termice volumice**

În fig.2.9 este prezentat cuptorul electric pentru tratamente volumice, ce este utilizat în realizarea tratamentelor termice specifice alamelor CuZn39Pb3 și bronzului CuSn12-C. Temperatura maximă, conform fișei emise de fabricant, este de 1300 °C. Cuptorul este în dotarea Laboratorului de Știința și Ingineria Materialelor, al Universității Politehnica Timișoara.



Fig. 2.9 Cuptor electric pentru tratamentele termice ale aliajelor metalice

#### **2.5 Microscopie optice și electronice**

Microscopie optice și electronice, aflate în laboratoarele de specialitate ale Universității Politehnica Timișoara, sunt utilizate pentru analiza morfologică a structurii erodate, din punct de vedere al dimensiunilor cavernelor și al modului de

inițiere, dezvoltare și propagare a fisurilor în suprafața atacată de cavitație, generate la impactul cu microjeturile și uindele de șoc, produse prin implozia bulelor de cavitație.

Primele analize cu privire la profilograma eroziunii, cu preluări de imagini, se fac la final de fiecare perioadă intermediară a atacului cavitației, la microscopul Optika, fig. 2.10, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara și conectat la calculator. Microscopul permite mărimi ale zonelor investigate de 4x, 10x, 20x, 40x și 80x.

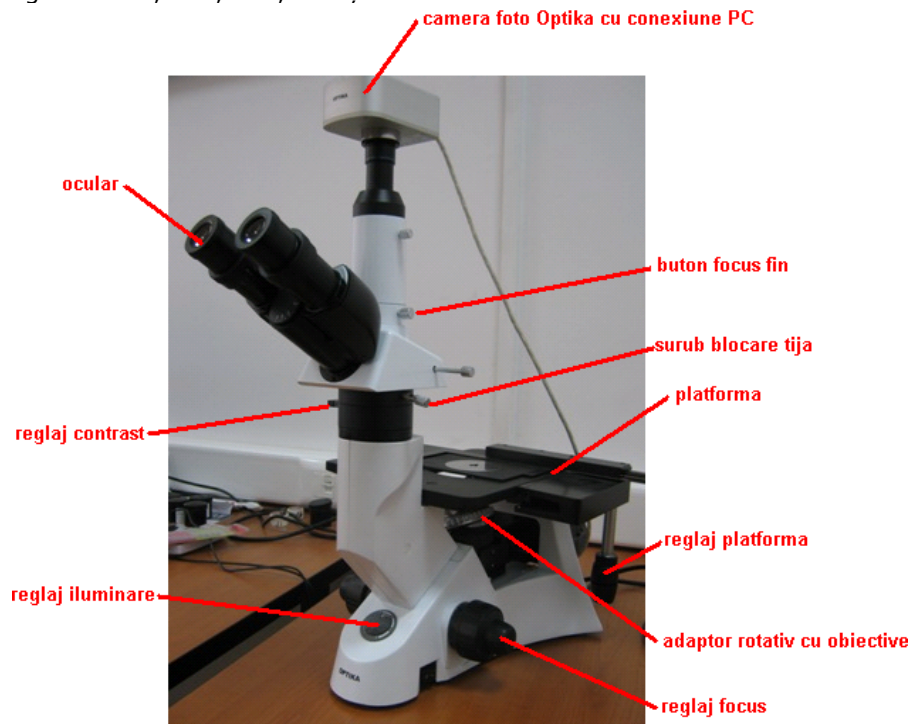


Fig. 2.10 Microscopul optic „Optika”

La finalul celor 165 minute de expunere la cavitația vibratoare, probele sunt investigate din punct de vedere al morfologiei structurii distruse prin eroziunea cavitației, la microscopul optic și electronic, de foarte mare rezoluție, din dotarea Laboratorului de Știința și Ingineria Materialelor.

Astfel de microscopul sunt

- microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax, fig.2.11, care, prin dispersia în energie a razelor X (EDX), permite identificarea proporției elementelor chimice existente în probele testate, funcție de natura constituenților structurali și de zona investigată.
- și
- microscopul electronic cu baleiaj, tip Philips XL 30 ESEM, fig.2.12, folosit la măsurarea adâncimii de pătrundere în orice loc din aria erodată de cavitație și la înregistrarea imaginilor microstructurale ce stau la baza analizei comportării la cavitație a constituenților structurali.



Fig. 2.11 Microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax



Fig. 2.12 Microscopul electronic cu baleiaj Philips XL 30 ESEM

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

Rezoluția	2 nm
Tensiunea de accelerare	0.2 to 30 kV
Tunul de electroni	Emisie de Câmp
Mărirea	15.... 500.000 ori
Gradul de mișcare	Rotire -15° to +75°
(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

Examinările macro- și micrografice, după atacul metalografic, se fac la stereomicroscopul Olympus SYX7, fig. 2.13, dotat cu o varietate de oculare, obiective și tehnici de iluminat, ce permit zoom-uri mari, funcție de scopul investigației.



Fig. 2.13 Microscopul OPLIMPUS SYX7

## 2.6 Rugozimetre

Printre parametrii care stau la analiza comportării și rezistenței materialelor la eroziunea cavitației vibratoare, sunt cei ai rugozității suprafeței erodate, de la finalul duratei totale de atac al cavitației, de 165 minute. Conform procedurii utilizate și în tezele/lucrările realizate în ultimii patru ani [45], [79], [89], în cadrul laboratorului, parametrii ce definesc rugozitatea,  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ , se măsoară, cu aparatul Mitutoyo SJ 210, fig. 2.14, pe trei direcții dispuse la  $120^\circ$ , fig. 2.15. Aparatul este în dotarea firmei Inteliform SRL din Timișoara, colaboratoare permanentă a Laboratorului de Cavitație.

Evaluarea pe baza parametrilor mășurați ai rugozității se face prin compararea valorilor acestora, în special a parametrului  $R_z$ , cu valoarea adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii, determinată prin calcul, pe baza masei de material expulzate din suprafața expusă la cavitație [25], [45], [89].

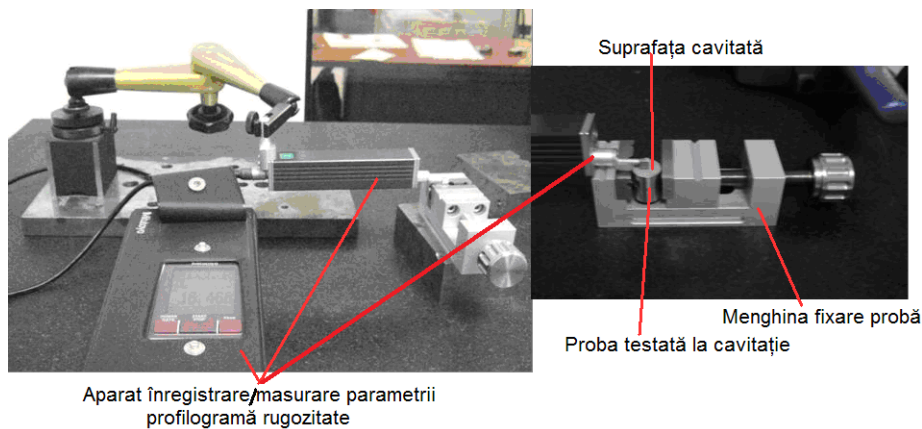


Fig. 2.14. Măsurarea rugozității cu rugozimetru digital Mitutoyo SJ 210 pe trei direcții

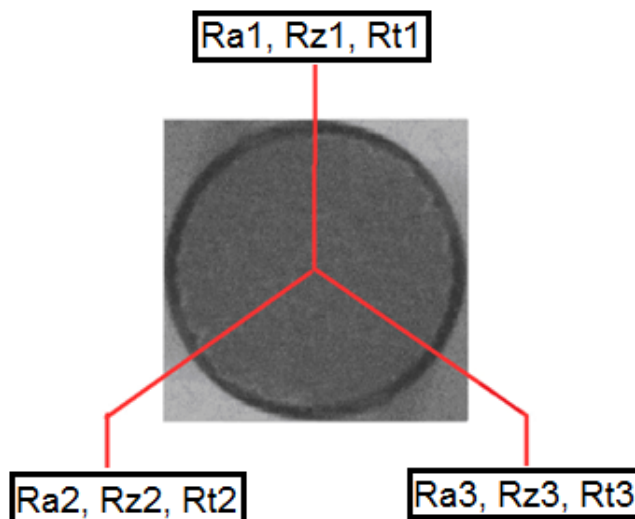


Fig. 2.15 Măsurarea rugozității pe trei direcții



### 2.7. Aparat pentru investigatii sclerometrice

Toate studiile și analizele efectuate cu microscopie performante, în cadrul Laboratoarelor de Cavitație și Știința și Ingineria Materialelor, ale Universității Politehnica Timișoara [22], [45], [79], [89], dar și în alte laboratoare (Michigan, Gdansk, Wuxi, Grenoble, etc.) de alți cercetători [39], [40], [41], [42], [47], [49], [50-52], [90], [91], [97], pe o multitudine de materiale, arată că, pe parcursul atacului cavitației, stratul de material erodat, în timp, se durifică prin deformare, datorită solicitărilor mecanice, la care este supus prin impactul repetat cu microjeturile și undele de șoc, prin mecanismul hidrodinamic al cavitației. Prin urmare, pentru evaluarea rezistenței și analiza comportării materialului la cavitație, după secționare și lustruire, cu durimetrul digital Vickers model HV-50AC, fig.2.16, se vor realiza măsurători ale durității stratului (HV0.5, HV0.5,, etc), din vecinătatea suprafeței erodate, afectat/modificat în timpul atacului cavitației.



Fig. 2.16 Durimetru digital Vickers model HV-50AC.

### 2.8 Metode de evaluare a rezistenței la cavitație

Evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitația vibratoare, a materialelor folosite în cadrul tezei de doctorat, se face pe baza parametrilor și curbelor specifice, în strictă concordanță cu prevederile normelor internaționale ASTM G32-2010 și după metodele și cutuma laboratorului [13], [79], [89]. În ultimul timp s-a ajuns la concluzia că cele mai bune aprecieri rezultă din evoluțiile curbelor caracteristice (exemplificat în fig.2.17, pentru volumul erodat și viteza acestuia), care permit și identificarea parametrilor, astfel:

1. valoarea spre care curba de aproximare, a valorilor experimentale ale vitezei de eroziune, tinde să se stabilizeze (finală de palier)  $v_s$ ;
2. valoarea de maxim pe care o atinge curba de aproximare, a valorilor experimentale ale vitezei de eroziune  $v_{max}$ ;
3. rezistența normalizată la cavitație  $R_n$ , definită prin  $R_{n,max} = v_{max}/v_{max,e}$ , sau  $R_{n,s} = v_s/v_e$  - unde indicele "e" se referă la materialele etalon al laboratorului (în cazul laboratorului utilizat în această cercetare sunt oțelul OH12NDL- de referință pentru oțelurile inoxidabile utilizate la echipamentele hidroenergetice, exploatate în regim intens de cavitație (palete și rotoare de turbine hidraulice, elice navale), bronzul naval de înaltă rezistență, de tip Cu-Ni-Al, folosit pentru aliaje ale cuprului destinate fabricării elicelor navale și oțelul slab aliat 41Cr4, folosit cu precădere pentru celelalte categorii de oțeluri și metale folosite cu precădere la piesele mai slab solicitate la cavitație, din sistemele hidraulice de acționare, alimentări cu apă și irigații;
4. adâncimea de eroziune medie cumulată, rezultată la finalul atacului cavitației,  $MDE_{max}$ ;
5. valoarea maximă a curbei de mediere a valorilor experimentale ale vitezelor de pătrundere a eroziunii,  $MDER_{max}$ , sau valoarea spre care această curbă tinde să se stabilizeze  $MDER_s$ ; respectiv inversul acestora,  $1/MDER_{max}$  respectiv  $1/MDER_s$ , considerate ca reprezentând rezistența la cavitație  $R_{cav}$ ;
6. timpul de incubație,  $t_i$ ;
7. durata necesară realizării unei anumite degradări a suprafeței expuse la cavitație - parametru folosit pentru suprafețele acoperite cu alte materiale (compozite, rășini, vopsele, etc);
8. microrelieful suprafețelor erodate cavitațional, exprimat prin unul dintre parametrii rugozității:  $R_a$ ,  $R_z$  sau  $R_t$ , ce se pot determina pe baza profilogramelor rugozității înregistrate pe suprafața cavitată la final de atac.

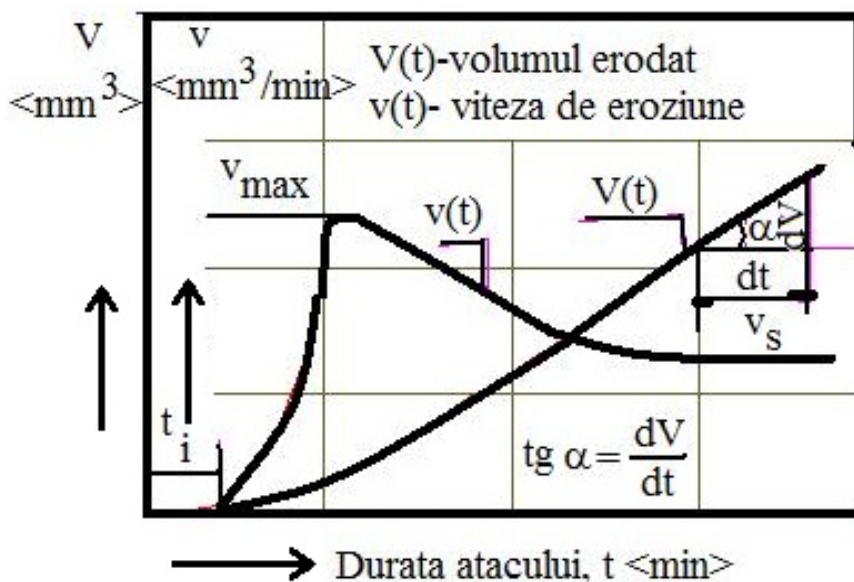


Fig. 2.17 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională

Pentru o analiză completă a comportării, sau rezistenței la eroziunea cavitației, se vor folosi și imaginile obținute prin investigațiile microstructurilor cu ajutorul microscopelor optice și electronice.

Cercetările realizate, în cadrul tezelor de doctorat, din ultimii 20 ani [8-26], [45], [55, 56], [59-63], [70-72], [74], [79, 80], [85-89], în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, au dus la concluzia că utilizarea parametrilor MDE, MDER sau 1/MDER, oferă cele mai bune concluzii despre rezistența materialului.

Curbele de mediere/aproximare ale valorilor obținute prin experiment, la perioadele intermediare de atac, MDE(t) și MDER(t), au expresiile, stabilite de colectivul condus de Bordeășu [13], [22]:

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-Bt}) \quad (2.1)$$

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

unde:

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

B - este parametrul de formă a curbei

Valorile experimentale, approximate de cele două curbe descrise de relațiile (1), sunt calculate pe baza pierderilor masice  $\Delta m_i$ , înregistrate la finalul fiecărei perioade intermediare de testare, „i”, conform relațiilor de mai jos.

$$MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) \quad (2.2)$$

$$MDER_i = \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot \Delta t_i}$$

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

$\Delta t_i$  - 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),

Utilizarea curbelor de aproximație este importantă, deoarece, funcție de forma pe care o au și de dispersia punctelor experimentale față de acestea, se pot face aprecieri asupra comportării și rezistenței la cavitație pe durata atacului.

Întrucât testele de cavitație se realizează pe câte trei probe, din fiecare tip de materiale, curbele MDE(t) și MDER(t) vor aproxima trei valori experimentale, obținute pentru fiecare perioadă intermediară a duratei cavitației.

Acuratețea derulării experimentului, respectiv 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.) va fi realizată prin calculul statistic al intervalului de toleranță aferent benzii de dispersie în care sunt dispersate

punctele experimentale, și respectiv al erorii standard de estimare, care dă dispersia punctelor experimentale față de curba de mediere construită analitic cu relațiile stabilite în cadrul laboratorului [55, 56], [79], [89].

Tot calculul statistic, pentru stabilirea intervalului de toleranță și erorii standard de estimare, va fi realizat în Mathcad. Din acest motiv, relațiile ce urmează, au formele ce se vor utiliza în cadrul programului de calcul, urmând ca în diagramele finale să se facă identificările impuse, cu notațiile uzuale.

Ecuția generală (1) a curbei de regresie polinomială, are forma [33, 61, 63]:

$$Y = a \cdot t \cdot (1 - e^{-bt}) \quad (2.3)$$

unde:

- $Y$  este curba de regresie (curba de aproximare a valorilor experimentale  $MDE(t)$ );
- $t$  este timpul la care se calculează valoarea  $Y$ ;
- $a$  și  $b$  sunt constante stabilite statistic astfel încât curba de regresie să aproximeze cât mai fidel punctele experimentale.

Dispersia valorilor experimentale, față de cea medie, de aproximare, se calculează cu relația:

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2.4)$$

unde:

- $s^2$  este dispersia parametrului calculat (adâncimea medie cumulată);
- $n$  este numărul testelor efectuate ( $n = 12$ );
- $y_i$  este valoarea experimentală a parametrului calculat (în testele noastre este  $MDE_i$ );
- $\bar{y}$  este media aritmetică a valorilor  $MDE_i$ .

Eroarea standard de estimare se determină cu relația:

$$s_{xy} = \left[ \frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

unde:

- $Y_i$  este adâncimea medie de pătrundere a eroziunii la timpul  $i$  ( $MDE(t)_i$ ), dată prin relația (2.3);
- $y_i$  este valoarea experimentală medie ( $MDE_i$ ) a celor obținute prin experiment la timpul  $i$ ;

Intervalele de toleranță acceptate pentru testele de cavitație sunt de 99% sau 95%, ale căror limite, superioară „S” și inferioară „I”, se calculează astfel:

- pentru Intervalul de toleranță 99%:

$$P99S(xc) = YmE(xc) + 3s_{xy}; \quad P99I = YmE(xc) - 3s_{xy}; \quad (2.6)$$

- pentru Intervalul de toleranță 95%:

$$P99I(xc) = YmE(xc) + 2s_{xy}; P99I = YmE(xc) - 2s_{xy}; \quad (2.7)$$

Unde  $YmE(xc)$ - curba analitică de regresie, dată de relația (2.1), respectiv (2.3).

În fig.2.18, spre exemplificare se prezintă, o astfel de diagramă, obținută de Oancă în teza sa de doctorat [79], la testarea bronzului AMPCOM45, stare livrată.

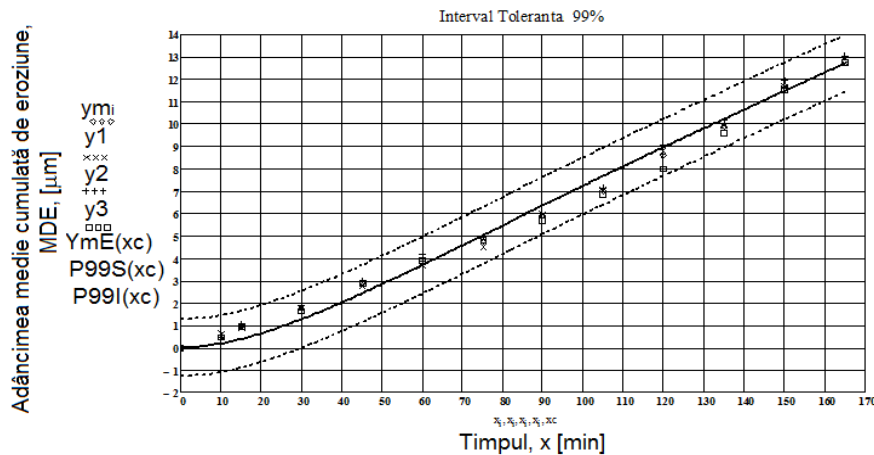


Fig. 2.18 Banda de dispersie, pentru bronzul AMPCO M45, stare livrată [79]

$y1, y2, y3$  – adâncimile medii cumulate de eroziune, corespunzătoare fiecăreia dintre cele trei probe,  
 $ym$  - media aritmetică a adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii, aferente celor trei probe;

## 2.9 Concluzii

**1.** Aliajele cu bază de cupru (bronzuri și alame), prin elementele chimice de înnobilitare și tehnologiile adecvate de tratament, au capacitatea necesară de a-și modifica structura și proprietățile mecanice, astfel încât să asigure creșterea rezistenței la eroziunea produsă de curenții cavitaționali, în care funcționează echipamentele hidroenergetice și nu numai.

**2** Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, folosit la testele de cavitație, este unul modern, performant, care prin modul de control al parametrilor funcționali, la valorile indicate de ASTM G32-2010, oferă garanție pentru acuratețea cercetării.

**3.** Aparatura pentru analiză microscopică, aflată în Laboratorul de Ingineria Materialelor al Universității Politehnica Timișoara, utilizată în examinările structurale este una modernă și de înaltă performanță, care asigură derularea experimentului la cel mai înalt nivel științific.

**4.** Metodele de analiză a comportării la cavitația vibratoare și de estimare a rezistenței sunt în concordanță cu cele stabilite prin ASTM G32-2010 și fac parte din cutumele Laboratoarelor de Cavitație și de Știința și Ingineria Materialelor ale Universității Politehnica Timișoara.

### **CAP. 3**

## **CERCETAREA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIA VIBRATOARE A ALAMEI CuZn39Pb3 ȘI A BRONZULUI CuSn12-C, ÎN STĂRI DE SEMIFABRICAT**

Testele privind comportarea și rezistența la eroziunea cavitației au fost derulate pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [9-26], [59-63], [71, 72], [74], [79, 80], [85-89], prezentat în capitolul 2. Procedurile privind pregătirea probelor înainte de începerea testelor, durata totală și intermediară ale perioadelor de atac ale cavitației vibratoare, înregistrarea pierderilor masice aferente perioadelor de cavitație, precum și păstrarea probelor sunt în conformitate cu prevederile ASTM G32-2010 [99] și cutuma laboratorului [13], [79].

Pe întreaga durată a testelor, parametrii funcționali ai aparatului, care influențează intensitatea eroziunii cavitației, au fost controlați de un soft special, care a permis menținerea la valorile prescrise, astfel:

Amplitudinea vibrațiilor (dubla) = 50  $\mu$ m

Frecvența vibrațiilor = 20  $\pm$  0.02 kHz

Puterea generatorului electronic de ultrasunete = 500 W

Mediu lichid = apa dublu distilată

Temperatura lichidului = 22  $\pm$  1<sup>o</sup> C

Înainte de demararea testelor de cavitație, suprafețele plane ale tuturor probelor, de formă cilindrică cu diametrul D = 15,8 mm, ce urmau a fi expuse eroziunii cavitației, au fost lustruite la o rugozitate Ra = 0.2  $\mu$ m.

Din fiecare tip de material s-au testat câte trei probe. În situațiile în care, pe parcursul experimentului, pentru unele probe, au apărut evenimente ce au dus la întreruperea testelor, s-a recurs la reluare cu o altă probă, astfel încât programul experimental s-a derulat, cap-coadă, pe trei probe.

Realizarea eroziunii prin cavitație vibratoare a fost posibilă datorită mecanismului specific de oscilație a probei (suprafeței expuse cavitației) [9], [13], prin fixarea în sonotroda sistemului mecanic vibrator și imersare în apa dublu distilată pe o adâncime de  $\approx$  10 mm, conform fig.3.1.

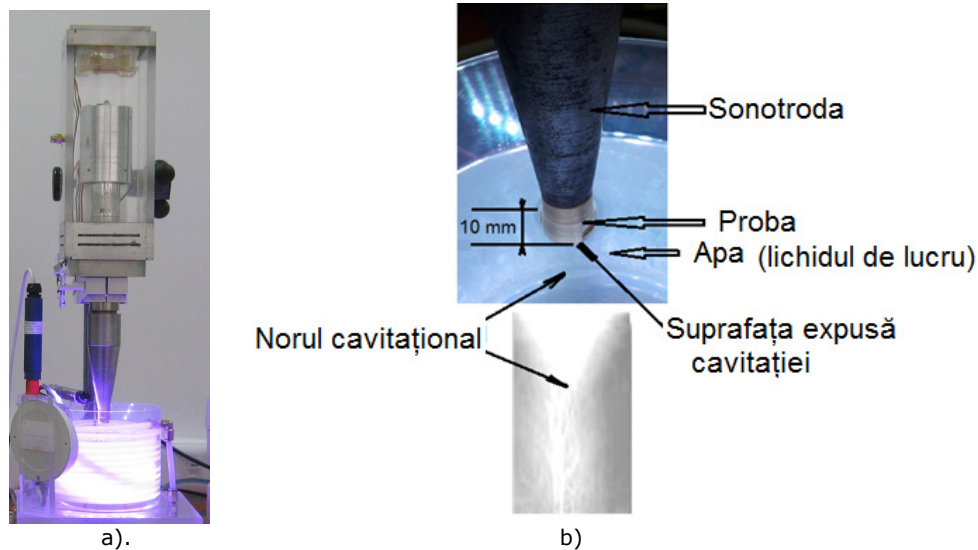


Fig.3.1 Imagine din timpul cavitației vibratoare  
 a) imaginea de ansamblu a aparatului vibrator standard  
 b) detaliu cu proba fixată în sonotroda și imersată în apă

Evaluarea comportării și rezistenței la cavitația vibratoare, conform normelor ASTM G32 – 2010 [99], dar și cutumei laboratorului, este făcută pe baza valorilor experimentale obținute prin măsurători și calcul, precum și a parametrilor și curbelor specifice ce exprimă evoluția adâncimii medii de pătrundere a eroziunii (MDE), respectiv a vitezei medii de pătrundere a eroziunii (MDER), cu durata expunerii la atacul cavitației.

**Precizare:** După cum s-a menționat în capitolul 2 durata totală de expunere la cavitația vibratoare, conform cutumei laboratorului, este de 165 minute divizată în 12 perioade: câte una de 5 și 10 minute și 10 de 15 minute fiecare. Pe tot parcursul programului experimental efectul coroziunii chimice a fost neglijat.

Prin măsurători s-a determinat masa de material îndepărtată prin eroziunea cavitației, folosind balanța analitică tip Zatkłady, ce are o precizie de  $10^{-5}$  g.

Parametrii MDE și MDER au fost calculați, pentru fiecare perioadă intermediară, cu relațiile (vezi și relațiile (2.1) și (2.2) - subcapitolul 2.8):

- adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, aferentă unei perioade a cavitației

$$\Delta MDE_i = \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \quad (3.1)$$

- adâncimea medie de pătrundere a eroziunii cumulată

$$MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \Delta MDE_i \quad (3.2)$$

- viteza medie de pătrundere a eroziunii, aferentă unei perioade a cavitației

$$MDER_i = \Delta MDE_i / \Delta t_i \quad (3.3)$$

Semnificațiile termenilor din relațiile de mai sus sunt:

$i = 1...12$  - reprezintă perioada de testare,

$\Delta m_i$  - este masa de material, pierdută prin eroziune, în perioada "i", în grame,

$\rho = 8.47 \text{ g/mm}^3$ - densitatea alamei CuZn39Pb3, respectiv  $\rho = 8.77 \text{ g/mm}^3$  pentru bronz CuSn12

$\Delta t_i$  - durata cavitației corespunzătoare perioade "i" (5 minute, 10 minute sau 15 minute)

$d_p$  - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ( $d_p = 15,8 \text{ mm}$ ),

Curbele caracteristice eroziunii cavitației, prezentate mai jos, care stau la baza analizei comportării la cavitația vibratoare, precum și la stabilirea valorilor parametrilor de referință, pentru estimarea rezistenței la eroziunea cavitației, sunt construite cu relațiile analitice (2.1) de la subcapitolul 2.8, redată mai jos:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-Bt}) \quad (3.4)$$

- pentru viteza medie de pătrundere a eroziunii

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-Bt}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-Bt} \quad (3.5)$$

în care parametri A și B sunt stabiliți statistic, conform metodologiei descrise în [9], [22]

Parametrii folosiți pentru estimarea rezistenței la cavitație sunt:

- adâncimea medie de eroziune, cumulată în cele 165 minute de expunere la eroziunea cavitației vibratoare,  $MDE_{max}$ ;
- valoarea  $MDER_s$  spre care tinde asimptotic curba  $MDER(t)$  a vitezei medii de pătrundere a eroziunii, de aproximare/mediere a valorilor experimentale  $MDER_i$ ;
- rezistența la cavitație, definită prin relația:

$$R_{cav} = 1/MDER_s \quad (3.6)$$

- parametrul  $R_z$  al rugozității suprafeței erodate, ca principal indicator al profilogramei

Uneori, pentru a evidenția aspecte importante ale evoluției comportării suprafeței, respectiv a structurii materialului, la atacul cavitației, este folosit și parametrul  $MDER_{max}$  - valoarea maximă dată de curba de mediere a valorilor experimentale  $MDER(t)$ .

Pentru simplitate, în loc de **STARE DE SEMIFABRICAT** se va utiliza noțiunea de **STARE DE LIVRARE**.

### 3.1 Rezultatele cercetării la cavitație a alamei CuZn39Pb3

Alama CuZn39Pb3, care face obiectul cercetării din cadrul acestei teze a fost primită, sub formă de bare cu diametrul de 20 mm și lungimea de 100 mm, de la firma SC Color-Metal SRL și în acest subcapitol va fi testată sub această formă de STARE DE LIVRARE. Compoziția chimică, proprietățile mecanice și domeniile de aplicabilitate (în care cavitația este un fenomen frecvent, mai mult sau mai puțin dezvoltat hidrodinamic, dar cu efecte clare de eroziune), care au dus la cercetarea acestei alame sunt detaliate în capitolul 2, subcapitolul 2.1.



Rezultatele cercetării experimentale sunt prezentate prin curbele specifice de eroziune, imagini macro- și microscopice ale suprafeței, respectiv structurii degradate prin cavitație.

Pentru analiză sunt utilizați parametrii sus menționați.

### 3.1.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În figurile 3.2 și 3.3 sunt redată valorile experimentale și curbele analitice de aproximare, pentru parametrii  $MDE_i$  și  $MDER_i$ , care permit analiza comportării alamei pe parcursul expunerii la cavitația vibratoare. În aceste aceste diagrame sunt afișate și valorile parametrilor caracteristici, utilizați pentru analiză:  $MDE_{max}$  (adâncimea medie cumulată de eroziune, după 165 minute de cavitație), fig.3.2,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$  (definite de curba de mediere  $MDER(t)$ ), fig.3.3.

Pentru certificarea acurateții experimentului, în figura 3.4 sunt date banda de dispersie, construită statistic cu relațiile (2.3)...(2.7), prin metoda descrisă în subcapitolul 2.8, precum și valorile parametrilor specifici.

Valoarea de 0.486 a erorii standard de estimare  $\sigma$  (vezi tabelul din fig.3.4), caracteristică unui interval de toleranță de 99 %, arată derularea corectă a programului experimental, cu respectarea tuturor condițiilor de exigență.

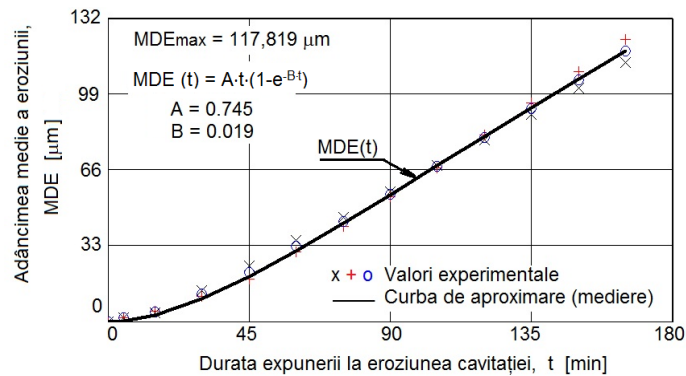


Fig. 3.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

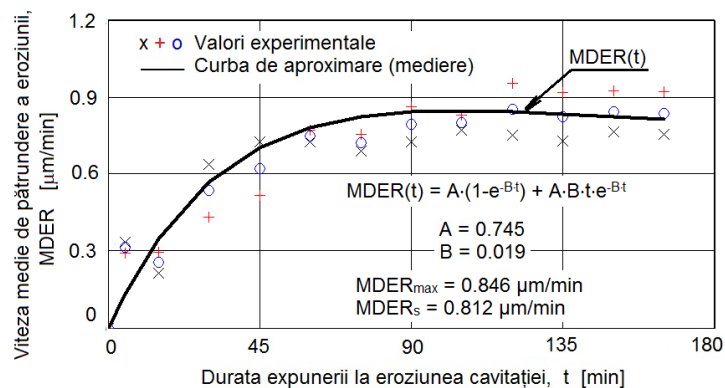


Fig. 3.3 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

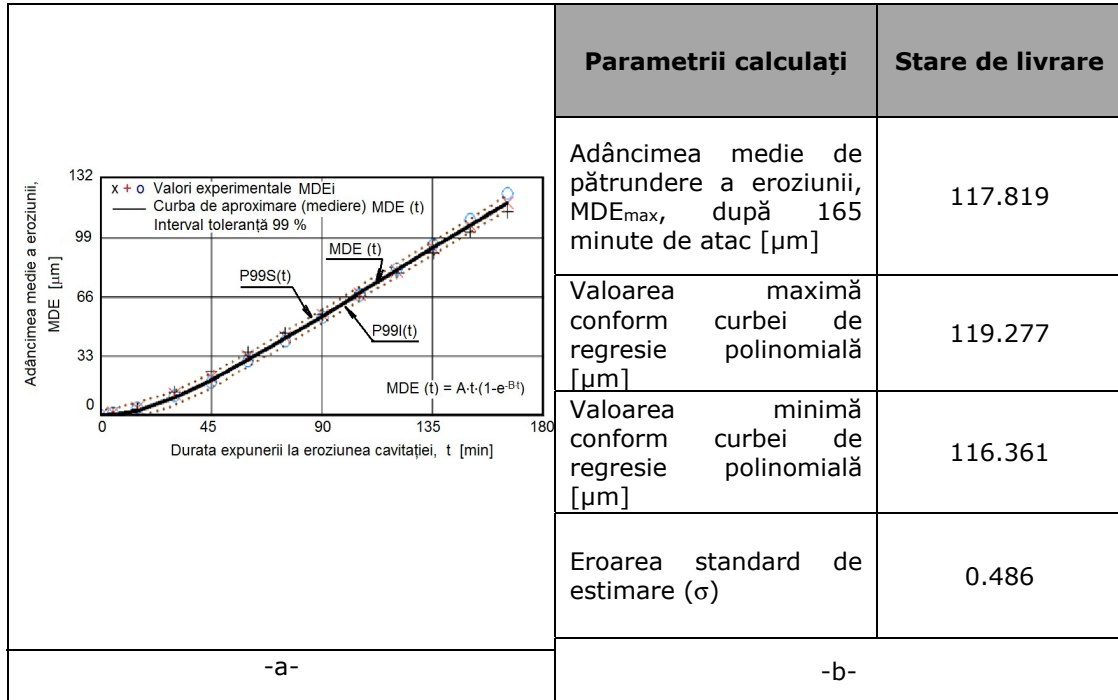


Fig. 3.4 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Din fig.3.2 rezultă o dispersie aproximativ simetrică a valorilor experimentale față de curba de mediere, în timp ce în fig 3.3 această simetrie se remarcă doar pe zona de stabilizare, după 120 minute de expunere la cavitație. Din experiența noastră apreciem că diferențele dintre valorile experimentale, care duc la acest tip de dispersie, sunt datorate constituției structurale eterogene formată din soluția solidă  $\alpha$  și compusul electronic  $\beta'$ , care este fragil [73] și care, prin dimensiunile diferite ale grăunților, este cea în care se inițiază distrugerea și care este expulzată de forța de impact a microjeturilor (vezi fig.3.7. și imaginile SEM din subcapitolul 3.1.1.2.3 ), rezultate la implozia bulelor cavitaționale. În același timp, în considerentul că rezistența la rupere și limita de curgere sunt de același ordin, în materialul celor trei probe testate, dispersia este cauzată de duritate, principala proprietate mecanică cu efect asupra rezistenței alamei [39, 40], [41, 42], [46-49], [81] la șocurile de impact cu microjeturile și undele de soc, care nu are aceeași valoare în suprafața cavitată (*valoarea menționată în subcapitolul 2.8, este medie a 8 măsurători realizate pe suprafața expusă la cavitație*),

După evoluția curbei de aproximare  $MDE(t)$ , fig, 3, fără o scădere semnificativă, după atingerea valorii maxime la circa 90 minute de cavitație, conform rezultatelor obținute până acum în laborator [9], [45], [55, 56], [79], [89], se poate afirma că alama are o comportare specifică materialelor cu structuri aproximativ uniforme și cu proprietăți mecanice care o clasează în topul materialelor ce pot fi folosite la piese cu solicitări cavitaționale de mică intensitate (cum sunt scaunele ventilelor supapelor de presiune și robinetelor), a căror rezistență la eroziunea cavitației poate fi îmbunătățită prin tehnologii adecvate de ingineria suprafețelor

### 3.1.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

#### 3.1.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

Pentru a ilustra modul de extindere a eroziunii cavitației vibratoare, în aria suprafeței expuse, dar și în profunzime, în fig.3.5 sunt date imagini macro (doar pentru una dintre probe – Proba 3- pozate cu aparatul foto CANON de mare rezoluție, la 5 timpi caracteristici, dați de evoluția curbei MDER(t), fig.3. Aceste imagini, comparate cu cea de la minutul 0 (zero) - înainte de începerea testului - sunt dovada intensității distructive a cavitației vibratoare, dezvoltată de aparatul cu cristale piezoceramice, al Laboratorului de Cavitație.

În fig.3.6 sunt date doar imagini macro, de la finalul testului, pentru cele trei seturi de probe testate, care arată modul identic de degradare, dar și dovada ca testele au fost realizate în condiții identice și de exigență.

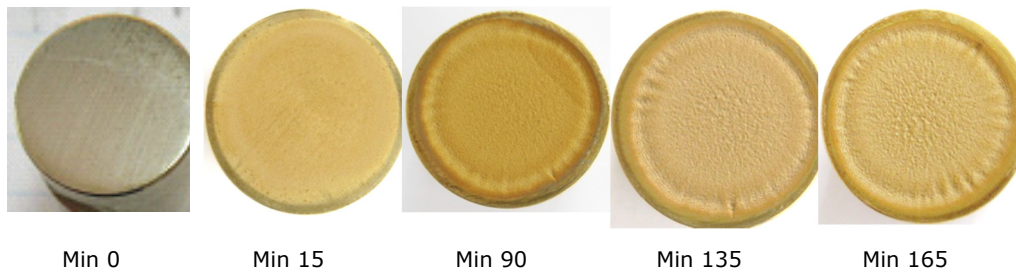


Fig. 3.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)



Fig. 3.6 Imagini macro (înregistrări cu aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

Imaginile din fig.3.5 arată că în primele 15 minute eroziunea cavitației debutează cu un inel, format spre periferia suprafeței expuse la cavitație. Explicația constă în modul de formare a norului cavitațional (vezi fig.3.1), care produce deformații și caverne pe această zonă inelară, iar spre interiorul suprafeței probei sunt eliminate vârful rugozităților cu generarea de rețele de fisuri, fără caverne vizibile în aceste imagini.

Pe măsură ce durata cavitației crește, la 90 minute, pe suprafața inelară se formează caverne stelare, ale căror adâncimi cresc, simultan cu producere de pittinguri/ciupituri în toată suprafața. Această explicație este legată și de creșterea vitezei de eroziune, care atinge un maxim  $MDER_{max} = 0.846 \mu\text{m}/\text{min}$  (vezi fig.3.3).

În intervalul 90-135 minute, cavernele stelare își măresc dimensiunea în plan și adâncime, pittingurile din interiorul suprafeței devin tot mai proeminente, însă, datorită gazului care pătrunde în acestea, în faza de alungire a probei, face ca viteza

să scadă. Fenomenul este explicat de evoluția curbei de aproximare  $MDER(t)$ , care își modifică forma tinzând spre valoarea de stabilizare.

Până la finalul testului energia dezvoltată de norul cavitațional pe suprafața probei, prin microjeturi și undele de soc, duce la un mecanism constant de deformare, fisurare și expulzare grăunți, care face ca viteza de pătrundere a eroziunii,  $MDER_i$ , să fie aproximativ constantă, iar curba de aproximare să scadă ușor spre valoarea de stabilizare  $MDER_s = 0.812 \mu\text{m}/\text{min}$ .

La finalul atacului, vezi și fig.3.6, dimensiunile cavernelor cresc, iar rețeaua de fisuri se extinde atât în aria suprafeței cât și în profunzime, cu expulzări de grăunți. Acest lucru se vede în imaginile micro, fig.3.7 (dar și în imaginile SEM de la subcapitolul 3.1.1.2.3), obținute la microscopul electronic cu baleiaj, unde se vede cum sunt îndepărtați grăunții de fază  $\beta'$  și cum sunt propagate fisurile.

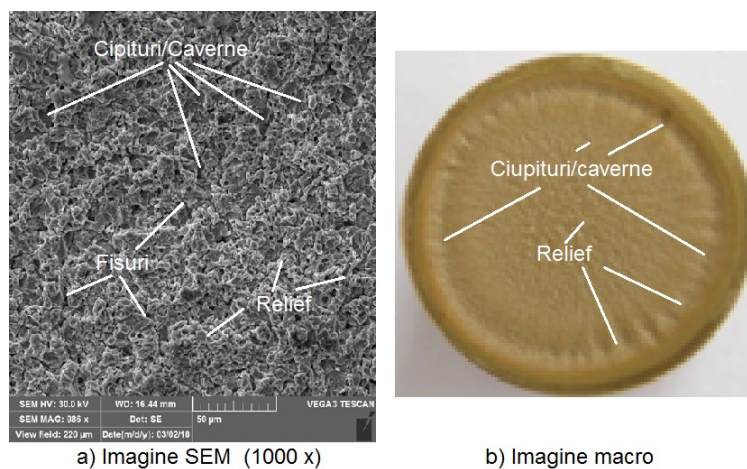


Fig. 3.7 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (imagini din zona interioară a suprafeței cavități)

### 3.1.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

Imaginile macro din fig. 3.5 și 3.6 și imaginea SEM din fig.3.7 arată că eroziunea produsă de cavitația vibratoare în structura suprafețelor probelor generează o profilogramă asemănătoare suprafețelor foarte rugoase, de tipul buretelui spongios. Prin urmare, aprecierea distrugerii acestor suprafețe poate fi realizată și prin valorile parametrilor rugozității,  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ .

În acest subcapitol se certifică faptul că parametrii rugozității pot fi utilizați în aprecierea comportării și rezistenței suprafețelor la eroziunea cavitației. Totodată se stabilește care dintre cei trei parametri,  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ , este cel mai indicat a se utiliza în estimarea comportării/rezistenței unei suprafețe la eroziunea generată prin cavitație. Pentru aceasta, după finalizarea testului de cavitație (după 165 minute de expunere), la sediul firmei SC Inteliform SRL din Timișoara, cu rugozimetrul Mitutoyo SJ 201 P s-au efectuat măsurători de rugozitate pe suprafețele erodate ale celor trei seturi de probe. Modul de măsurare este exemplificat prin schema din fig.3.8.

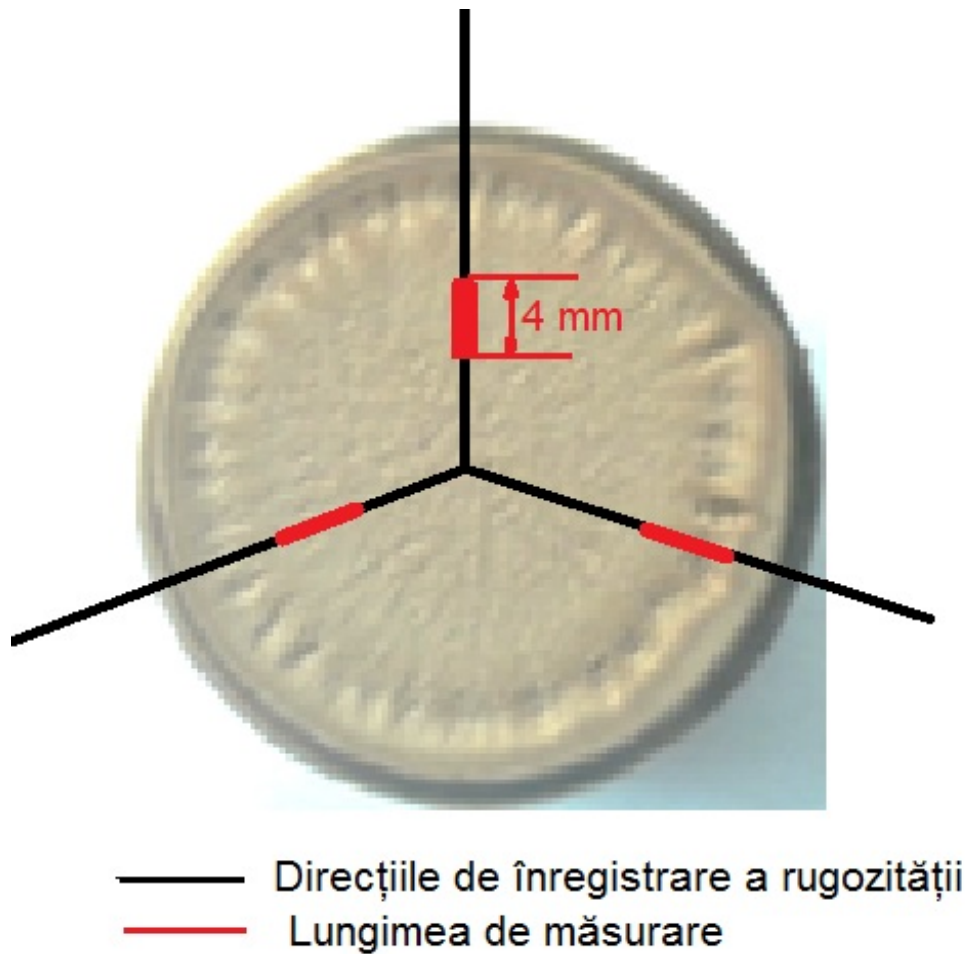


Fig. 3.8 Schema de înregistrare a parametrilor rugozității

Pentru una din aceste seturi de probe, notată ca PROBA 3, măsurarea rugozității s-a realizat și la trei timpi intermediari ( min 15, min 90, min 135) , în scopul susmenționat, de a stabili care dintre cei trei parametrii,  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ , este cel mai potrivit pentru a fi utilizat, în viitor, ca parametru al estimării rezistenței la eroziunea cavitației.

În fig.3.9, cu titlul exemplificativ, sunt afișate valorile celor trei parametri ai rugozității redată și profilograme aferente înregistrate pe lungimile de 4 mm, care pun cel mai bine în evidență evoluțiile cavernelor în structura materialului.

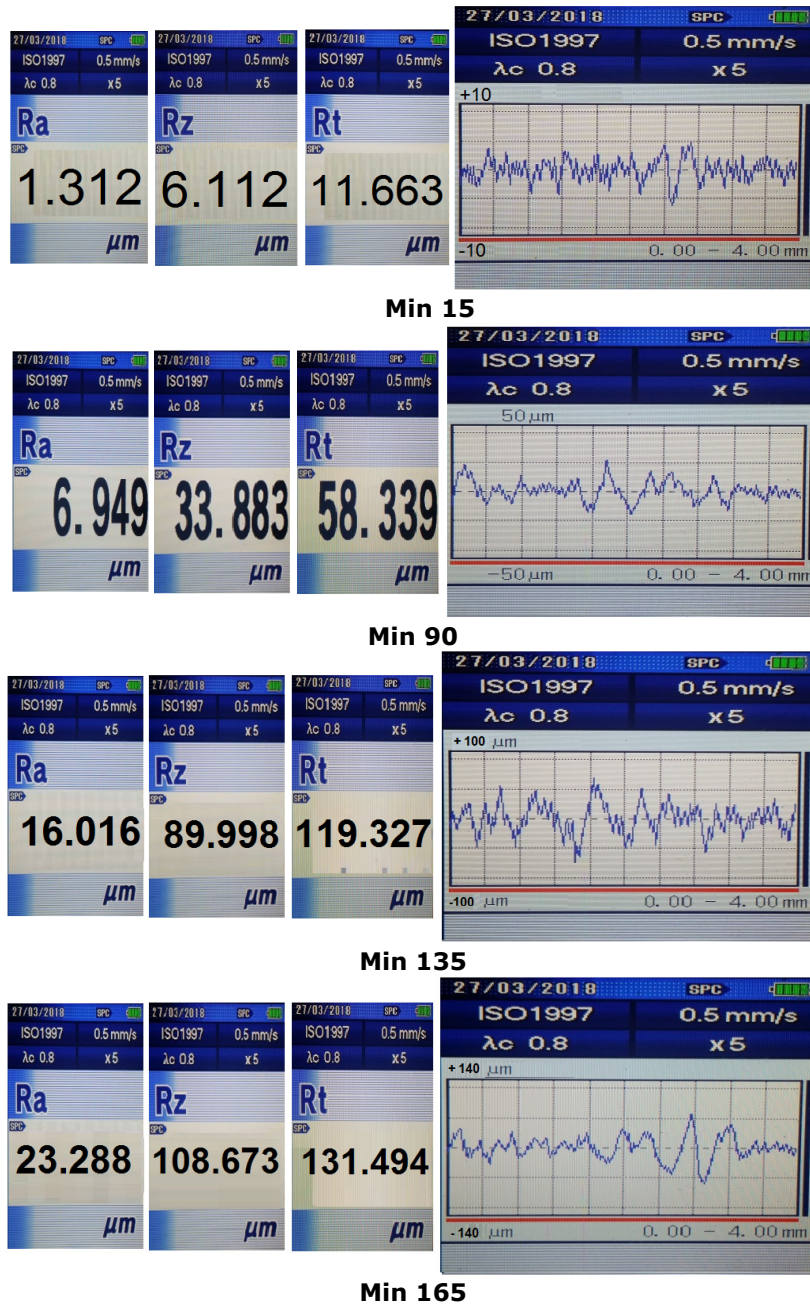


Fig. 3.9 Parametrii rugozității suprafeței, rezultate prin eroziunea cavitației, măsurate cu aparatul Mitotoyo la timpi caracteristici (Proba 3)

Comparativ cu imaginile obținute prin fotografiere (vezi fig.3.5 și 3.6), dar mai ales cu cele obținute prin microscopie (vezi fig.3.7 și imaginile SEM de la subcapitolul 3.1.1.2.3) se constată că evoluțiile profilogramelor, ca și ale valorilor

parametrilor, sunt în concordanță, cu comportarea probelor, exprimată de evoluțiile curbelor MDER(t), fig.3.3, și cu evoluția gradului de degradare al suprafeței, sub acțiunea microjeturilor și undelor de șoc, generate prin mecanismul cavitației vibratoare.

Diferențele dintre valorile celor trei parametri ai rugozității, afișate în fig. 3.10, înregistrate la finalul testului de cavitație (după 165 minute), pe cele trei direcții dispuse aproximativ la 120°, arată complexitatea mecanismului cavitației, atât din punct de vedere hidrodinamic, cât și mecanic (ca răspuns al materialului la forțele de impact cu microjeturile și undele de șoc).

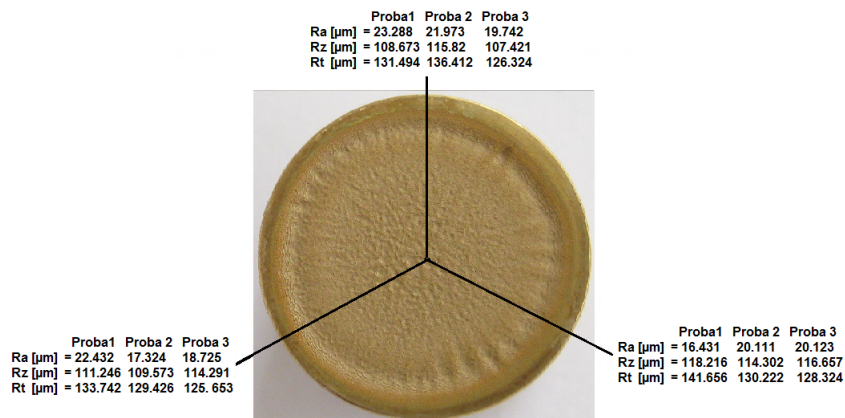


Fig. 3.10 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație)

Figurile 3.11 și 3.12 arată că, pe parcursul expunerii la cavitație, similar adâncimii medii de eroziune, cumulată, valorile parametrilor rugozității cresc. Acest aspect este în concordanță cu mecanismul degradării suprafețelor sub solicitările ciclice ale microjeturilor produse la implozia bulelor de cavitație.

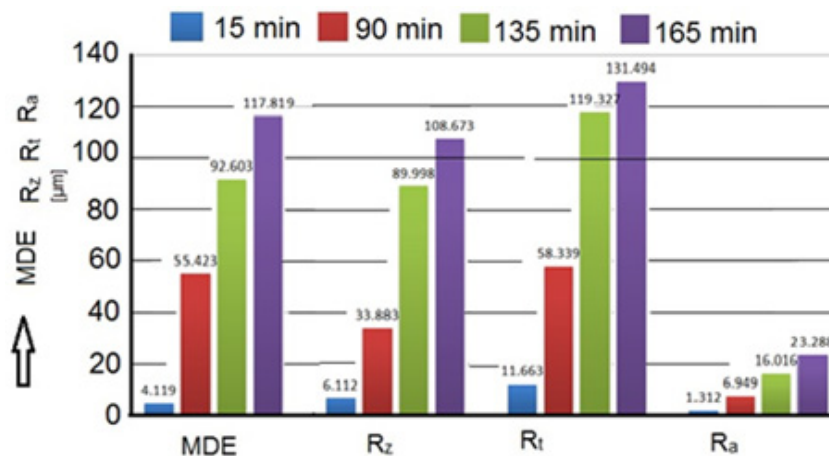


Fig. 3.11 Histograma de comparație a evoluției adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu cei ai rugozității, cu durata expunerii la cavitația vibratoare (Proba 3)

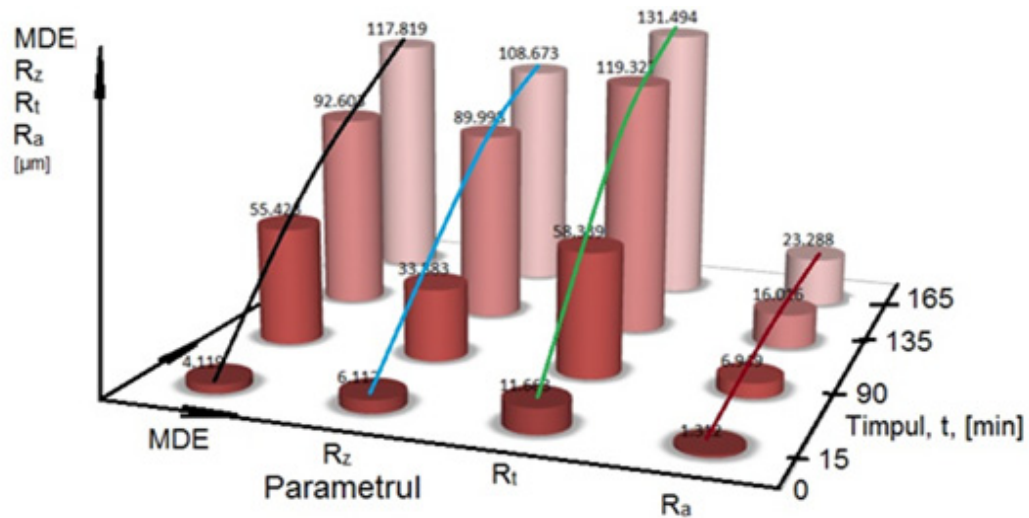


Fig.3.12 Variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii și a parametrilor rugozității cu durata expunerii la cavitație (Proba 3)

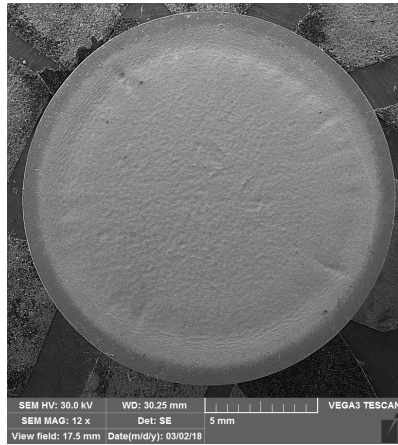
Se observă că, dintre cei trei parametri,  $R_z$  este cel mai apropiat, ca valoare, de adâncimea medie de eroziune cumulată. Diferențele, firești, care există între valorile lui MDE și  $R_z$  sunt datorate faptului, că unele sunt calculate pe o arie (MDE este raportat la aria suprafeței expuse cu diametrul de 15.8 mm), iar celălalt este o mărime medie reală pe o lungime de 4 mm. Cu certitudine, dacă aria cavitată ar fi baleiată pe un număr însemnat de linii de 4 mm, în diferite zone, diferențele dintre valorile celor doi parametri se vor reduce substanțial.

Prin urmare, în baza celor expuse mai sus, consider că cel mai indicat parametru al rugozității unei suprafețe erodate de cavitație, este  $R_z$ .

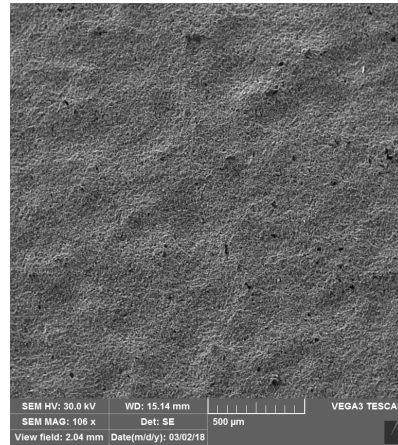
### 3.1.2.3 Morfologia structurii erodate

Analiza morfologica a structurii erodate este realizată pe baza imaginilor obținute la microscopul electronic cu baleiaj tip Vega 3 Tescan, din cadrul Laboratorului de Știința Materialelor.

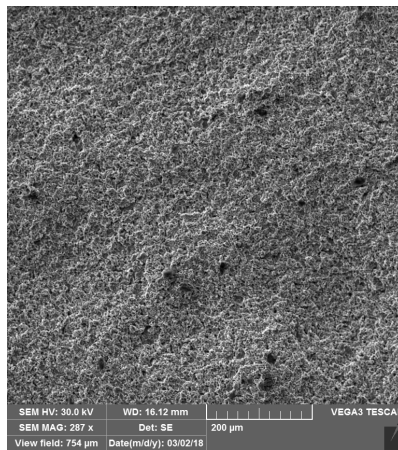




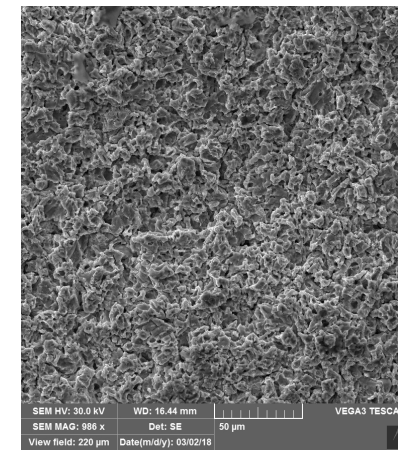
-a-



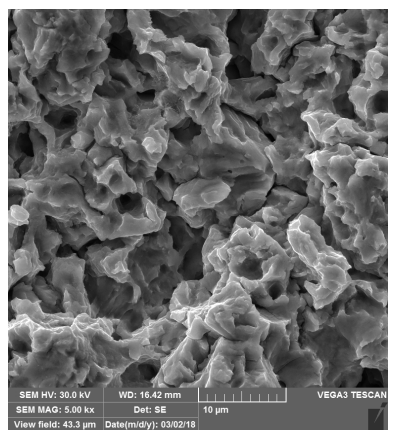
-b-



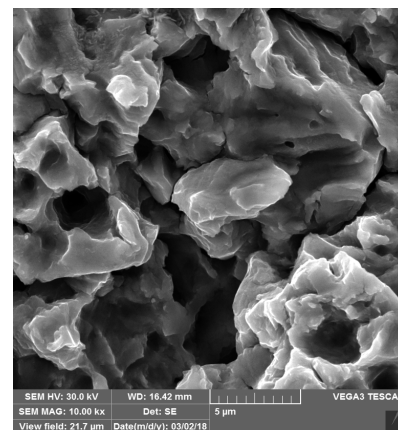
-c-



-d-



-e-



-f-

Fig. 3.13 Imagini SEM ale suprafețelor probelor testate la cavitație timp de 165 min

Caracterul distinct al suprafeței erodate prin cavitație este determinat de existența unor cavități cu o formă neregulată rezultată în urma expulzării compusului electronic CuZn, (faza  $\beta'$ ) caracterizat prin duritate și fragilitate pronunțată. De asemenea, o altă parte din cavități este cauzată de incluziunile de Pb din interiorul unor grăunți de soluție solidă a de substituție a Zn în Cu.

### 3.2 Rezultatele cercetării la cavitație a bronzului CuSn12-C

Bronzul CuSn12-C, cercetat în cadrul prezentei teze, cupă cum s-a precizat în subcapitolul 2.1, s-a ales pe considerentul că face parte din categoria bronzurilor dure, cu bune proprietăți de întrebuințare precum: rezistență la acțiunea corozivă a apei, la oboseală și uzură, dar și capacitate de durificare prin ecruisare, care sunt esențiale pentru structurile materialelor solicitate la cavitație [9], [13], [39, 40], [79], [27], [30], [33], [39, 40], [57], [105]. Obişnuit, acest bronz este folosit pentru foarte multe componente din sistemele hidraulice, unele, funcționând în curenți cavitaționali, unde eroziunea determină scoaterea din uz și impune folosirea unor tehnologii care să le mărească durata de viață. Astfel de componente sunt: elicele vapoarelor exploatare în ape dulci [103], [109], scaunele, sertarele/cepurile și corpurile de robinete și vane [9], [79], [89].

În cadrul acestui subcapitol este prezentată și analizată comportarea și rezistența la eroziunea produsă de cavitația vibratoare a probelor prelevate din bare cilindrice, fără tratament termic, cu diametrul de 20 mm, primite de la Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați.

Pentru identificare, probele și toate referirile la rezultatele din acest subcapitol, ca și la alamă, poartă sintagma de **STARE DE LIVRARE**, utilizată cu precădere în capitolul 4, unde se analizează comportarea structurii rezultate în urma aplicării unor tratamente termice volumice.

Deoarece în subcapitolul 2.1 sunt prezentate toate datele ce definesc acest bronz (compoziție, structură, proprietăți mecanice și fizice), nu vor mai fi, din nou, enumerate.

Similar, programului de cercetare și analiză prezentat mai sus, la alama CuZn39Pb3, și aici, rezultatele cercetării experimentale, pe baza cărora se analizează comportarea și rezistența la eroziunea cavitației vibratoare, sunt prezentate prin valorile experimentale  $MDE_i$ ,  $MDER_i$ , curbele specifice de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , parametrii caracteristici eroziunii, imagini macro- și microscopice, obținute prin fotografiere cu aparatul foto Canon, respectiv la microscopul optic și electronic, precum și profilogramele caracteristice rugozității suprafeței degradate prin solicitările ciclice, de șoc, ale microjeturilor cavitaționale.

#### 3.2.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig.3.14 și fig.3.15 sunt date diagramele specifice cu valorile experimentale, înregistrate pe cele trei probe testate, ale adâncimii medii cumulate de eroziune  $MDE_i$ , cu valorile experimentale ale vitezelor medii de pătrundere a eroziunii,  $MDER_i$ , precum și curbele de aproximare, respectiv mediere a acestor valori,  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , construite analitic cu relațiile (3.4) și (3.5).

Similar diagramelor din fig.3.2 și 3.3, de la cercetarea alamei CuZn39Pb3, în diagrama din fig.3.14 este dată și valoarea cumulată medie maximă a adâncimii de eroziune  $MDE_{max}$  (calculată după finalizarea atacului-165 minute de expunere), iar în fig.3.15 sunt date valorile înregistrate de curba  $MDER(t)$ , maximă,  $MDER_{max}$  și cea de stabilizare,  $MDER_s$  (de la finalul atacului), spre care această curbă scade asimptotic.

Fig.3.16 reprezintă expresia acurateții drulării testelor de cavitație pe cele trei probe, dată de banda de dispersie, corespunzătoare unui interval de toleranță de 99 %, iar în tabelul atașat sunt valorile statistice de referință. Se observă că și în acest caz, după valoarea abaterii standard  $\sigma = 0,473$ , la testarea celor trei probe, s-au respectat procedurile, descrise la începutul capitolului și în subcapitolul 2.2, iar parametrii aparatului vibrator, care au determinat intensitatea distructivă a cavitației, au fost foarte bine controlați.

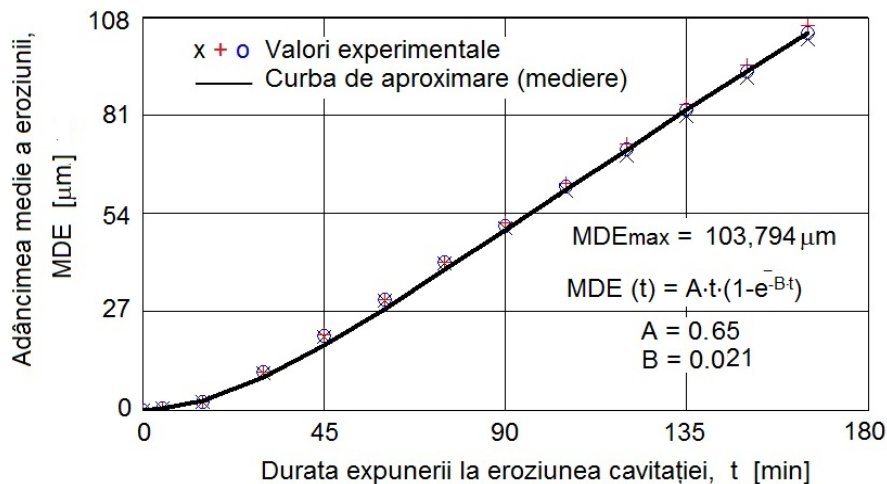


Fig. 3.14 Evoluția adâncimii medii cumulate de eroziune cu durata cavitației

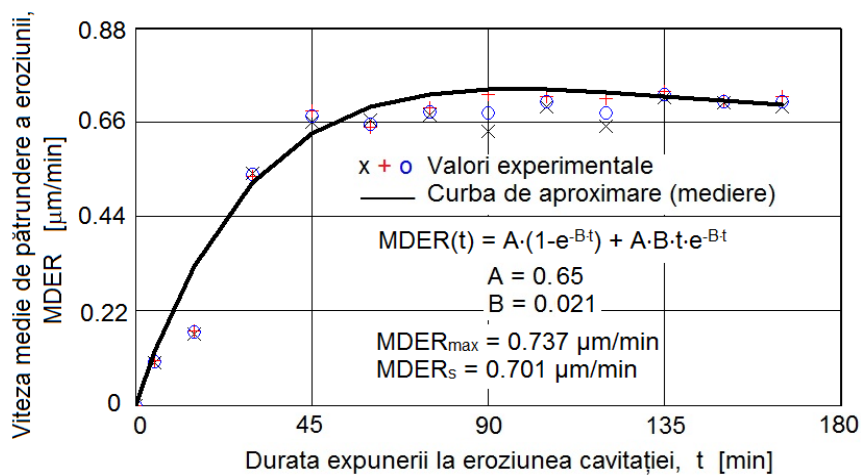


Fig. 3.15 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

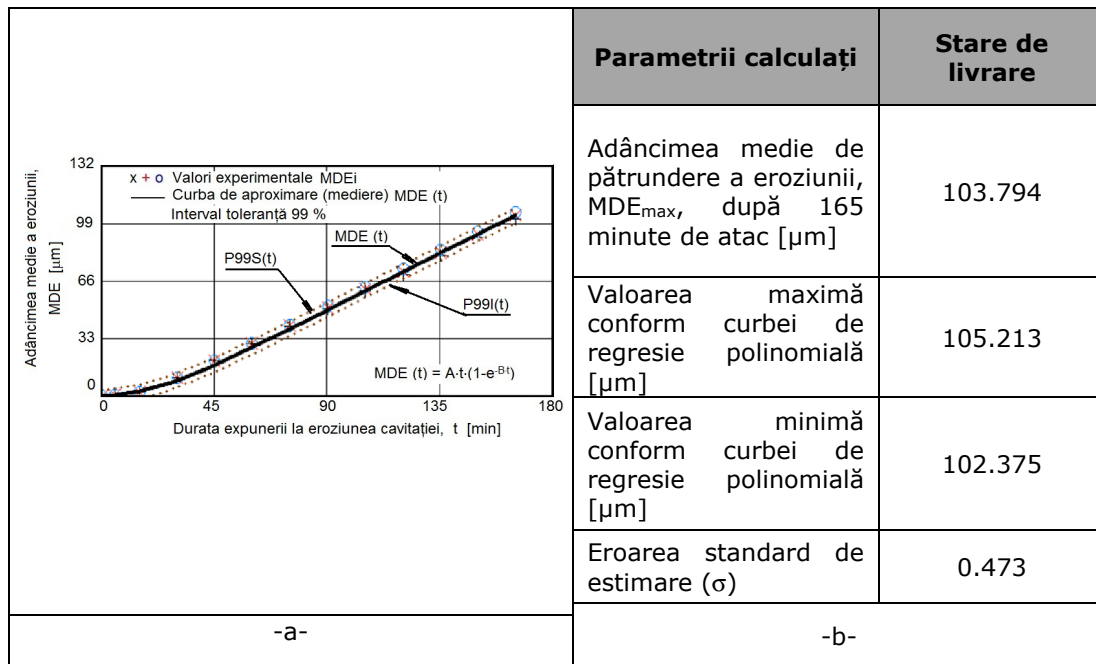


Fig. 3.16 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Dispersia punctelor experimentale și evoluțiile curbelor  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , din fig.3.14 și 3.15, arată următoarele aspecte:

- 1- din punct de vedere al evoluției adâncimii medii cumulate de eroziune, cele trei probe testate sugerează comportamente și rezistențe similare, firesc având în vedere că probele au fost prelevate din aceeași bară cilindrică;
- 2- din punct de vedere al vitezelor de eroziune, aferente perioadelor de testare se evidențiază ușoare diferențe, pe intervalul 90 -120 minute, imediat după înregistrarea valorii maxime  $MDER_{max} = 0,737 \mu\text{m}/\text{min}$ . Acest aspect, este, de asemenea firesc, cauza fiind în modul de rupere a legăturii dintre grăunți, dar și a constituentului structural dur  $\delta$ , care, în această perioadă, determină rezistențe diferite la impactul cu microjeturile cavitaționale și undele de șoc. Totodată, explicația poate fi pusă și pe seama gazului acumulat în cavernele formate deja în intervalul 0-90 minute de atac al cavitației. Evoluțiile aproape identice, pe restul intervalelor de atac al cavitației (0-90 minute și 120-165 minute) arată că structura bifazică formată din grăunți de soluție solidă  $\alpha$  și grăunți de eutectoid ( $\alpha + \delta$ ) a fost una relativ omogenă în suprafețele celor trei probe testate;
- 3- tendința de ușoară scădere a vitezei de eroziune  $MDER$ , la valoarea de stabilizare  $MDER_s = 0,701 \mu\text{m}/\text{min}$ , din cercetările efectuate anterior [8], [13], [55, 56], sugerează un comportament specific materialelor cu proprietăți mecanice  $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  și duritate (principala proprietate mecanică care influențează rezistența la eroziunea cavitației [41], [48, 49]) uniforme distribuite în suprafața cavitată, care sunt utilizate, cu precădere, la piese aflate în curgeri cavitaționale cu slabă intensitate (vane, robineti, zone cu puternică deviație a curgerii (coturi, teuri) [61], [79].

### 3.2.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

Pentru evidențierea evoluției distrugerilor generate de eroziunea cavitației, în aria suprafeței, dar și în profunzimea sa structurală, ca și la alama CuZn39Pb3, sunt folosite imagini obținute prin fotografiere cu aparatul Canon și la microscopul electronic, precum și profilograme ale rugozității din diverse zone ale suprafeței erodate.

#### 3.2.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației

Modul de degradare a structurii suprafețelor, prin generarea de fisuri, ciupituri/pittinguri și caverne, cu mici diferențe față de cel specific alamei CuZn39Pb3, în timpul expunerii la cavitația vibratoare, este sugerat de imaginile obținute prin fotografiere cu aparatul Canon, din fig.3.17 și 3.18, respectiv imaginea microscopică din fig.3.19.

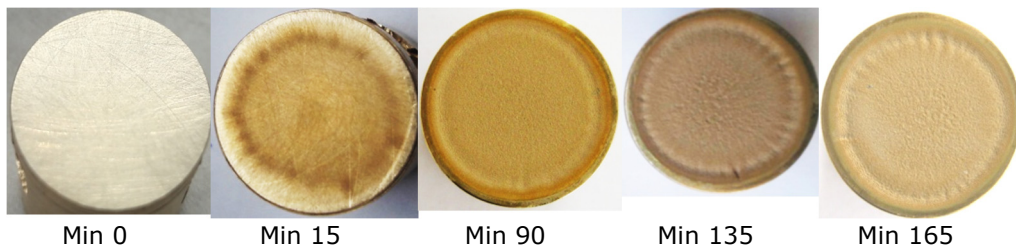


Fig. 3.17 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 2)



Fig. 3.18 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

Imaginile din fig.3.17 explică evoluția curbei MDER (t), fig. 3.15, dar și dispersiile punctelor experimentale față de această curbă. Luând doar imaginile înregistrate pe proba 2 și pe baza altor constatări descrise prin lucrările și tezele de doctorat, derulate în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [9], [13]], se concluzionează:

1 - în primele 15 minute, după eliminarea vârfului asperităților și prafului abraziv (care de obicei se elimină rapid în primele 5-10 minute [9]) se generează o puternică rețea de fisuri în structura suprafeței (suprafața se mătuiește), cu ciupituri și mici caverne, pe un inel periferic;

2 - în perioada 15-90 minute, dimensiunile cavernelor cresc, fisurile pătrund în profunzimea materialului suprafeței și sunt eliminate părți mari de componente structurale, în special componenta mai slabă (din soluția solidă  $\alpha$ ), ducând la realizarea unui maxim al vitezei de eroziune  $MDER_{max}$ , vezi fig.3.15. În acest interval craterele formate în inelul periferic se adâncesc.

3 – după 90 minute, până la finalul testului (165 minute), eroziunea se extinde doar în profunzime, însă cu viteze aproximativ constante, ușor mai mici decât valoarea de maxim, datorită gazului care pătrunde în cavernele formate și care acționează ca un amortizor la presiunile de impact ale microjeturilor și undelor de șoc, generate prin mecanismul cavitației vibratoare, la oscilația probei în apă, cu frecvența de 20 KHz, prin alungirea și comprimarea sistemului mecanic vibrator.

Imaginile fotografice de la finalul testului, din fig.3.18, sunt dovada comportării similare a celor trei probe, la eroziunea generată de atacul cavitației vibratoare.

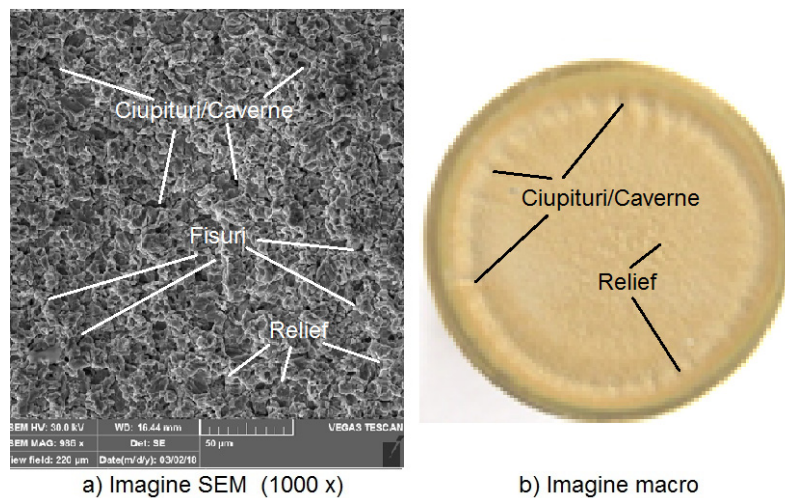
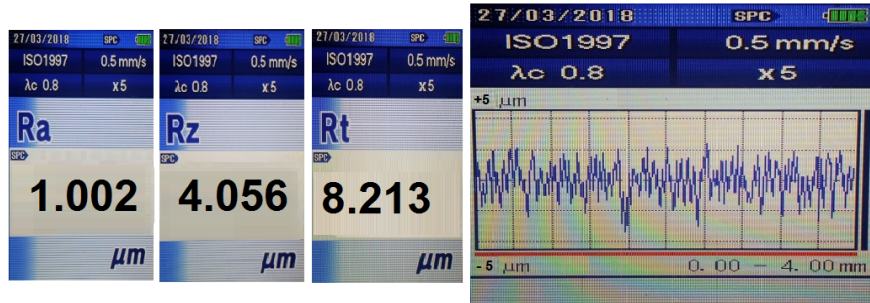


Fig. 3.19 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (imagini din zona interioară a suprafeței cavități)

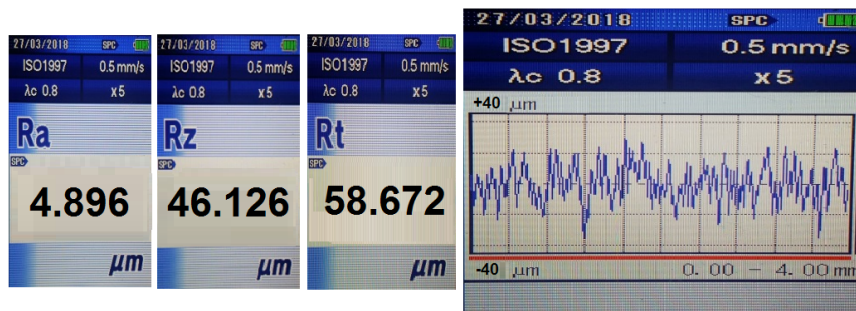
Imaginea SEM din fig.3.19a, corelată cu imaginea macro, din fig.3.19b, arată extinderea rețelei de fisuri și cum sunt realizate ciupiturile și cavernele, prin îndepărtare, prin unirea acestor fisuri, datorită solicitărilor ciclice ale suprafeței de către microjeturi și undele de șoc, specifice mecanismului de oboseală, dând, astfel, un aspect de suprafață spongioasă, puternic rugoasă.

### 3.2.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

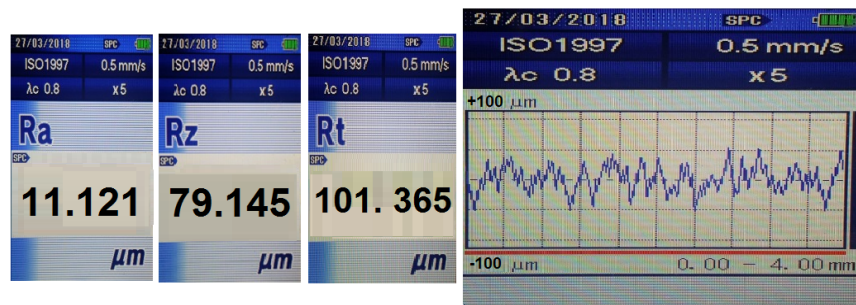
În fig.3.20 se prezintă profilogramele rugozității, cu valorile parametrilor  $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ , obținuți prin măsurătorile realizate cu rugozimetrul Mitutoyo SJ 201 P, la cei patru timpi considerați sugestivi pentru modul de comportare a suprafeței la cavitația vibratoare.



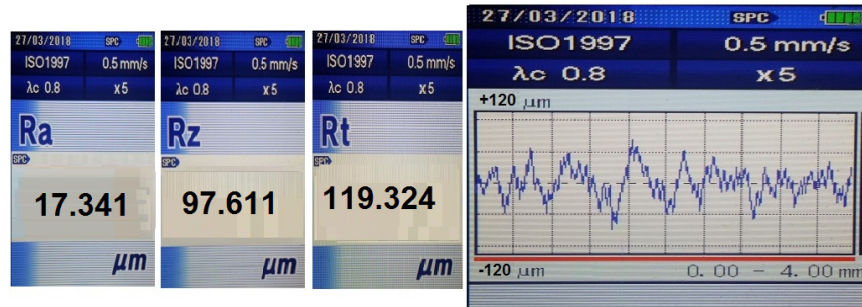
min 15



min 90



min135



Min 165

Fig. 3.20 Parametrii rugozității suprafeței, rezultate prin eroziunea cavitației, măsurați cu aparatul Mitutoyo la timpi caracteristici (Proba 2)

Procedura de măsurare este identică cu cea descrisă la paragraful 3.1.1.2.2. Și aceste măsurători de rugozitate sunt realizate tot la sediul firmei Sc. Intelifiorm SRL din Timișoara.

Profilogramele din fig.3.20 arată foarte bine cum presiunile produse la impactul suprafeței cu microjeturile sau undele de șoc, provoacă ruperi în adâncime și cum prin deformațiile elasto-plactice se rup vârfurile de material dintre caverne, generând această formă rugoasă. Tot odată, după cum se vede, creșterea duratei de expunere la cavitație, determină creșterea valorilor parametrilor rugozității.

În fig.3.21 sunt afișate valorile celor trei parametri ai rugozității, înregistrate pe cele trei direcții dispuse la aproximativ  $120^{\circ}$ , ale căror diferențe arată complexitatea fenomenului de distrugere prin cavitație și explică comportarea mecanică a structurii suprafeței, în diverse zone, la solicitările hidrodinamice ale cavitației. Aceste diferențe de valori sunt răspunsul respectiv rezistența celor doi constituenți structurali ( $\alpha$  și  $\delta$ ) la presiunile de impact ale microjeturilor sau undelor de șoc, precum și dependența distrugerii de locul de impact (la granița dintre grăunți sau într-unul dintre grăunții  $\alpha$  și  $\delta$ ).

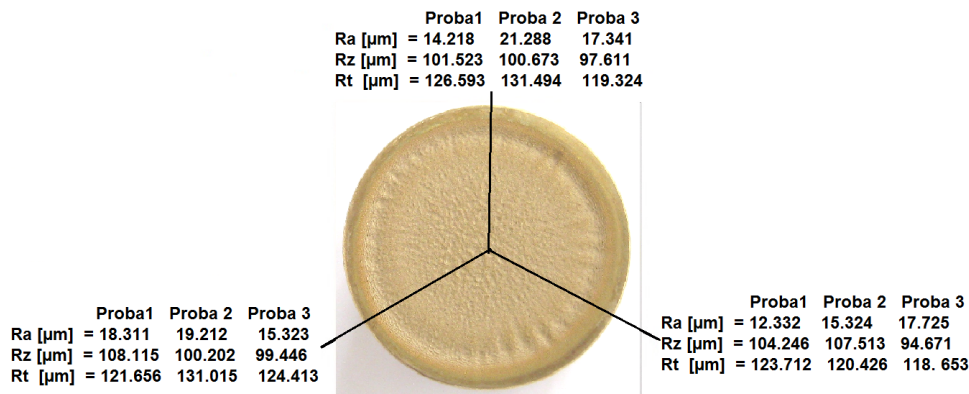


Fig. 3.21 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.20 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (165 minute de expunere la cavitație)

În fig.3.22 și 3.23 sunt histogramele de comparație a variațiilor celor trei parametri ai rugozității cu adâncimea medie cumulată a eroziunii. Și în acest caz se poate observa că aceste tipuri de variații sunt similare cu ale alamei CuZn39Pb3, sugerând că pot fi luate în considerare ca modalități de estimare a comportării și rezistenței unui material/structuri la solicitările erozive ale cavitației, mai ales în situațiile în care există posibilitatea de realizare a unor astfel de determinări.

Ca și la alama CuZn39Pb3, se constată apropiere între valorile parametrului Rz și ale adâncimii medii cumulate de eroziune MDE, motiv pentru care reafirm că acest parametru este cel mai indicat în analiza rezistenței unei suprafețe la solicitarea distructivă a cavitației.



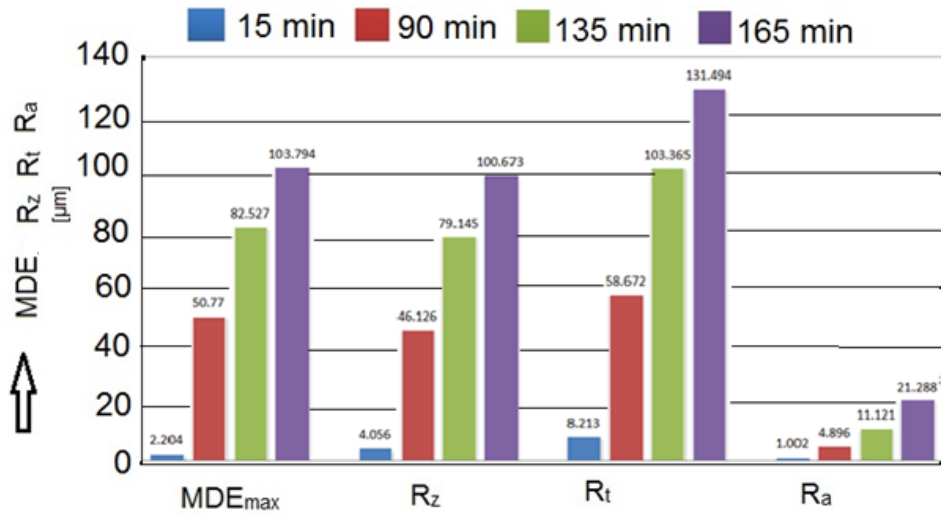


Fig. 3.22 Histograma de comparație a evoluției adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu cei ai rugozității, cu durata expunerii la cavitația vibratoare (Proba 3)

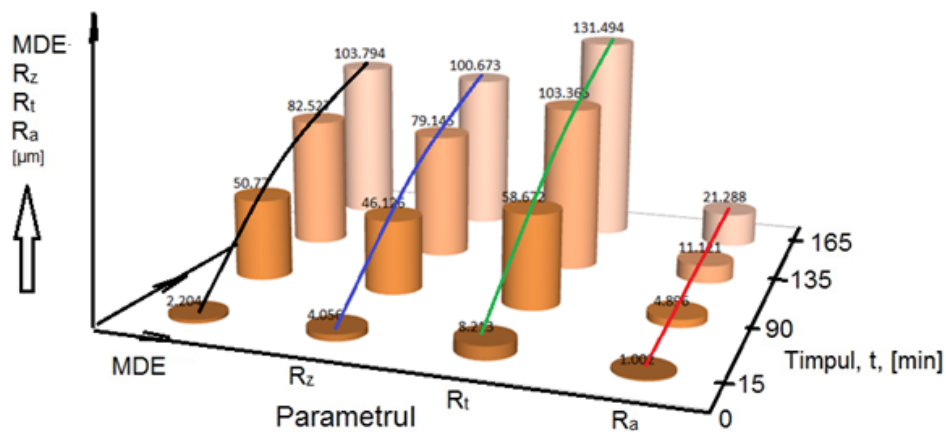


Fig. 3.23 Variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii și a parametrilor rugozității cu durata expunerii la cavitație (Proba 3)

### 3.2.2.3 Morfologia structurii erodate

Investigarea SEM a suprafeței testate la eroziune prin cavitație a bronzului considerat (fig.3.24) pune în evidență formarea de ciupituri uniforme în matricea de soluție solidă  $\alpha$  de substituție a Sn în Cu și de scobituri poligonale în fostele zone cu compus electronic  $\delta$  care are fragilitate ridicată.

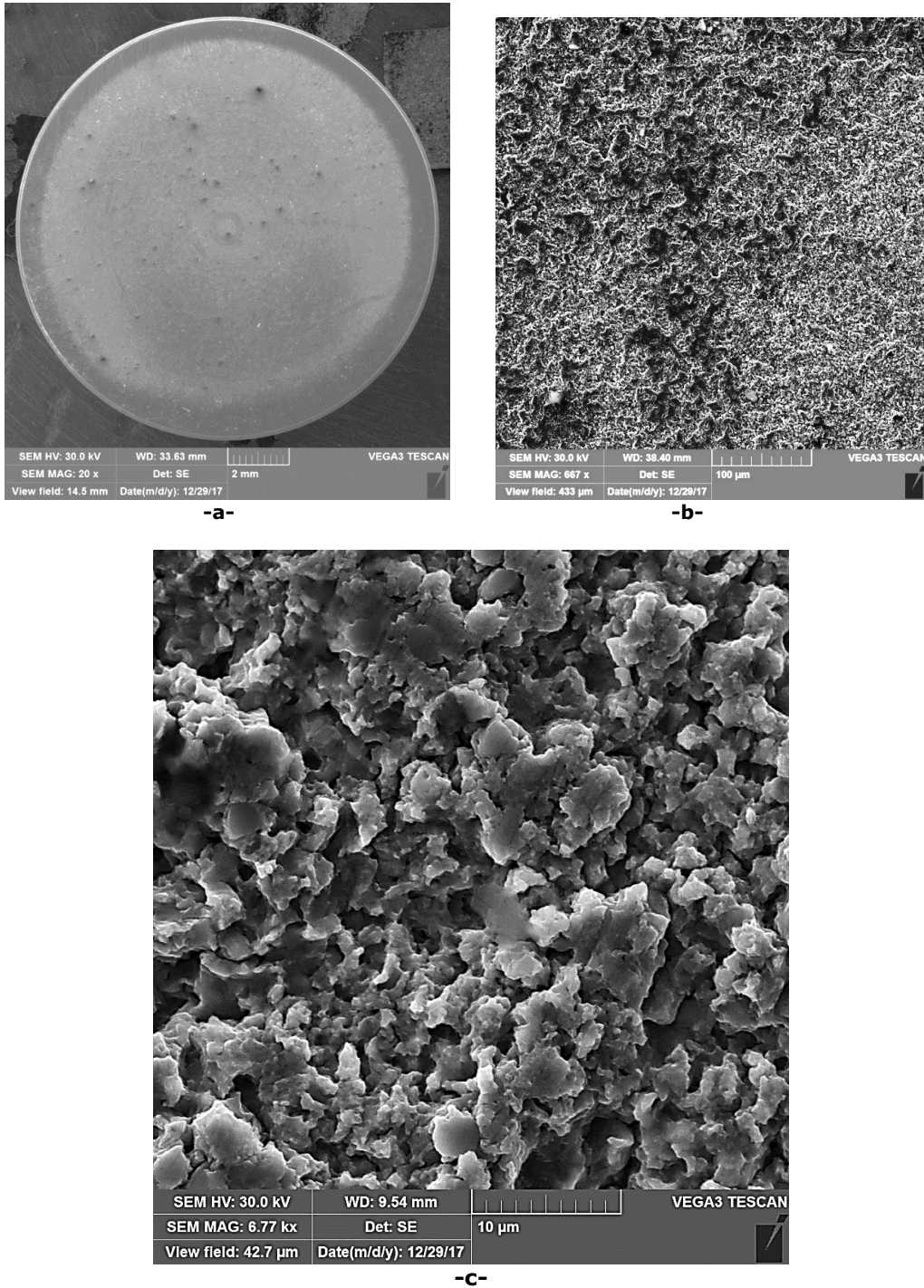


Fig. 3.24 Imagini SEM, ale topografiei suprafeței cavități a bronzului aflat în stare de livrare

### 3.3 Compararea rezultatelor cercetării

Diagramele din fig.3.25 și 3.26, prin curbele și valorile parametrilor conținuți, oferă date despre diferențele și asemănările comportamentelor și rezistențelor la cavitație ale celor două materiale prezentate în acest capitol.

Punctele din fig.3.25 și 3.26 sunt valori experimentale, medii aritmetice ale valorilor experimentale calculate cu relațiile (3.1), (3.2) și (3.3), pe cele trei probe din fiecare material, iar curbele sunt cele din fig.3.2, 3.3, 3.14 și 3.15, construite analitic cu relațiile prezentate în aceste figuri.

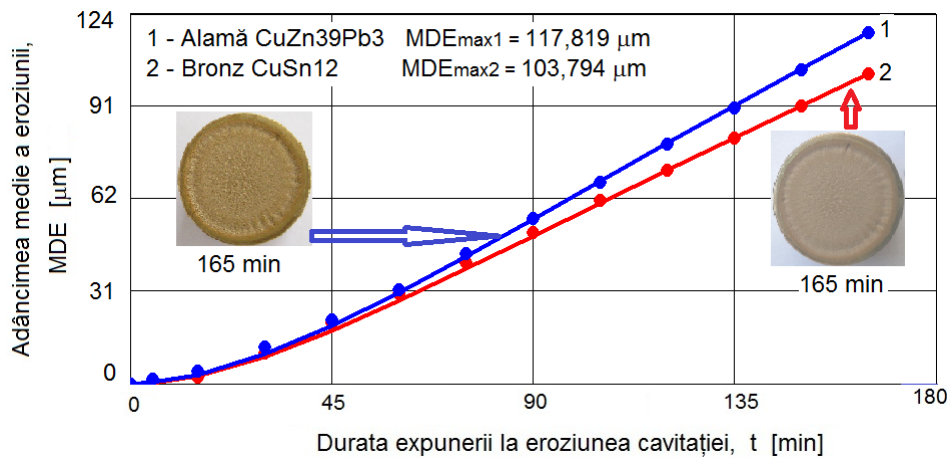


Fig. 3.25 Variația adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației (comparații)

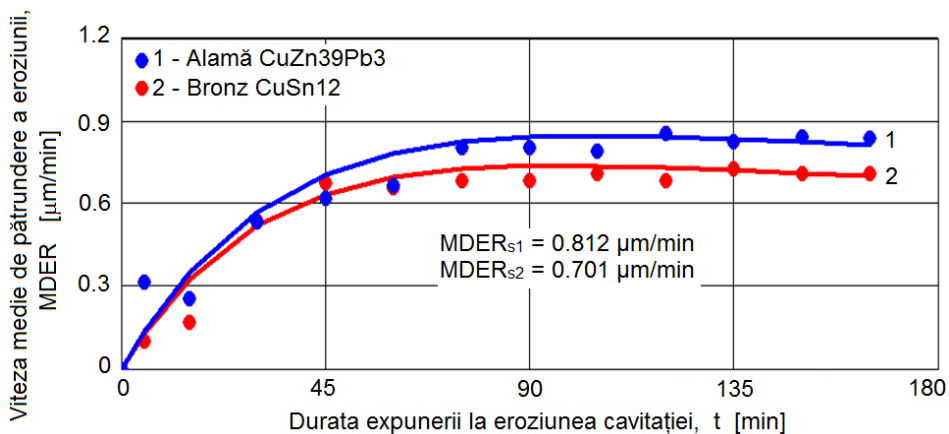


Fig. 3.26 Variația vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației (comparații)

Asemănări:

- evoluții exponențiale similare ale curbelor MDE(t), cu liniarizare începând cu minutul 45;

84 Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziune prin cavitație a unor aliaje

- evoluții similare ale curbelor  $MDER(t)$ , cu atingerea unor valori de maxim după 90 minute de atac al cavitației ( $MDER_{max} = 0,846 \mu\text{m}/\text{min}$  – pentru alamă, respectiv  $MDER_{max} = 0,737 \mu\text{m}/\text{min}$  - pentru bronz) și ușoară scădere (de 4 - 5 %) asimptotică spre valoarea finală de palier, stabilizare a vitezei de eroziune ( $MDER_s = 0,812 \mu\text{m}/\text{min}$  – pentru alamă, respectiv  $MDER_{max} = 0,701 \mu\text{m}/\text{min}$  - pentru bronz); Aceste evoluții similare sunt expresia comportării identice a suprafețelor probelor, la atacul cavitației, dar oferind rezistențe diferite;
- dispersii aproximativ identice ale valorilor experimentale, medii aritmetice pe cele trei probe, față de curbele de mediere  $MDER(t)$ , începând de la minutul 45 al expunerii la cavitație.

Diferențele sunt date de comportarea mai bună a bronzului CuSn12-C, lucru reliefat de histograma din fig.3.27, prin comparare parametrilor eroziunii (adâncimea medie cumulată de eroziune, după 165 minute de cavitație,  $MDE_{max}$  și rezistența la cavitație, definită prin  $R_{cav} = 1/MDER_s$ ) și prin compararea valorilor parametrului rugozității  $R_z$ .

Se constată că oricare dintre parametrii alamei au valori superioare parametrilor bronzului.

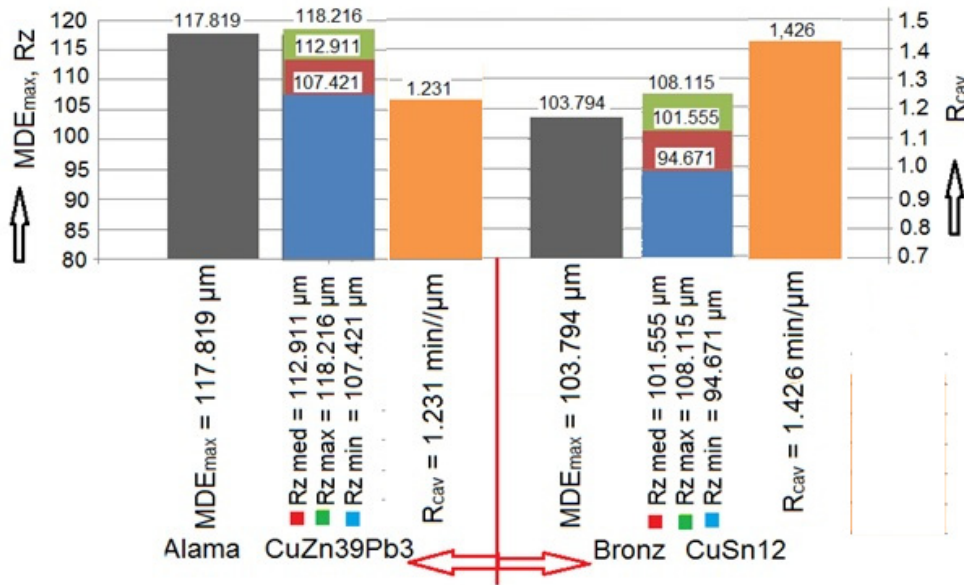


Fig. 3.27 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

În tabelul 3.1, sub formă procentuală, este dată scăderea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3, în raport cu a bronzului CuSn12-C. Se observă că această scădere nu diferă substanțial de la un parametru la altul, ea variind între 11 % și circa 16 %.

Tabelul 3.1 Compararea cu parametrilor specifici

Materialul de referință	Parametrul eroziunii cavitaționale	Variația față de parametrii bronzului [%]
		Alama CuZn39Pb3-stare livrată
Bronz Cu Sn12 - stare livrată	$MDE_{max}$ [ $\mu m$ ]	↑ 13.5
	$R_{cav} = 1/MDE_{s}$ [min/ $\mu m$ ]	↓ 15.8
	$R_{z\ med}$ [ $\mu m$ ]	↑ 11.2

↓- scădere ↑-creștere

Cercetările efectuate în cadrul laboratorului nostru, de peste 70 ani [1-3], [9], [13], sugerează că diferențele sub 15 %, între parametrii de eroziune, pot exista nu doar între materiale de calități diferite, ci și între probe din același material și sunt cauzate, în principal, de:

- diferențele dintre valorile proprietăților mecanice, care nu sunt constante ;
- neomogenitatea dispersiei durezzații în structura suprafeței expuse cavitației;
- gradul de finețe al structurii din suprafața cavitată și existența unor constituenți structurali care pot scădea rezistența la presiunile create de impactul cu microjeturile și undele de șoc.

Prin urmare apreciez că alama CuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C au comportamente și rezistențe la eroziunea cavitației ușor diferite, ambele fiind situate în domeniul materialelor cu slabă rezistență la cavitație atunci când se află în stare netratată termic, dar care se pot utiliza la piesele aflate în curenți cavitaționali cu intensitate scăzută (coturi, teuri, aparate de comandă și reglare a presiunii, aparate de control și reglare a debitului, echipamente ce lucrează cu fluide de vâscozitate net superioară apei).

### 3.4 Concluzii

1. Alama CuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C prezintă comportări specifice materialelor cu constituenți structurali repartizați uniform, dar având o rezistență mecanică scăzută, motiv pentru care, sub formele cercetate (stări de livrare), se pot fi folosi doar pentru piese ce funcționează în condiții hidrodinamice cu intensitate redusă a cavitației, cum sunt cele generate în aparatele hidraulice (supape de presiune, regulatoare de viteză și debit, robinete, etc.), care funcționează cu lichide cu vâscozitate superioară apei.
2. Inițierea și avansarea distrugerii, sub impactul cu microjeturile și undele de șoc, dezvoltate în procesul cavitațional, se realizează la granița dintre soluția solidă  $\alpha$  și compusul electronic  $\beta'$ , cu distrugere rapidă a fazei  $\beta'$ . - la alamă-respectiv în matricea de soluție solidă  $\alpha$  de substituție a Sn în Cu generând scobituri poligonale în fostele zone cu compus electronic  $\delta$  care are fragilitate ridicată.

3. Ambele materiale prezintă comportamente similare la eroziunea cavitației, dar rezistențe ușor diferite (cu un plus de circa 11 % pentru bronzul CuSn12-C).
4. Pentru ca cele două materiale, alama CuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C, să se poată folosi la fabricarea pieselor ce lucrează în regimuri hidrodinamice cu o cavitație mai dezvoltată, cum sunt palele elicelor vapoarelor sau/și rotoarele mașinilor hidraulice, se impune ca pieselor respective să li se aplice tratamente volumice și de suprafață care să conducă la creșteri semnificative ale caracteristicilor mecanice ( $R_m$ ,  $R_{p0.2}$  și HB), cel puțin de nivelul oțelurilor înalt aliate sau unor bronzurilor navale de tip CUNIAL.

## **CAP. 4**

# **CERCETAREA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A UNOR ALIAJE CU BAZĂ DE CUPRU SUPUSE TRATAMENTELOR TERMICE VOLUMICE**

Folosirea tratamentelor termice volumice este determinată de obținerea unor proprietăți fizico-mecanice și de modificare a structurii, prin modificarea temperaturilor, a duratelor de menținere și a mediului/vitezei de răcire [45], [89].

O altă caracteristică specifică tratamentelor termice volumice constă în faptul că modificarea proprietăților și a structurii materialului piesei nu produce modificări considerabile ale formei sau dimensiunii piesei, care, obișnuit, ajunge la forma și cotele finale după prelucrările mecanice, ulterioare tratamentului termic.

În cazul bronzurilor și alamelor, pentru realizarea unor proprietăți mecanice ridicate, în special a durității și a unei structuri care să reducă viteza eroziunii cavitației, literatura [29], [32, 33], [53, 54], [79], [103], [104] recomandă utilizarea tratamentelor termice de călire, respectiv călire urmată de revenire. În acest sens, în cadrul acestui capitol sunt prezentate rezultatele cercetărilor de comportare și rezistență la eroziunea cavitației vibratoare, înregistrate pe 4 tipuri de tratamente termice volumice aplicate alamei CuZn39Pb și pe 3 tipuri aplicate bronzului CuSn12-C.

Rezultatele din acest capitol arată modificarea comportării și rezistenței celor două aliaje de cupru față de starea lor de livrare.

Comparația cu materialele etalon, cunoscute pentru buna rezistență la eroziunea cavitației și domeniile de utilizare în curenți hidrodinamici de cavitație industrială (mașini hidraulice și elice navale), indică domeniile unde piesele realizate din aceste aliaje ale cuprului, cu aceste tratamente termice, se pot utiliza.

### **4.1 Cercetarea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3**

#### **4.1.1 Tratamentele termice volumice**

În diagrama din fig. 4.1 este dată ciclograma celor 4 tipuri de tratamente termice:

- călire de la 800 °C (cu o durată de menținere de 40 minute, urmată de răcire în apă) – simbolizată **C 800**;
- călire de la 800 °C (cu o durată de menținere de 40 minute, urmată de răcire în apă), urmată de revenire la 250 °C (cu durată de menținere de 60 minute, urmată de răcire în aer – simbolizată **C 800/R 250**;
- călire de la 800 °C (cu o durată de menținere de 40 minute, urmată de răcire în apă), urmată de revenire la 400 °C (cu durată de menținere de 60 minute, urmată de răcire în aer) – simbolizată **C 800/R 400**;
- călire de la 800 °C (cu o durată de menținere de 40 minute, urmată de răcire în apă), urmată de revenire la 600 °C (cu durată de menținere de 60 minute) – urmată de răcire în aer – simbolizată **C 800/R 600**).

Epruvetele folosite pentru tratamentele termice au fost bare cu diametrul de 20 mm și lungime de 100 mm. După finalizarea procedurii de tratament termic, din

fiecare bară au fost realizate 4 probe pentru testele de eroziune a cavitației vibratoare (trei obligatorii, iar una de rezervă).

Este cunoscut că duritatea suprafeței, așa cum arată studiile lui Garcia & Hammitt [42] și cele realizate în tezele de doctorat dezvoltate în Laboratorul de cavitație al Universității Politehnica Timișoara [1], [9], [13], este una dintre proprietățile mecanice cu efect asupra rezistenței la cavitație. Din acest motiv, pe suprafața circulară a probei de rezervă, din fiecare set al tipului de tratament termic volumic, care, ulterior, nu a mai fost testată la eroziunea cavitației vibratoare, au fost realizate analize metalografice și 8 măsuratori de duritate HV5. Datele sunt afișate în tabelul 4.1. După cum se poate constata cea mai mare duritate este obținută pentru proba călită (C800), iar cea mai mică pentru proba C800/R400. Aceste valori au importanță, așa cum se va vedea în analizele ce urmează, privind rezistența stratului suprafeței la eroziunea creată prin atacurile ciclice, de oboseală, ale microjeturilor și undelor de șoc, generate prin implozia bulelor de cavitație, specifică de mecanismului cavitației vibratoare.

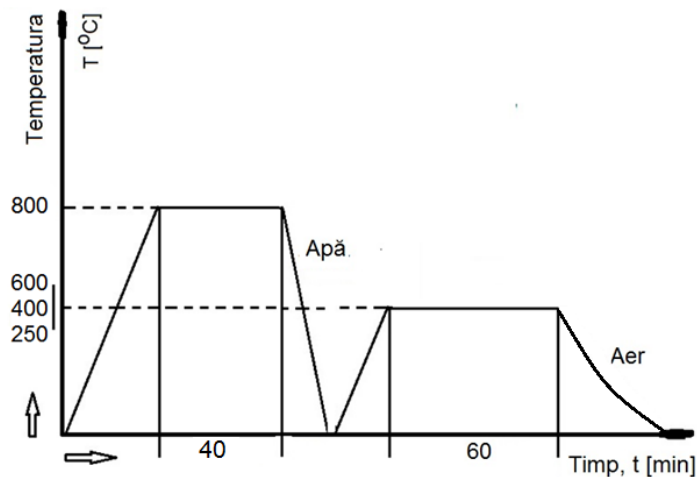


Fig. 1.4 Ciclograma tratamentelor termice

Tabelul 4.1 Valorile durității **HV 0.5**

Nr.crt.	Proba 1 C800/R400	Proba 2 C800/R600	Proba 3 C800/R250	Proba 4 C800
1	127	130	145	163
2	127	133	145	163
3	131	134	153	166
4	127	134	153	167
5	125	137	147	164
6	128	137	150	176
7	130	134	143	170
8	129	132	147	167
Media	128	133,8	147,9	167



#### 4.1.2 Rezultatele cercetării la cavitație

Cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației a fost derulată pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice (vezi fig.2.3, capitolul 2), în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Testele de cavitație au fost derulate pe trei probe din fiecare tip de tratament termic, cu forma și dimensiunile prezentate în fig. 2.4, conform procedurii menționate în subcapitolul 2.2, cu respectarea prvederilor ASTM G32-2010 și a cutumei laboratorului.

Ca și în cazul testelor realizate pe starea livrată a alamei, mediul lichid folosit a fost apa potabilă de la rețeaua publică, a cărei temperatură a fost păstrată la valoarea  $22 \pm 1$  °C.

##### 4.1.2.1 Călirea volumică de la 800°C

##### 4.1.2.1.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

Valorile experimentale ale testului de cavitație, înregistrate la testele de cavitație vibratoare, precum și curbele de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , construite cu relația (2.1), sunt prezentate în fig. 4.2 și 4.3. În aceste diagrame sunt date și valorile adâncimii medii cumulate după 165 minute de expunere la cavitație,  $MDE_{max}$ , respectiv valorile vitezelor de eroziune,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$ . După cum s-a mai menționat în subcapitolul 2.8,  $MDER_{max}$  este valoarea maximă atinsă de curba  $MDER(t)$ , iar  $MDER_s$  este valoarea de final (de la 165 minute), cunoscută ca valoarea de stabilizare sau valoarea spre care curba  $MDER(t)$  tinde asimptotic.

Acuratețea derulării programului de cercetare experimentală, precum și a prelucrării datelor obținute este ilustrată de datele din fig.4.4 prin, banda de dispersie, intervalul de toleranță în care sunt cuprinse valorile experimentale și valoarea erorii standard de estimare de 0.239.

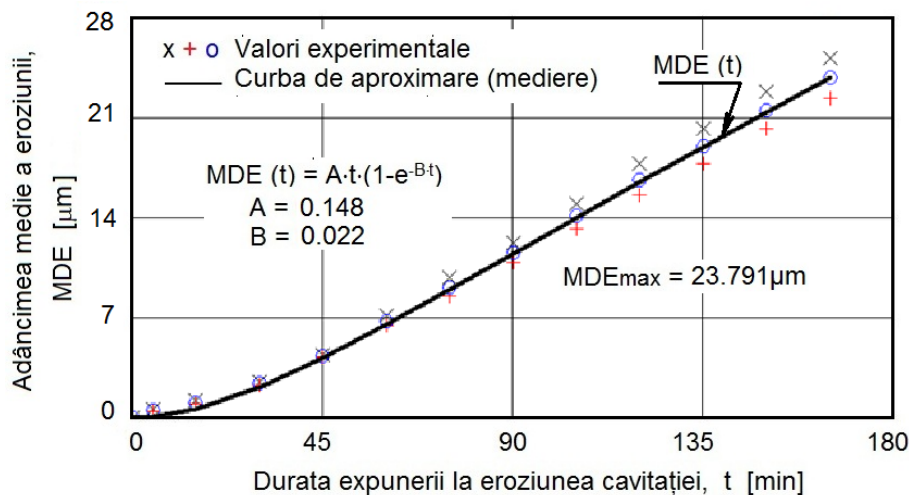


Fig. 4.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

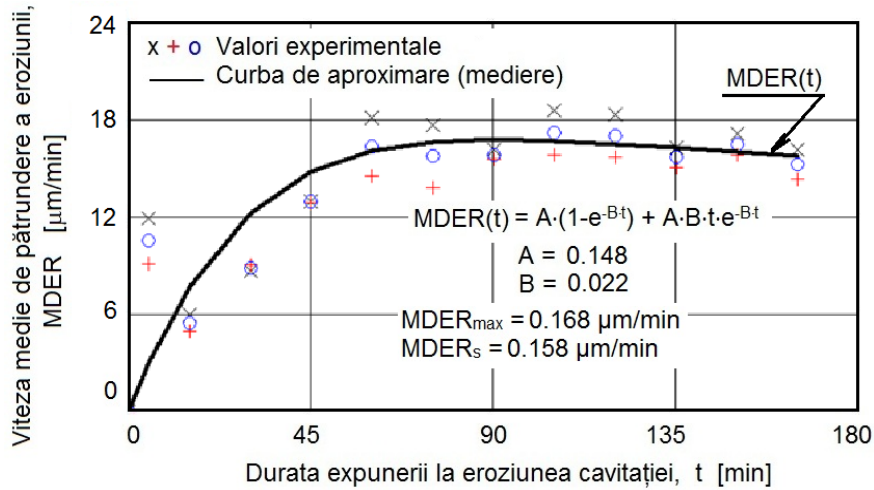


Fig. 4.3 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

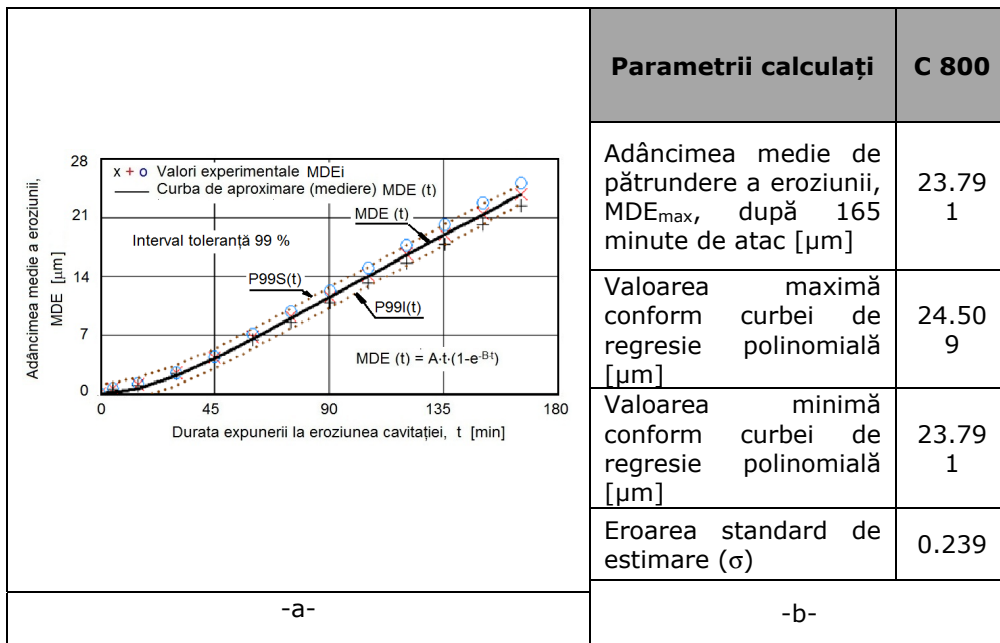


Fig. 4.4 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Valorile experimentale obținute în cele 12 perioade de testare, cu excepția celor din primele 5-15 minute ale atacului în care sunt afectate de praful abaziv și rugozitate [9] și evoluția curbei de mediere a vitezei de pătrundere a eroziunii ( $MDER(t)$ ) arată comportarea suprafețelor la impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate prin mecanismul hidrodinamic al cavitației vibratoare. Astfel, evoluția liniară a curbei  $MDE(t)$ , fig.4.2, începând cu minutul 45 și ușor descrescătoare a curbei  $MDER(t)$ , de la valoarea de maxim  $MDER_{max} = 0.168 \mu\text{m}/\text{min}$  (minutul 90) spre

valoarea de stabilizare  $MDER_s = 0.158 \mu\text{m}/\text{min}$ , fig.4.3, conform rezultatelor obținute pe materiale din aceeași categorie în cadrul tezelor realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [9], [13], [14], [67-69], [89], dar și pe baza formei curbelor prezentate de Franc [40], putem afirma că tratamentul termic de călire de la  $800^\circ\text{C}$ , cu răcire în apă, prin duritatea stratului expus cavitației (167 HV 5), conferă o bună rezistență la eroziunea cavitației. Totodată, dispersia redusă a valorilor experimentale ale parametrului MDER, ale celor trei probe, față de curba de mediere  $MDER(t)$ , precum și diferențele mici dintre ele, la timpii caracteristici de măsurare, arată că structura rezultată prin acest tratament termic este una omogenă din punct de vedere al granulației, cu proprietăți mecanice (în special duritatea-care s-a măsurat, vezi tabelul 4.1) uniform distribuite în volumul materialului.

#### 4.1.2.1.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

Analiza degradării suprafeței și structurii, de către eroziunea cavitației vibratoare, este realizată ca și la capitolul 3; pe baza imaginilor fotografice și a celor realizate la microscopul optic și electronic cu baleiaj.

##### 4.1.2.1.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitației

În figura 4.5 sunt prezentate imagini cu evoluția eroziunii în aria suprafeței expuse cavitației, ca extindere și profunzime, ale unei probe alese aleatoriu, notată pe parcursul testelor (ca element de identificare) Proba 1.

Imaginile sunt realizate prin fotografiere cu aparatul fotografic de înaltă rezoluție, același care s-a folosit și pentru realizarea imaginilor din capitolul 3.

În figura 4.6 sunt redată imagini cu degradarea suprafețelor celor trei probe testate, după finalizarea testului de cavitație (durata de 165 minute).

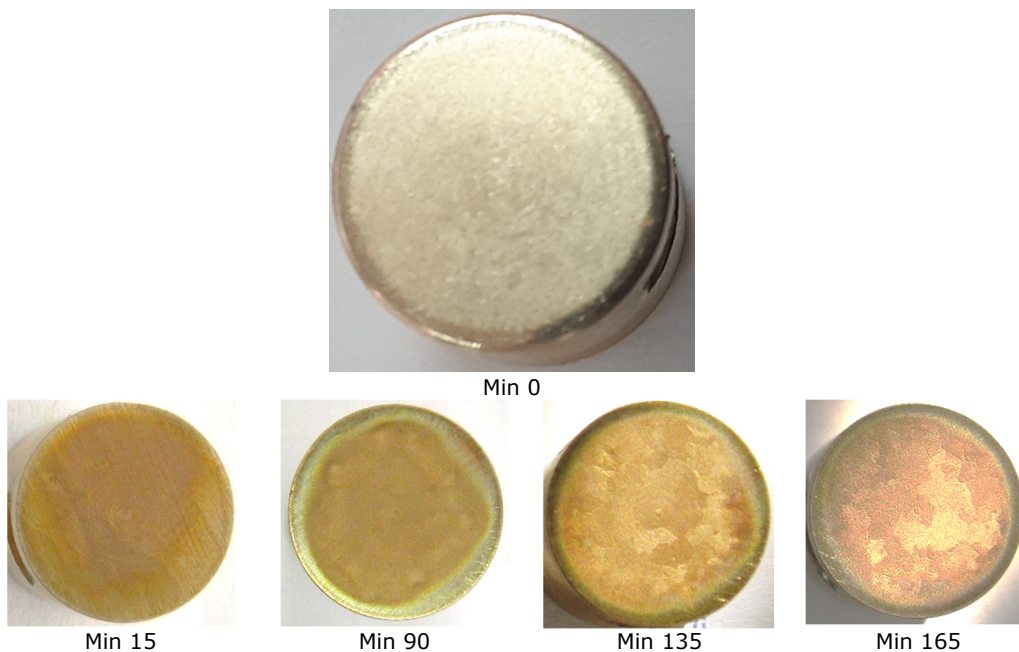


Fig. 4.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 1)

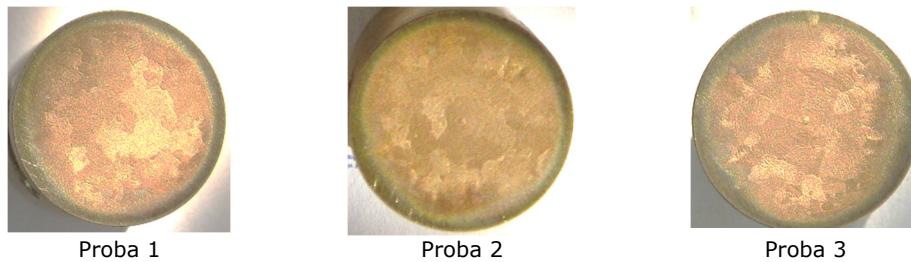


Fig. 4.6 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

Imaginile din fig.4.5, arată că distrugerea suprafeței, prin deformații ale acesteia, producerea de pittinguri și rețele de fisuri începe din primele minute ale atacului cavitației, astfel încât după 15 minute de expunere, mare parte din arie este erodată. Cu continuarea atacului cavitației, forțele de impact ale microjeturilor produc adâncirea cavernelor, astfel încât după 90 minute, când curba vitezei de eroziune MDER(t), fig.4.3, realizează un maxim, aria distrusă este foarte bine conturată în aria suprafeței expuse. După această perioadă, până la finalizarea testului (165 minute) în aria suprafeței cavitate se produc fisuri și expulzări de material, dar viteza scade, datorită efectului gazului amortizant pătruns în cavernele formate și a durificării stratului suprafeței prin tasarea mecanică la impactul cu microjeturile cavitaționale.

Imaginile din fig.4.6 arată că distrugerea suprafețelor celor trei probe, după finalizarea atacului, este asemănătoare, ceea ce confirmă că programul de testare a fost derulat în condiții identice, așa cum rezultă și din banda de dispersie a valorilor experimentale, aflate în intervalul de toleranță de 99 %, fig. 4.4

Aspectul poros al suprafeței, cu fisuri, relief și caverne, este evidențiat prin imaginile SEM și macroscopice din fig.4.7, înregistrate pe una din cele trei probe, la final de test.

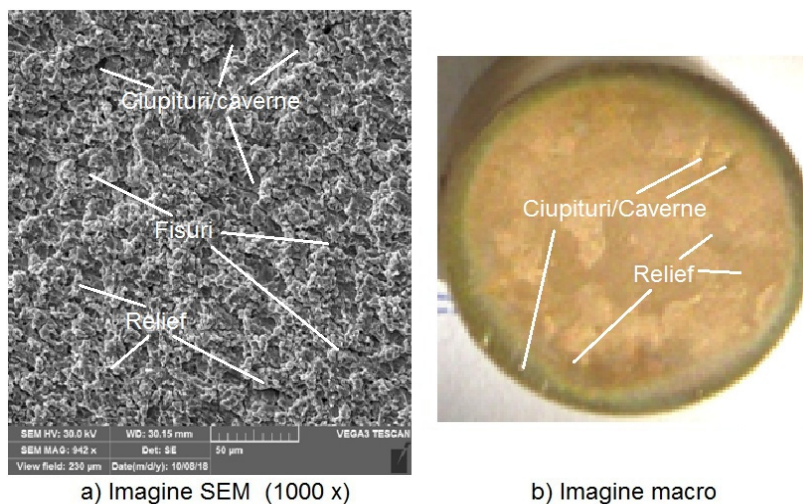


Fig. 4.7 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (**Proba 2**) (imagini din zona interioara a suprafeței cavitate)

Cele două imagini din fig.4.7 arată natura mai fină a structurii (imaginea SEM, fig.4.7a), rezultată prin tratamentul termic de călire și modul interesant, cu caverne pe inelul periferic, respectiv cu pittinguri mici, care dau forma de hartă în imaginea macro (fig.4.7b).

#### 4.1.2.1.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

În fig. 4.8 este prezentată profilograma, cu valorile celor trei parametri de referință ( $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ ), înregistrată cu aparatul Mitutoyo SJ 201, care este o nouă modalitate de a evidenția comportarea și rezistența suprafeței probei de alamă călită volumic de la 800 °C [12], [45], [25], [74], [79]. Forma profilogramei este în concordanță cu tipul structurii degradate de eroziune, redată în imaginea din fig.4.7, dar și cu aspectul macroscopic al probelor de la finalul testelor de cavitație, fig.4.6 și 4.7.

În fig.4.9 este prezentat modul de înregistrare a profilogramei și de măsurare pe trei direcții, dispuse la aproximativ 120°. Valorile celor trei parametri, înregistrate pe proba nr.2 și prezentate la subsolul imaginii, sunt calculate ca valori medii ale celor înregistrate pe cele trei direcții.

Comparând cu valoarea medie cumulată  $MDE_{max} = 23.791 \mu\text{m}$  se observă că cea mai apropiată este  $R_{zmed} = 23.362 \mu\text{m}$ , motiv pentru care, în ultima perioadă, este recomandată la evaluarea rezistenței la cavitație a suprafețelor astfel solicitate.

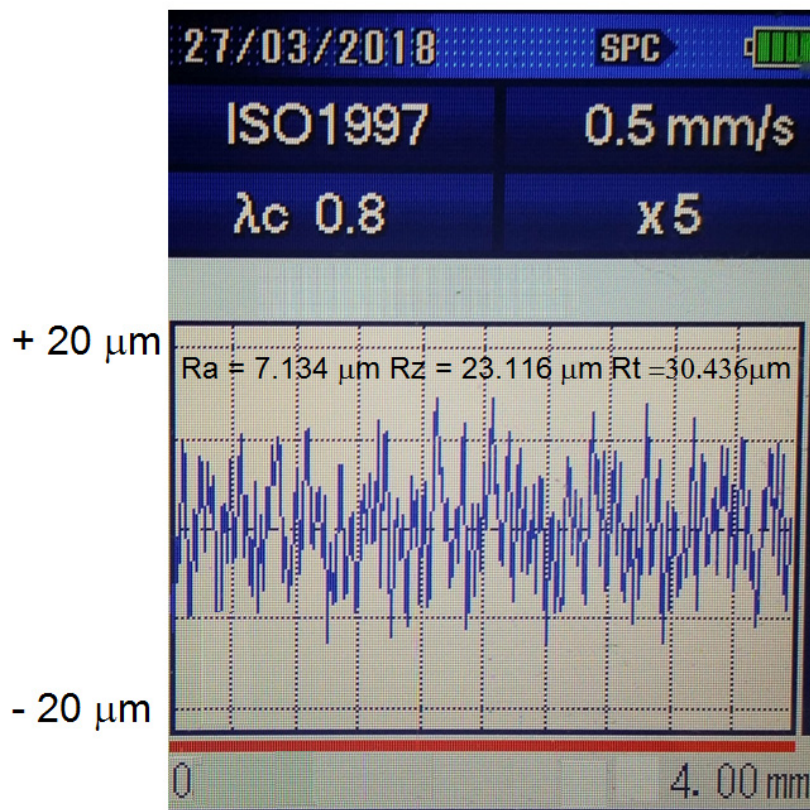


Fig. 4.8 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare - **Proba 1**)

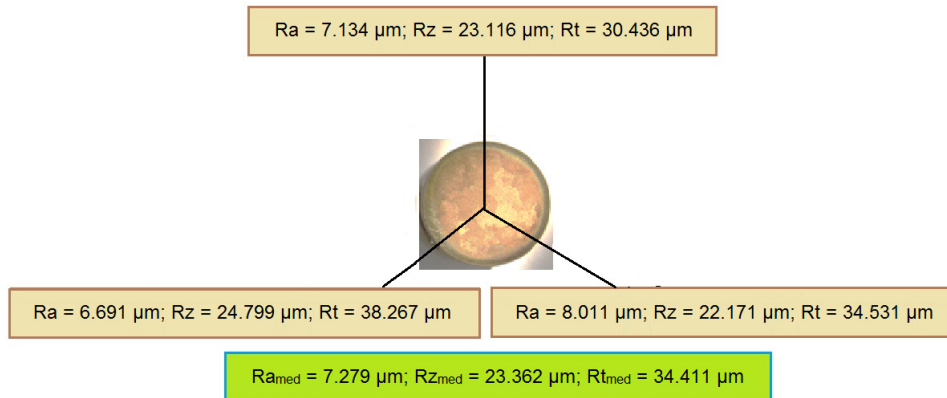


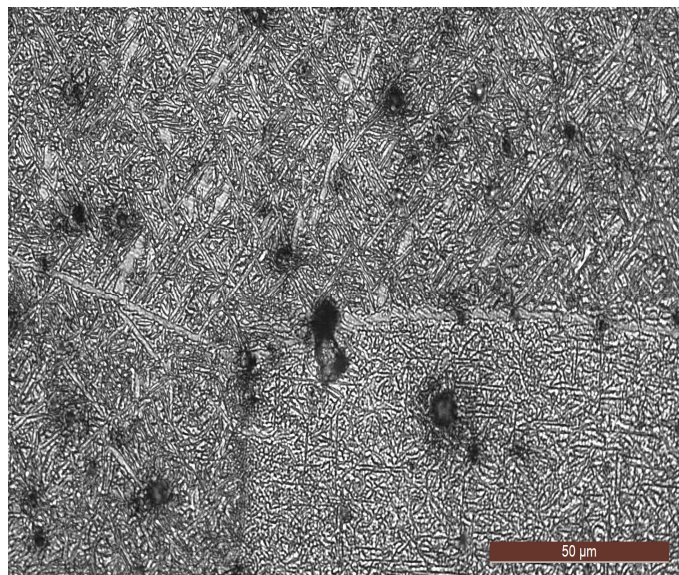
Fig. 4.9 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.8 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 (**Proba 1**)

#### 4.1.2.1.2.3 Morfologia structurii erodate

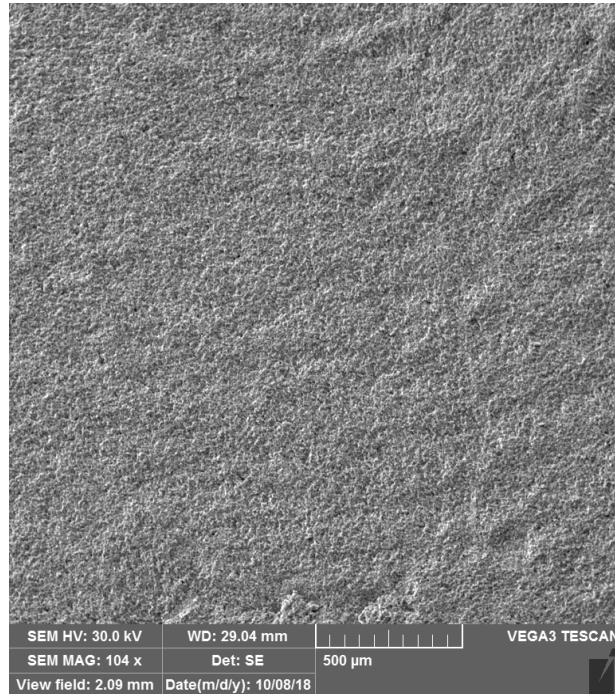
Anterior s-a arătat că în stare de semifabricat, pentru condiții de răcire lentă de la temperaturi înalte, microstructura alamei considerate este constituită din cca. 60 % soluție solidă  $\alpha$  (culoare deschisă) și cca. 40 % fază  $\beta'$  (culoare închisă).

Încălzirea aliajului bifazic la o temperatură de 800 °C urmată de o menținere corespunzătoare provoacă dizolvarea celei mai mari părți din faza  $\alpha$  cu formarea unei faze  $\beta$  omogene din punct de vedere chimic. Efectuarea unei răcirii bruște în apă, de la această temperatură frânează fenomenele de difuzie, astfel că la temperatura camerei se obține o microstructură de călire, constituită în principal din faza  $\beta$  în stare suprasaturată și din mici cantități de soluție solidă  $\alpha$  rămasă netransformată (fig.4.10 a).

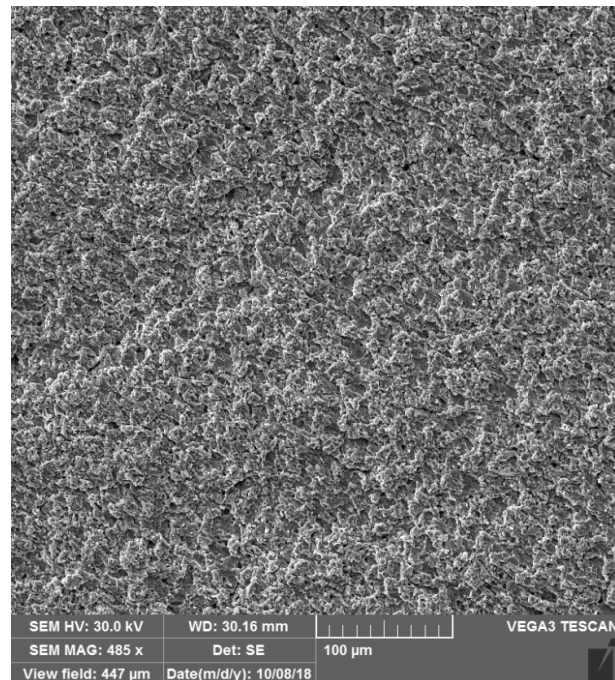
Topografia suprafeței testate cavitațional timp de 165 min. (fig. 4.10 b...e) arată o degradare uniformă a acesteia cu mici ciupituri de rupere ductilă.



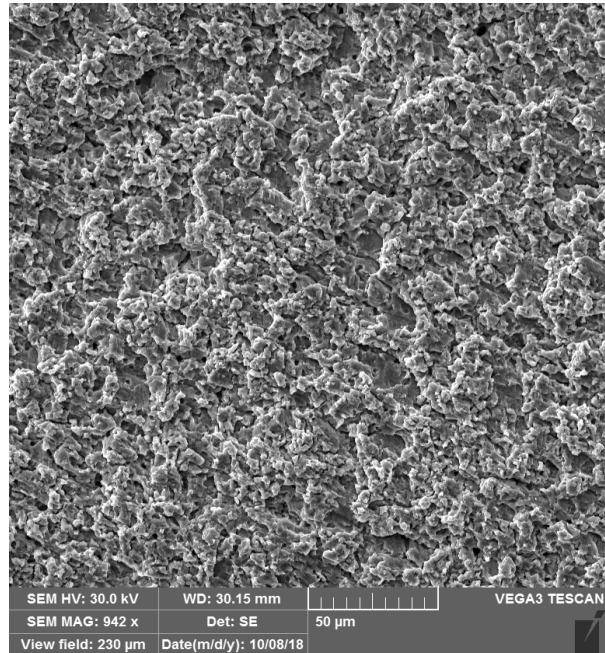
-a-



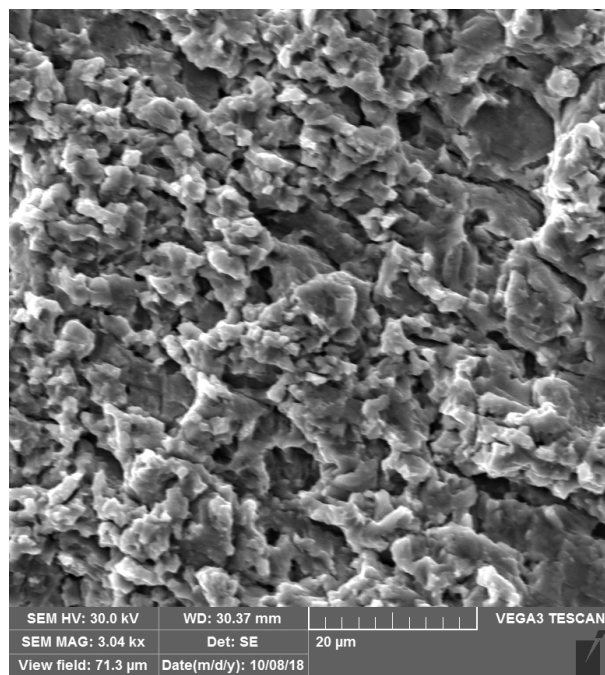
**-b-**



**-c-**



-d-



-e-

Fig. 4.10 Imaginea microscopică (a) și imagini SEM (b...e) după 165 minute de expunere la cavitație



#### 4.1.2.2 Călirea volumică de la 800 °C cu revenire la 250 °C

##### 4.1.2.2.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig. 4.11 și 4.12 sunt afișate valorile experimentale ale celor trei probe testate, approximate prin curbele de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , construite analitic cu relațiile (3.4) și (3.5), precum și valorile parametrilor  $MDE_{max}$ ,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$ .

Prelucrarea statistică a datelor experimentale obținute pe cele trei probe, exprimată prin valoarea erorii standard de 0.253 și prin banda de frecvență, corespunzătoare unui interval de toleranță de 99 %, arată că întregul program de cercetare, derulat pe cele trei probe, a fost realizat în condiții identice și cu acuratețe.

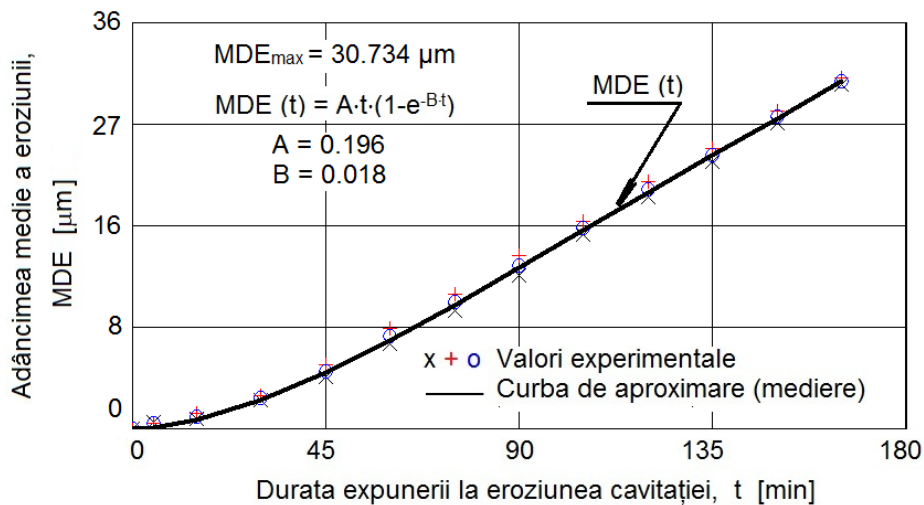


Fig. 4.11 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

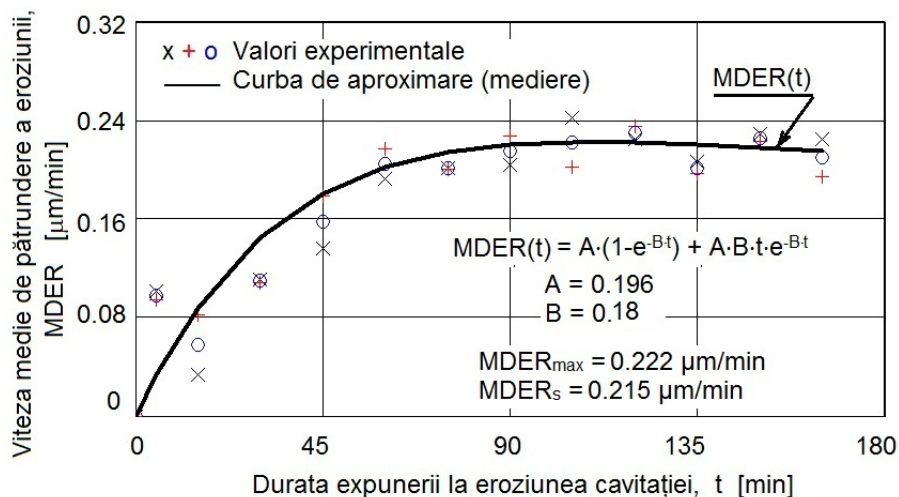


Fig. 4.12 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

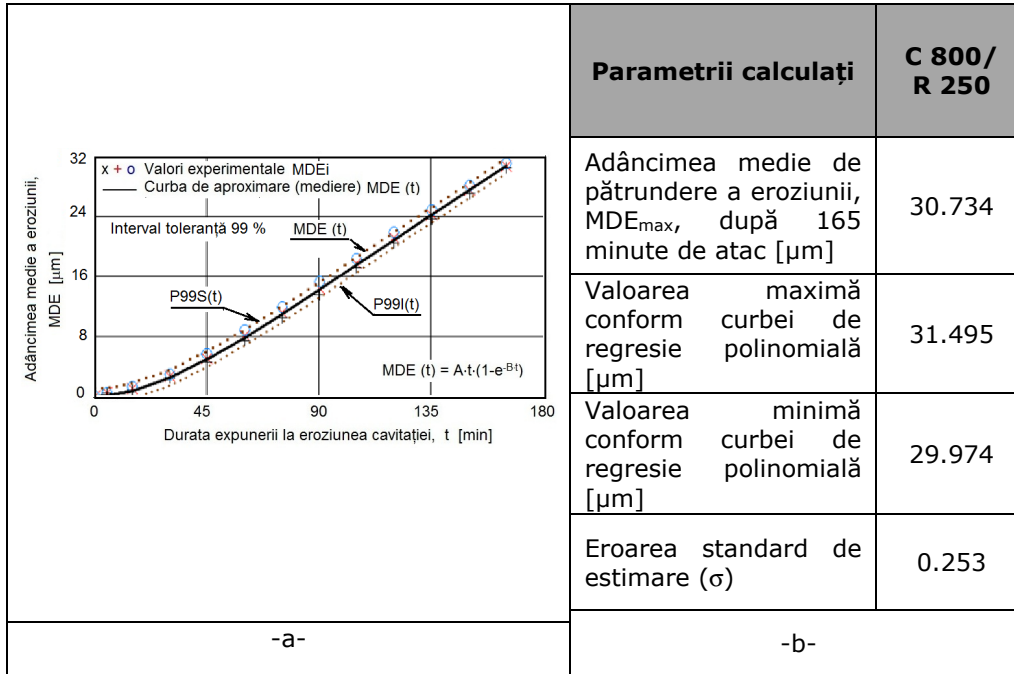


Fig. 4.13 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Dispersia valorilor experimentale ale adâncimii medii cumulate de eroziune și ale vitezelor medii, ale fiecărei probe din cele trei, față de curbele de mediere  $MDE(t)$ , fig. 4.11 și  $MDER(t)$ , fig.4.12, arată efectul benefic al tratamentului termic de călire la 800°C urmată de revenire la 250°C. Și în acest caz, la fel ca la tratamentul termic de călire, evoluțiile curbelor de mediere, liniară pentru  $MDE(t)$ , începând cu minutul 60 al atacului, și de stabilizare a vitezei medii de eroziune la valoarea  $MDER_s = 0.18 \mu m/min$ , sugerează un comportament specific materialelor cu bună rezistență la eroziunea cavitației [9], [13], [55, 56], [79], [89].

Apreciem că acest mod de comportare și rezistență la solicitările ciclice de oboseală ale cavitației sunt efectul durității semnificative a suprafeței (147.9 HV5 – vezi tabelul 4.1), în primul rând, dar și al structurii modificate, ca și grad de finețe și granulație, efecte ale tratamentului termic de călire și revenire [43], [44], [73].

#### 4.1.2.2.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

##### 4.1.2.2.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

În fig.4.14 și 4.15 sunt prezentate imagini fotografice, macroscopice, care arată evoluția eroziunii cavitației în ariile suprafeței expuse, la diverse durate și după 165 minute.

Imaginile din fig. 4.14, prezentate doar pentru proba 3 (luată arbitrar), arată delimitarea ariei erodate de cea a suprafeței expuse, foarte bine conturată după 15 minute de expunere la cavitație. După 105 minute de atac al cavitației, când curba vitezei  $MDER(t)$  realizează maximum, fig.4.12, eroziunea se dezvoltă doar în profunzimea suprafeței și delimitarea ariei erodate de cea expusă se finalizează prin inelul periferic. Cu creșterea duratei de expunere la cavitație, pe marginea ariei

erodate, se produc caverne, ca urmare a mecanismului de formare a norului de bule cavitaționale, ce generează solicitări mai puternice în această zonă [59]

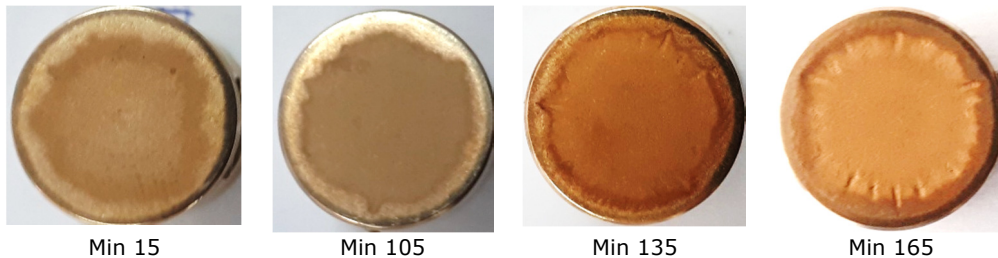


Fig. 4.14 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)



Fig. 4.15 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

Imaginile fotografice din fig. 4.15 arată distrugeri similare în ariile erodate, cu caverne mari în inelul periferic. Aceste asemănări arată acuratețea derulării cercetărilor, cu respectarea condițiilor cerute de cutuma laboratorului și normele ASTM G32-2010, la testarea celor trei probe.

În fig. 4.16 sunt prezentate două imagini, una SEM și una macroscopică, realizate după 165 minute de expunere la eroziunea cavitației, pe una dintre cele trei probe testate.

Imaginea SEM din fig.4.16 pune în evidență natura structurii, omogene și mai fine rezultate, prin tratamentul termic de călire de la 800 °C, urmată de revenire la 250 °C, precum și rețelele de fisuri și pittinguri, marcate și în imaginea macroscopică, din fig.4.16b.

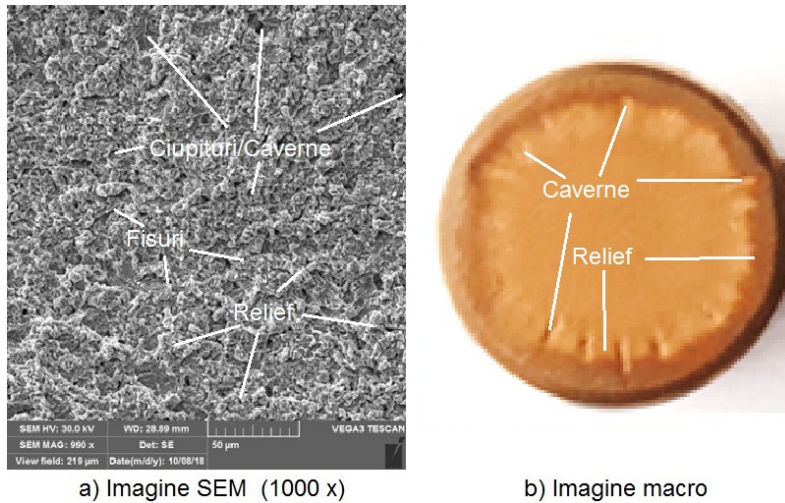


Fig. 4.16 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (**Proba 3**) (imagini din zona interioară a suprafeței cavitate)

#### 4.1.2.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

În fig. 4.17 se prezintă profilograma unui segment din suprafața erodată, cu valorile celor trei parametri ai rugozității. Această imagine confirmă starea degradată a suprafeței, prezentată în fig.4.16, iar, la scară mare, aspectul ariei erodate din fig.4.14 și 4.15. Forma ei este o expresie a efectului tratamentului termic de călire de la 800 °C asupra comportării și rezistenței materialului din suprafața expusă atacului cavitației, respectiv la tensiunile induse de solicitările ciclice ale microjeturilor cavitaționale.

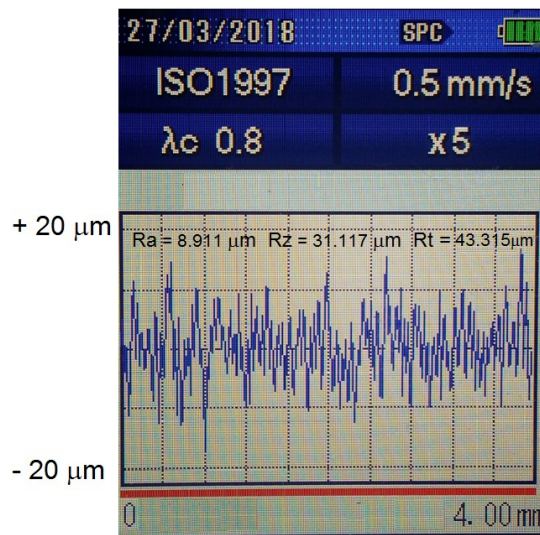


Fig. 4.17 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare-**Proba 3**)

Din datele rezultate prin măsurarea parametrilor rugozității pe cele trei direcții, pe proba nr.3, fig. 4.18, se constată, de asemenea, că cea mai apropiată valoare de adâncimea medie cumulată, după 165 minute de cavitație, fig. 4.4.11 și 4.13, este a parametrului  $R_z$ . Diferența este nesemnificativă ( $MDE_{max} = 30,734 \mu\text{m}$  față de  $R_{zmed} = 31,117 \mu\text{m}$ ).

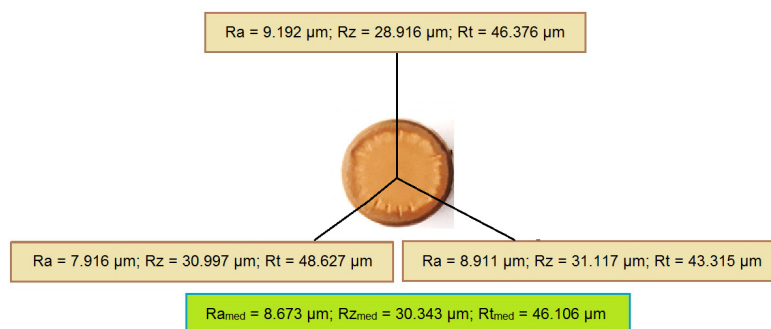


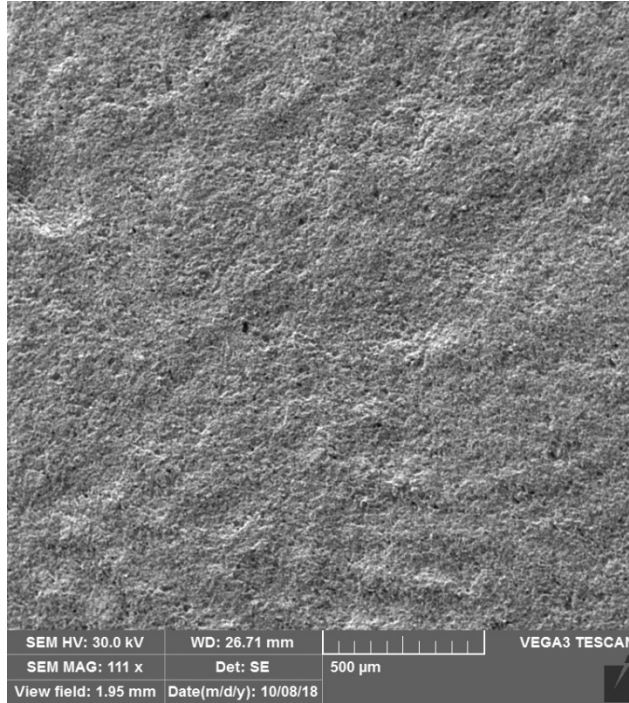
Fig. 4.18 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.17 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (**Proba 3**)

#### 4.1.2.2.3 Morfologia structurii erodate

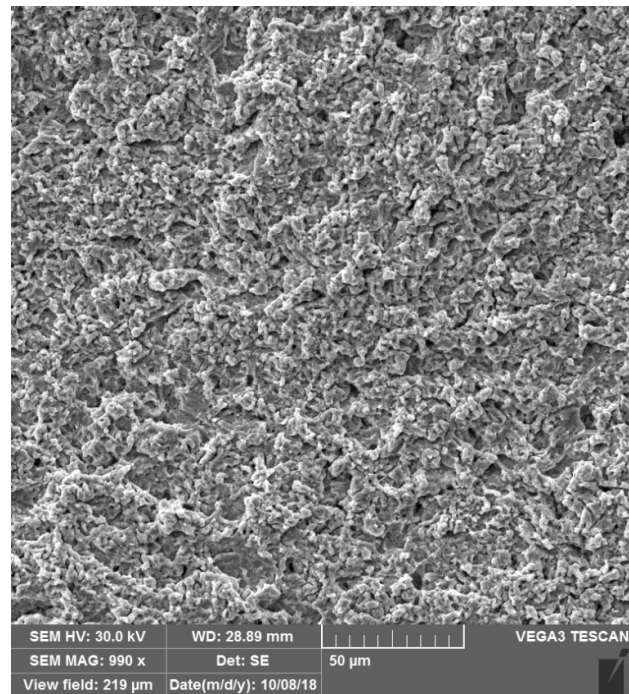
Aplicarea tratamentului termic de revenire la  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  se manifestă prin precipitarea din faza  $\beta$  suprasaturată a unor particule de fază  $\alpha$ , cu formă aciculară, atât în interiorul grăunților cât și pe limitele dintre grăunți (fig.4.19 a). Ca urmare, duritatea scade ușor, tensiunile interne se reduc, iar ciupiturile apărute în urma atacului cavitațional sunt ceva mai pregnante în zona limitelor dintre grăunți. (fig. 4.19 b...f).



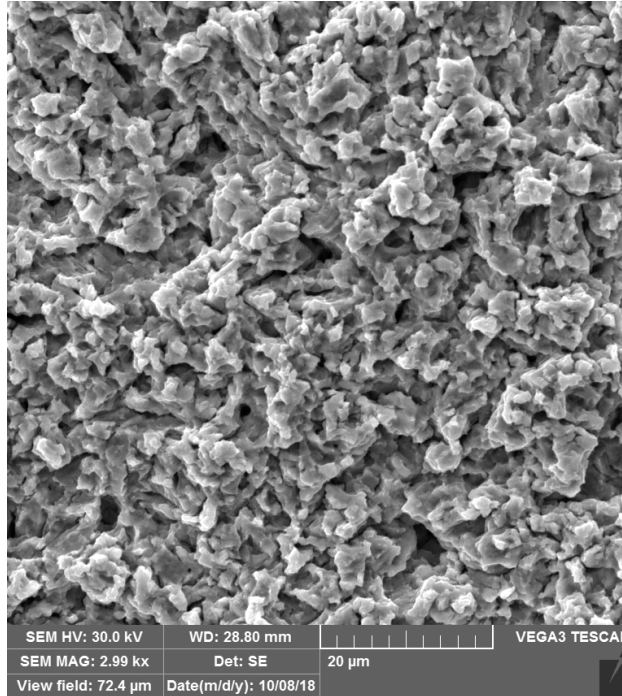
-a-



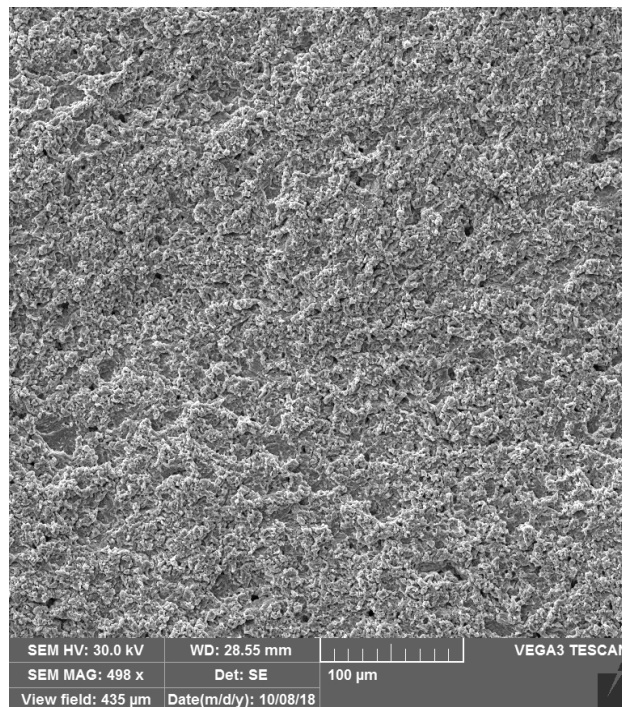
-b-



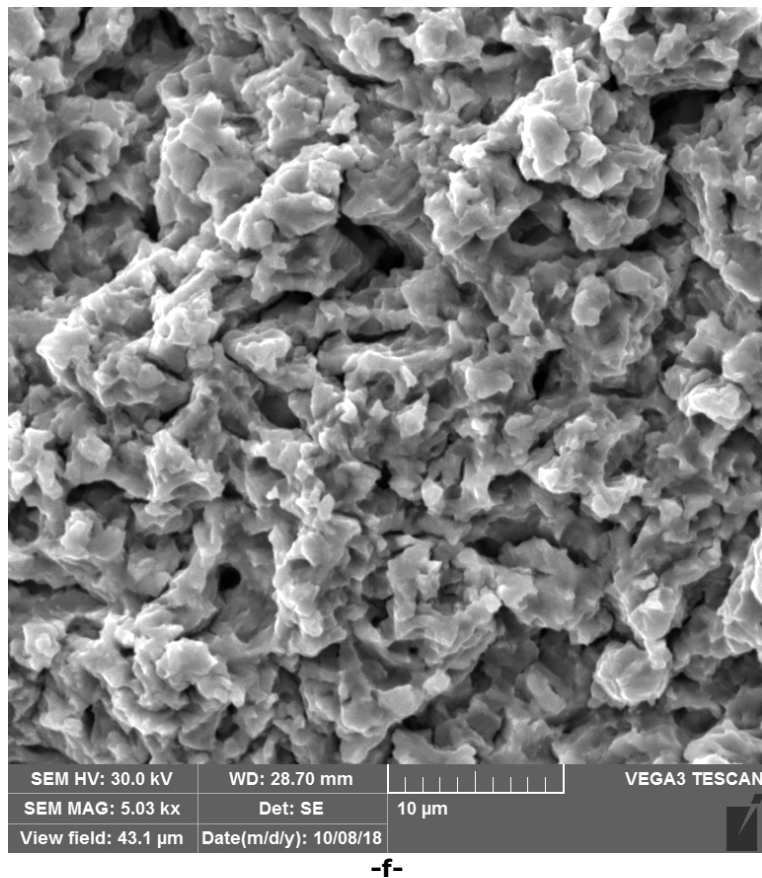
-c-



-d-



-e-



-f-

Fig. 4.19 Imaginea microscopică (a) și imagini SEM (d...f), după 165 minute de expunere la cavitație

#### 4.1.2.3 Călirea volumică de la 800 °C cu revenire la 400 °C

##### 4.1.2.3.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig.4.20 și 4.21 sunt prezentate rezultatele testului de cavitație, prin valorile experimentale ale celor trei probe testate, approximate prin curbele de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , construite analitic cu relațiile (3.4) și (3.5), precum și prin valorile parametrilor  $MDE_{max}$ ,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$ .

Programul experimental s-a derulat în condiții identice pe cele trei probe testate. Dovada o reprezintă datele din fig. 4.22. Banda de dispersie a valorilor experimentale este în intervalul de toleranță de 99 %, iar valoarea erorii standard de estimare de 0.312 este sub valoarea acceptată pentru rezultatele experimentale din domeniul testelor de eroziune a cavitației [79].



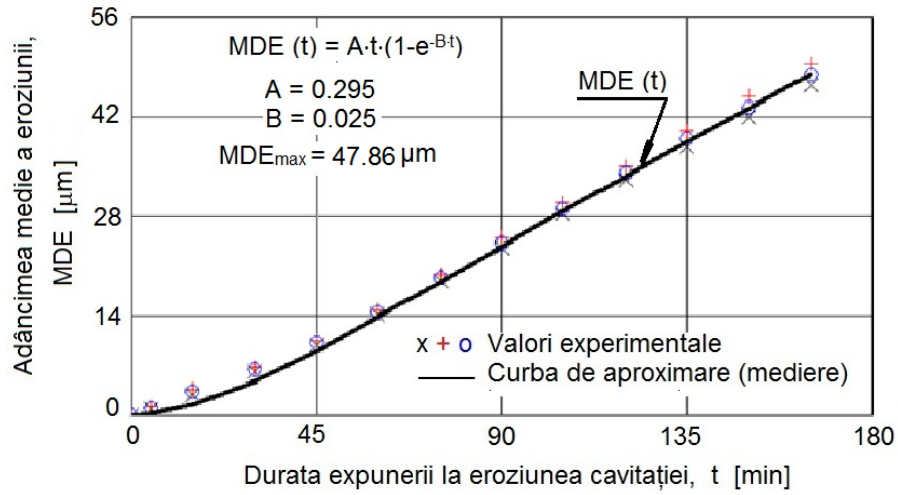


Fig. 4.20 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

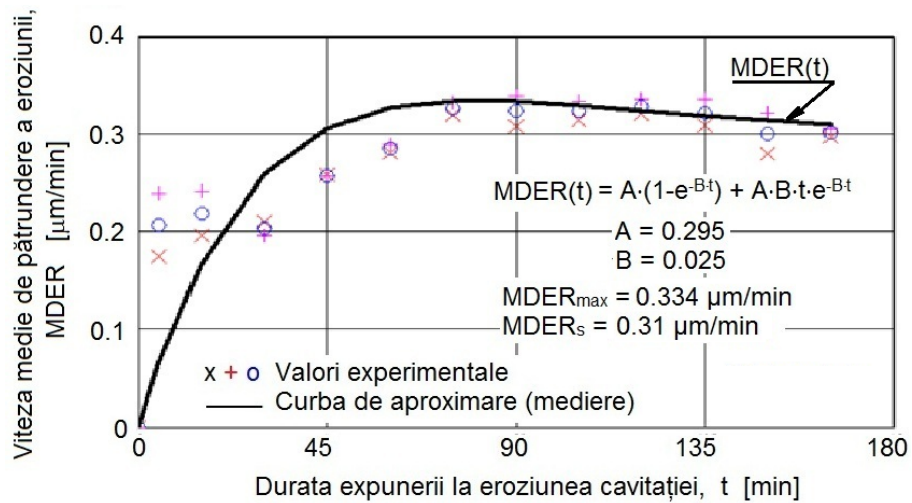


Fig. 4.21 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

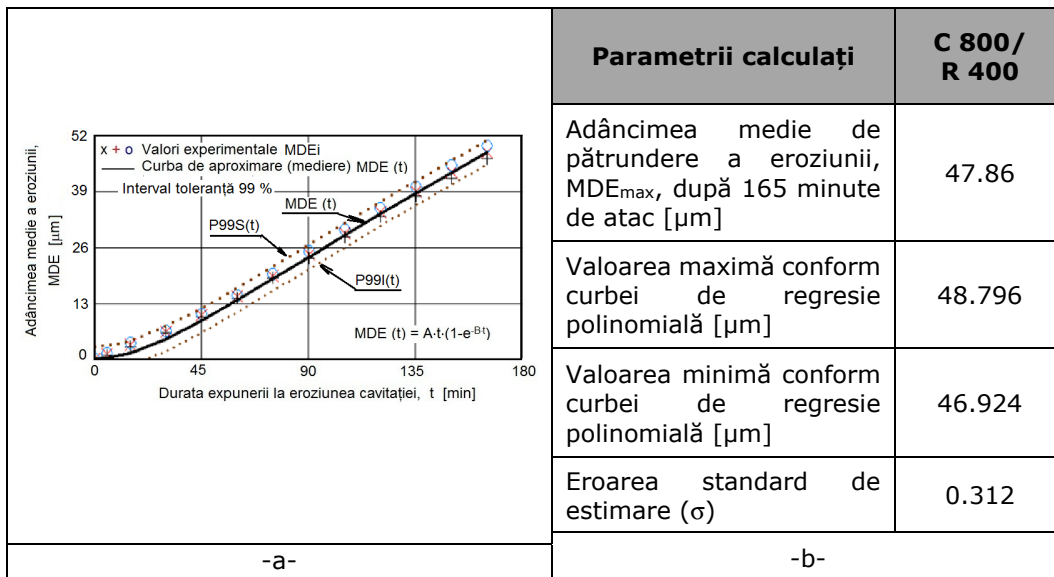


Fig. 4.22 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Și în acest caz, curbele și valorile punctelor experimentale, ale celor trei probe testate, dispersia față de curbele de mediere  $MDE(t)$ , fig. 4.20 și  $MDER(t)$ , fig.4.21, arată efectul benefic al tratamentului termic de călire de la 800 °C, cu revenire la 400 °C asupra comportării și rezistenței suprafețelor probelor la eroziunea cavitației vibratoare. Apreciem că efectul benefic este datorat durtății de 128 HV5, proprietăților mecanice și structurii rezultate prin acest tratament termic.

Deși scăderea vitezei de pătrundere a eroziunii, de la valoarea maximă ( $MDER_{max} = 0.334 \mu m/min$ ), realizată de curba  $MDER(t)$  după circa 75 minute de atac al cavitației, la valoarea finală de stabilizare, spre care tinde asimptotic ( $MDER_s = 0.31 \mu m/min$ ), este mai mare decât cele înregistrate la tratamentele termice anterioare (călire de la 800 °C (scădere de 0.01  $\mu m/min$ ), respectiv călire de la 800 °C cu revenire la 400 °C (scădere de 0.007  $\mu m/min$ ), apreciem că acest comportament este unul bun, îmbunătățit față de starea de livrare (vezi capitolul 3), caracteristic materialelor cu bună rezistență la eroziunea cavitație [9].

#### 4.1.2.3.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

##### 4.1.2.3.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

În fig.4.23 sunt prezentate imagini cu evoluția eroziunii pe parcursul expunerii la cavitație, iar în fig. 4.24 sunt prezentate imaginile suprafețelor erodate după finalizarea testului de cavitație.

Imaginile din fig.4.23 arată că delimitarea ariei erodate de cea expusă se finalizează relativ repede, după 75 minute de expunere, ceea ce arată că prin acest tratament de călire de la 800 °C, cu revenire la 400 °C, suprafața are o rezistență la cavitație mai scăzută decât a primelor două tratamente (călire de la 800 °C, respectiv călire de la 800 °C cu revenire la 250 °C), fiind în concordanță și cu valoarea mai scăzută a durtății (vezi tabelul 1). Cu creșterea duratei cavitației, numărul și profunzimea cavernelor formate spre periferie cresc.

Imaginile din fig. 4.24 dovedesc că cele trei probe au fost testate în condiții identice, confirmând datele statistice din fig.4.22.

Imaginile SEM și macroscopice din fig.4.25 sunt expresia gradului de degradare a suprafeței, cu un număr mai mare de caverne și fisuri.

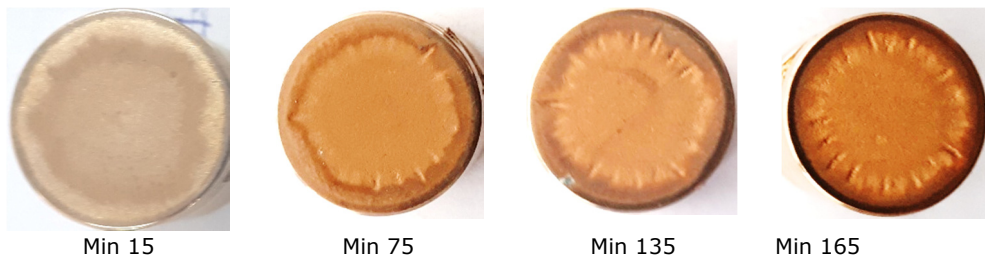


Fig. 4.23 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 2)



Fig. 4.24 Imagini macro (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

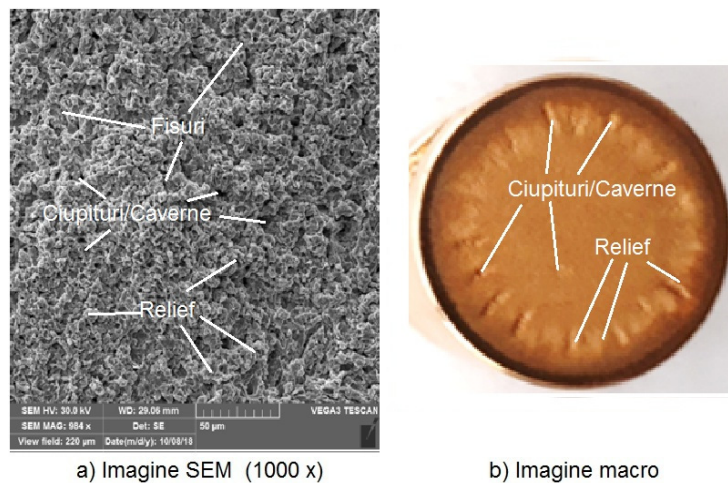


Fig. 4.25 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (**Proba 2**) (imagini din zona interioară a suprafeței cavitate)

#### 4.1.2.3.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

Profilograma din fig.4.26, cu salturi semnificative, și valorile parametrilor rugozității înregistrate pe proba nr.3, arată modul de evoluție și gradul distrugerii structurii materialului supus călirii volumice de la 800 °C cu revenire la 400 °C, din suprafața expusă. Această formă este o altă imagine, în 2D, a structurii erodate din fig. 4.25, dar și în concordanță cu aspectul macroscopic din fig.4.23 și 4.24.

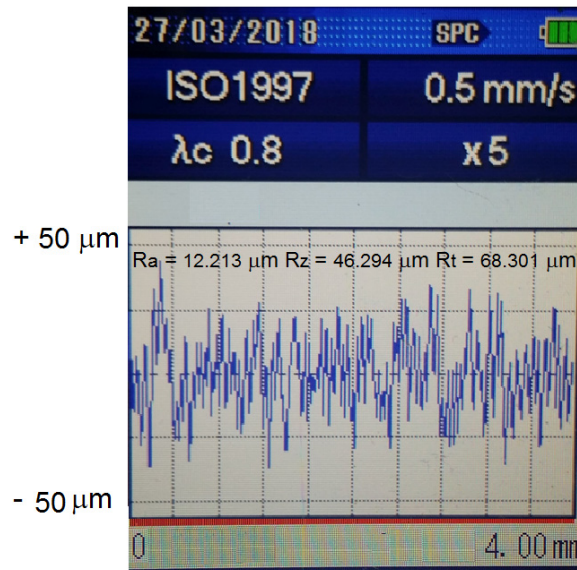


Fig. 4.26 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare – **Proba 3**)

În fig.4.27, în care se arată valorile parametrilor de bază ai rugozității, înregistrate cu aparatul Mitutoyo pe cele trei direcții. Valorile medii, de la subsolul imaginii, confirmă că parametrul Rz este cel mai indicat, din cei trei, a se folosi la evaluarea comportării și rezistenței materialului unei suprafețe expuse cavitației, deoarece valoarea medie,  $R_{zmed}$ , este cea mai apropiată de a adâncimii medii calculate  $MDE_{max}$  pentru cele trei probe (fig.4.20 și 4.22)

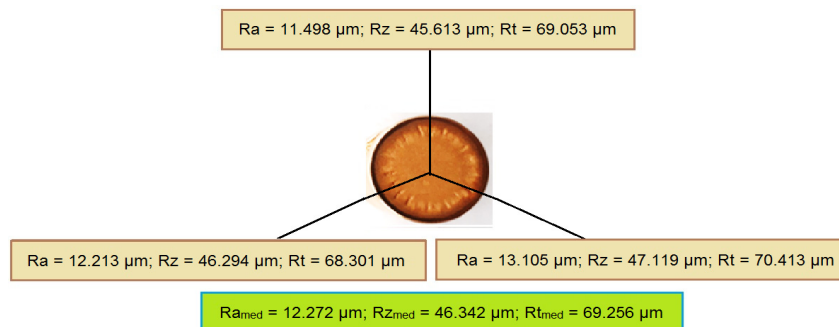
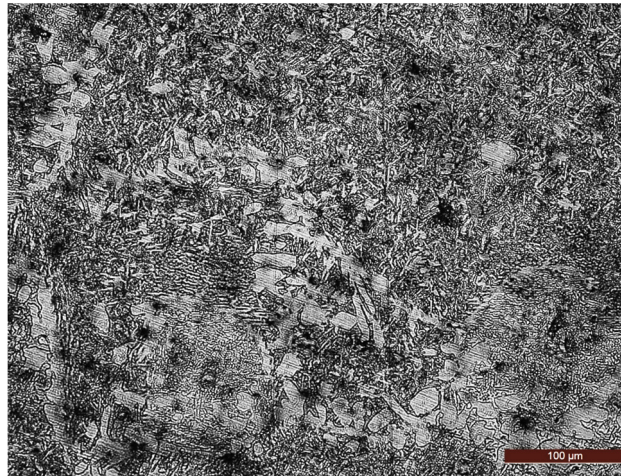
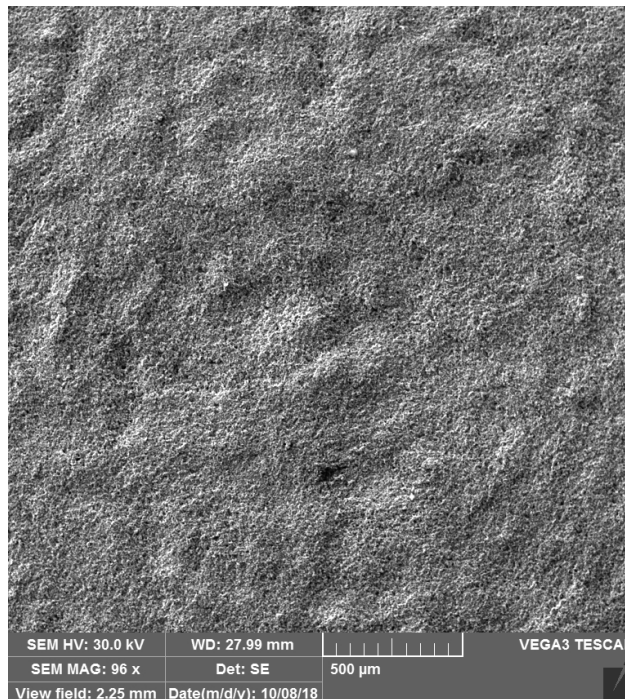
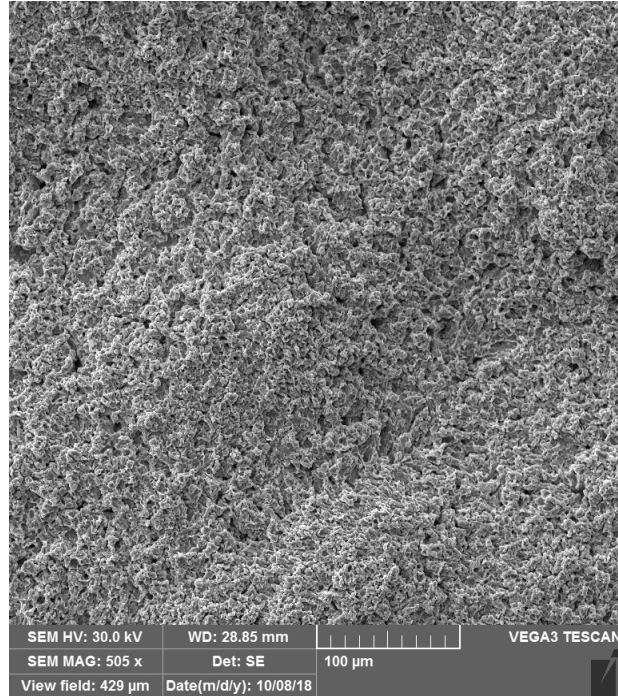


Fig. 4.27 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.26 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P – pentru fiecare tratament (**Proba 2**)

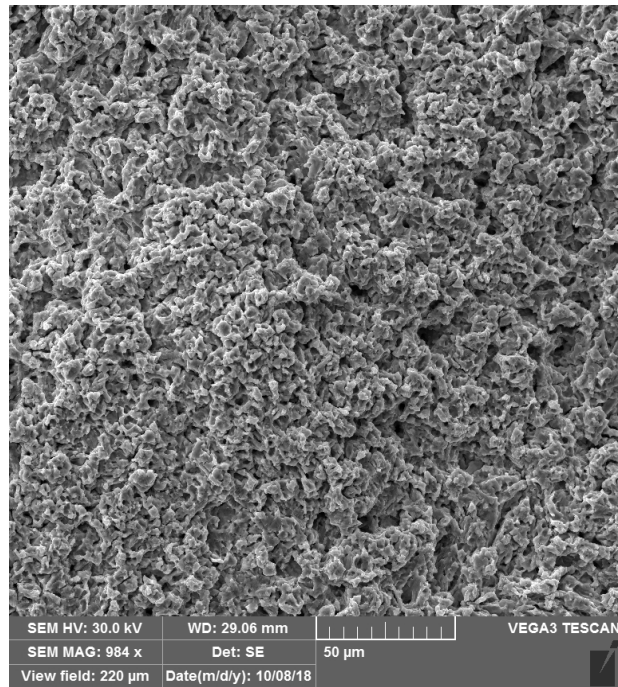
**4.1.2.3.2.3 Morfologia structurii erodate**

Ridicarea temperaturii de revenire la 400 °C conduce la o accelerare a procesului de precipitare a fazei  $\alpha$  din faza  $\beta$  și de coalescență a acestor particule îndeosebi în zona limitelor dintre grăunți (fig.4.28 a) cu consecințe asupra diminuării tensiunilor remanente și a durității materialului. Aceste modificări structurale sunt responsabile de creșterea numărului de caverne care afectează suprafața materialului testat la eroziune prin cavitație (fig.4.28 b...e).

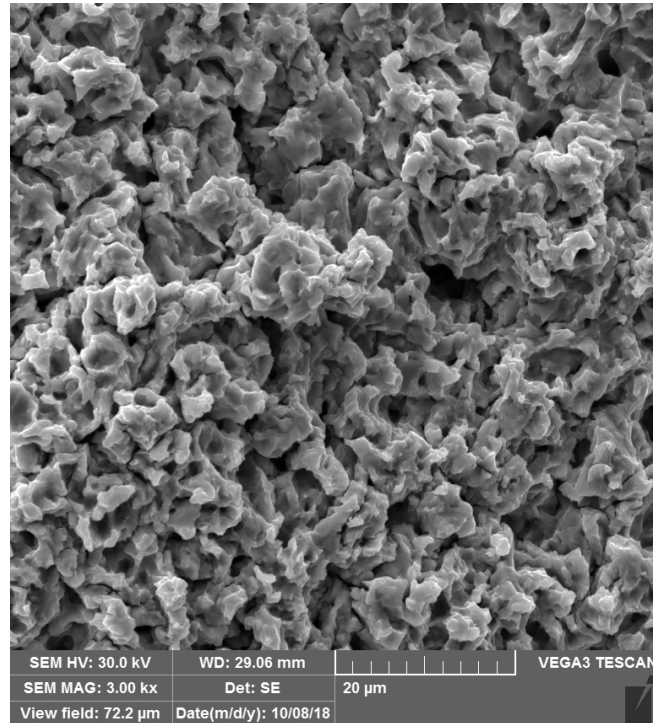
**-a-****-b-**



-c-



-d-



-e-

Fig. 4.28 Imagini SEM obținute la microscopul electronic cu baleiaj, după 165 minute de expunere la cavitație

#### 4.1.2.4 Călirea volumică de la 800 °C cu revenire la 600 °C

##### 4.1.2.4.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig.4.29 și 4.30 sunt prezentate rezultatele înregistrate prin testarea la cavitație a celor trei probe. Acestea sunt exprimate prin valorile experimentale și prin curbele de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , construite analitic cu relațiile (3.4) și (3.5). Totodată, pentru că evaluarea comportării și rezistenței la atacul cavitației se face pe baza parametrilor specifici, în aceste diagrame sunt afișate și valorile acestora, respectiv  $MDE_{max}$ ,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$ .

Datele din diagramă și tabelul din fig.4.31 arată că exepriimentul a fost realizat cu acuratețe. Acest lucru este dovedit de banda de dispersie, intervalul de toleranță, în care sunt cuprinse valorile experimentale, de 99 % și valoarea erorii standard de estimare de 0.289.

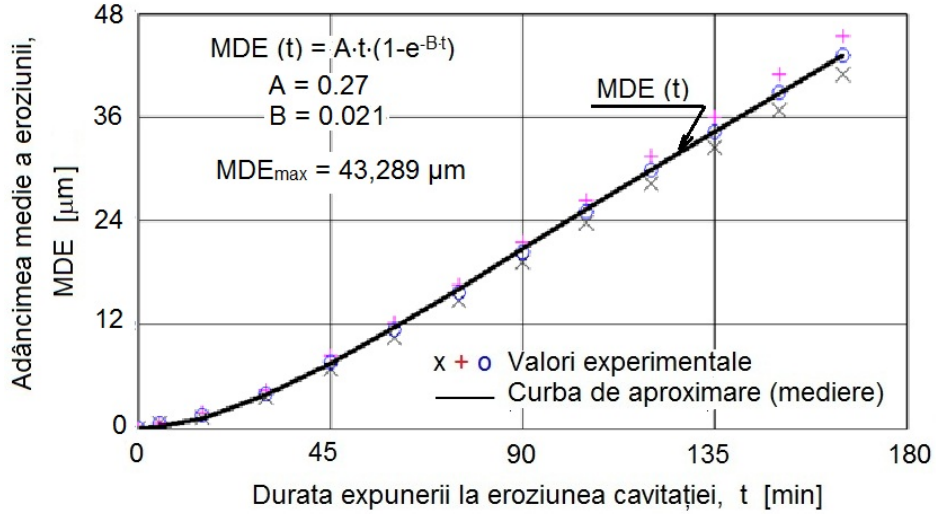


Fig. 4.29 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

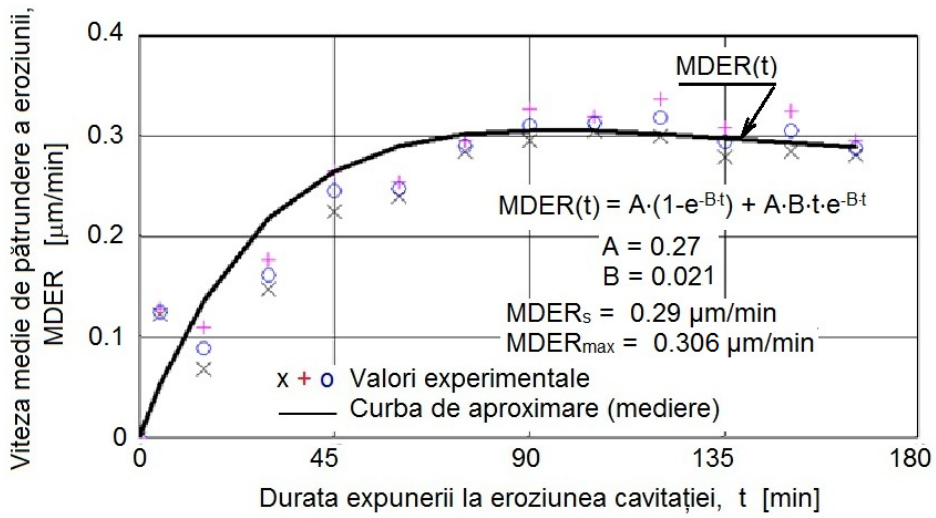


Fig. 4.30 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației



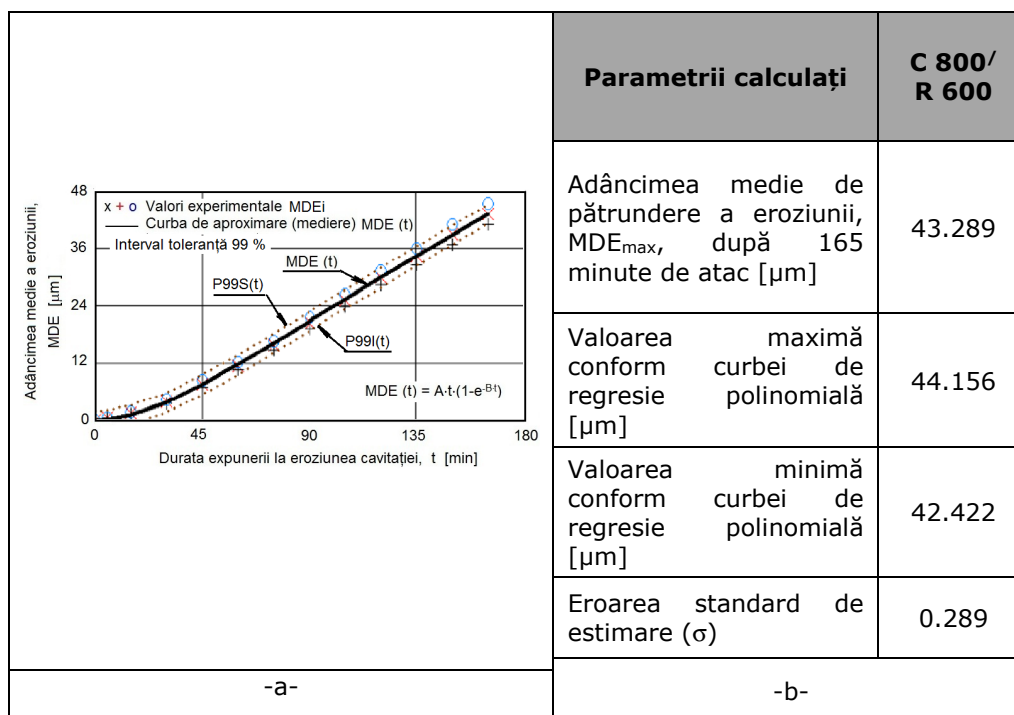


Fig. 4.31 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Concluziile ce se desprind din analiza dispersiei punctelor experimentale, pentru adâncimea medie cumulată MDE și pentru viteza medie de eroziune MDER, ale celor trei probe tesate, diferențele dintre valorile experimentale ale celor trei probe și evoluțiile curbelor de mediere MDE(t), fig.4.29, respectiv MDER(t), fig.4.30, sunt similare celor precizate la tratamentele termice anterioare. Considerăm că și în acest caz duritatea de 133.8 HV5 și modificarea structurii, rezultate în urma tratamentului termic, sunt responsabile de această comportare și rezistență. Diferența de 0.16  $\mu\text{m}/\text{min}$  (vezi fig.4.30) dintre valoarea finală  $MDER_s$  și cea maximă  $MDER_{max}$  este una normală și în intervalul acceptabil pentru un proces hidrodinamic de complexitatea cavitației [45], [74], [79], [89].

#### 4.1.2.4.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

##### 4.1.2.4.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

Efectul tratamentului termic de călire de la 800 °C și revenire la 600 °C, asupra comportării și rezistenței alamei CuZn39Pb3 la eroziunea cavitației, este evidențiat și de evoluția degradării în ariile suprafețelor expuse, ale celor trei probe, conform imaginilor fotografice din fig.4.32 și 4.33, dar și de imaginea SEM din fig.4.34.

Din fig.4.32 rezultă că încă din primele 15 minute se accentuează distrugerea prin mecanismul deformărilor, fisurilor și crearea a pittingurilor, ca după 90 minute de atac al cavitației, când curba vitezei de eroziune MDER(t) realizează un maxim, fig. 4.30, aria erodată să fie bine conturată. Pe măsura creșterii duratei de expunere la cavitație, până la finalizarea testului, eroziunea se accentuează doar prin degradarea în profunzime, cu accentuarea creșterii numărului de striațiuni (caverne) la periferia ariei erodate.

Imaginile din fig.4.33 arată asemănarea dintre eroziunile produse în suprafețele celor trei probe, după cele 165 minute, când durata de expunere la atacul cavitației s-a epuizat.

Imaginea SEM din fig.4.34a arată modul de propagare al rețelelor de fisuri și de rupere, prin formare de caverne, ca un răspuns al structurii la impactul cu microjeturile generate la implozia bulelor de cavitație.

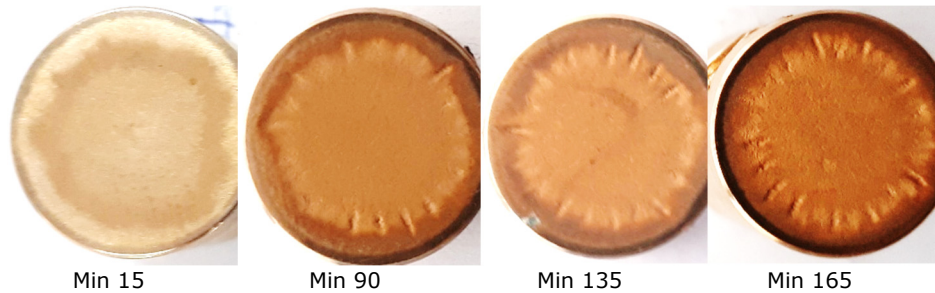
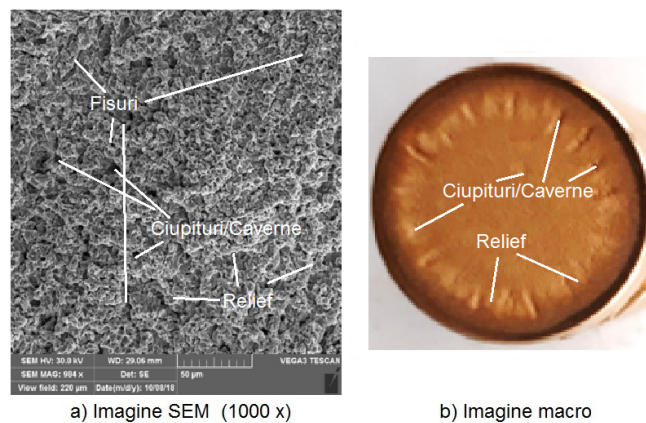


Fig. 4.32 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 1)



Fig. 4.33 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute



a) Imagine SEM (1000 x)

b) Imagine macro

Fig. 4.34 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (**Proba 1**) (imagini din zona interioară a suprafeței cavitate)

#### 4.1.2.4.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

Forma profilogramei, din fig. 4.35, cu salturi importante și valorile parametrilor rugozității, arată, că spre deosebire de tratamentele anterioare, în acest caz tratamentul termic de călire de la 800 °C, cu revenire la 600 °C, nu are un efect spectaculos asupra materialului suprafeței, din punct de vedere al rezistenței uniforme în toate punctele de contact cu microjeturi cavitaționale. Însă, valorile medii, de la subsolul imaginii, reconfirmă apropierea valorică dintre parametrul  $R_z$  și adâncimea medie cumulată  $MDE_{max}$ , obținută prin calcul la finalizarea testului de cavitație (a se vedea datele din fig.4.29 și 4.31 pentru  $MDE_{max}$ , respectiv cea din subsolul imaginii din fig.4.36 pentru  $R_{zmed}$ )

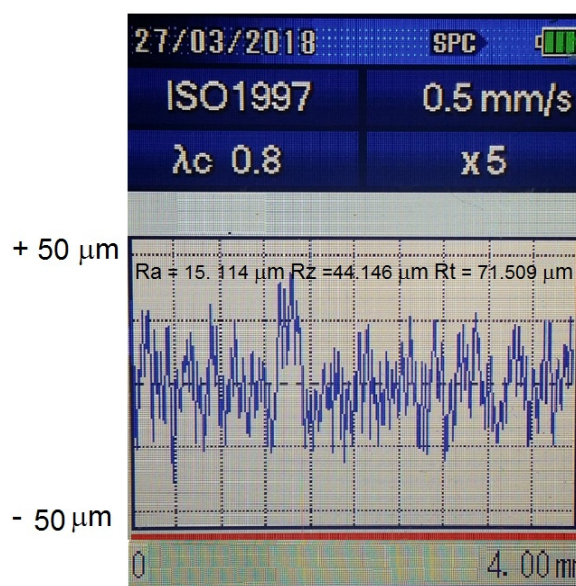


Fig. 4.35 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare **Proba 1**)

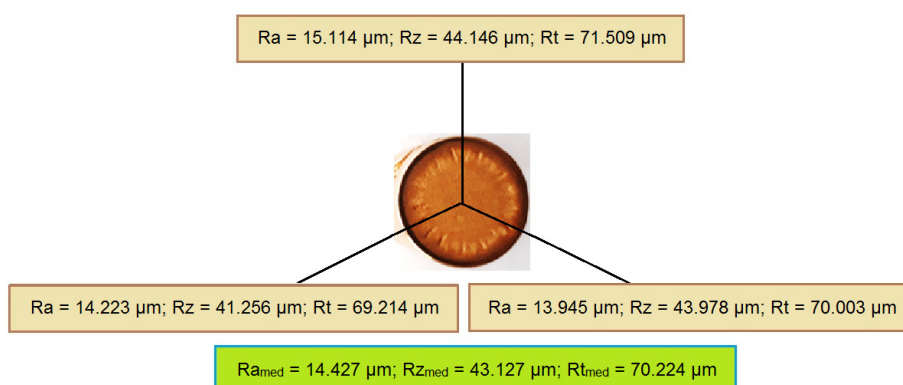


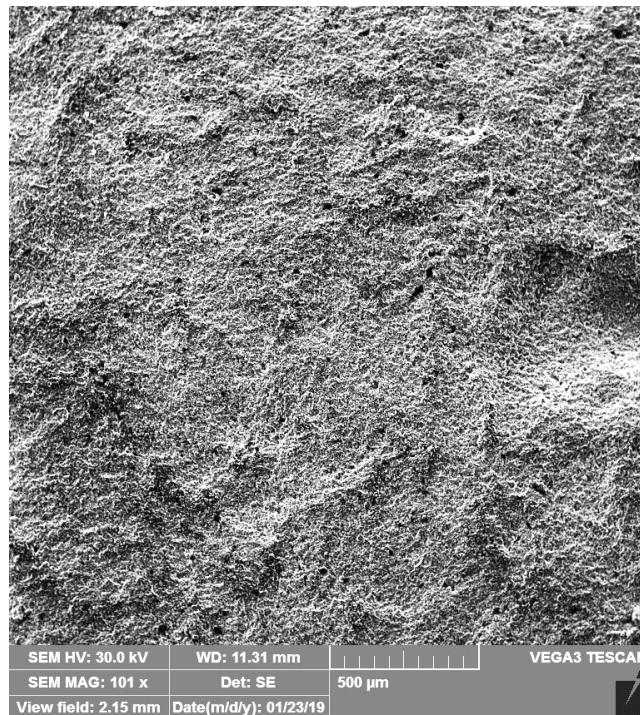
Fig. 4.36 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.35 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (**Proba 1**)

#### 4.1.2.4.2.3 Morfologia structurii erodate

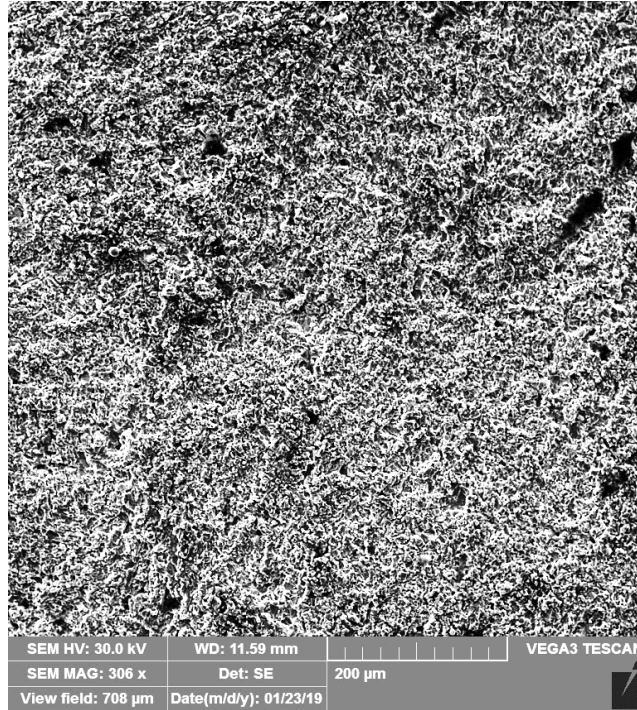
Tratamentul de revenire la 600 °C conduce la alte două procese care se derulează în paralel: pe de o parte, are loc o creștere a solubilității fazei  $\alpha$  în faza  $\beta$  care provoacă o scădere ușoară a cantității de cristale de fază  $\alpha$ , iar pe de altă parte, la o coalescență mai intensă a cristalelor mici, aciculare, de  $\alpha$ , cu formare în principal de grăunți mai mari, poligonali Fig. 4.37 a). Imaginile topografiei suprafeței cavități (fig. 4.37 b...e) concordă pe deplin cu rezultatele anterioare.



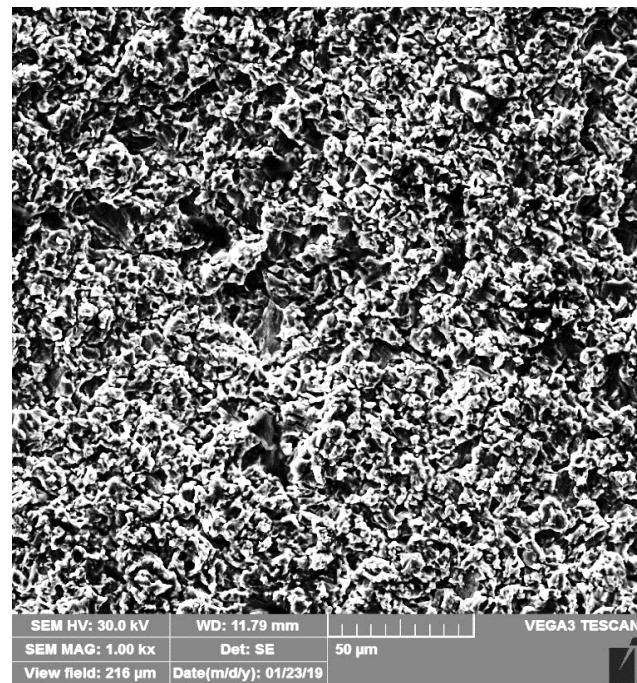
-a-



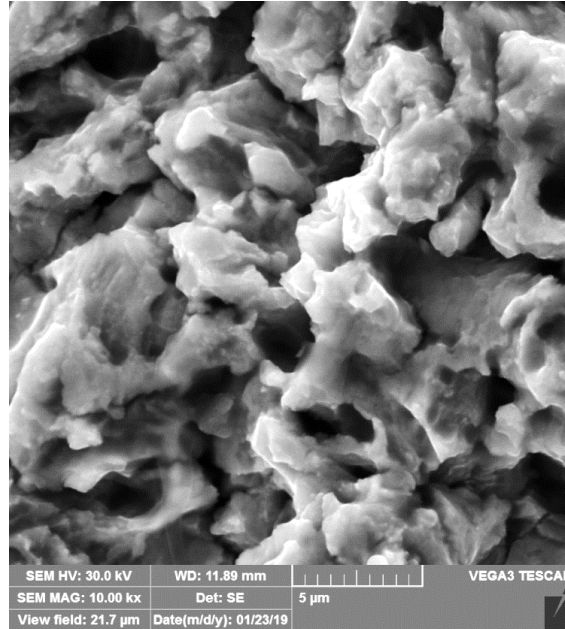
-b-



-C-



-d-



-e-

Fig. 4.37 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b...e), după 165 minute de expunere la cavitație

#### 4.1.3 Compararea rezultatelor cercetării

În diagramele din fig. 4.38 și 4.39 sunt comparate curbele MDE(t) și MDER(t), aferente celor 4 regimuri de tratament, cu scopul evidențierii diferențelor de comportare și rezistență pe parcursul expunerii la atacul cavitației vibratoare.

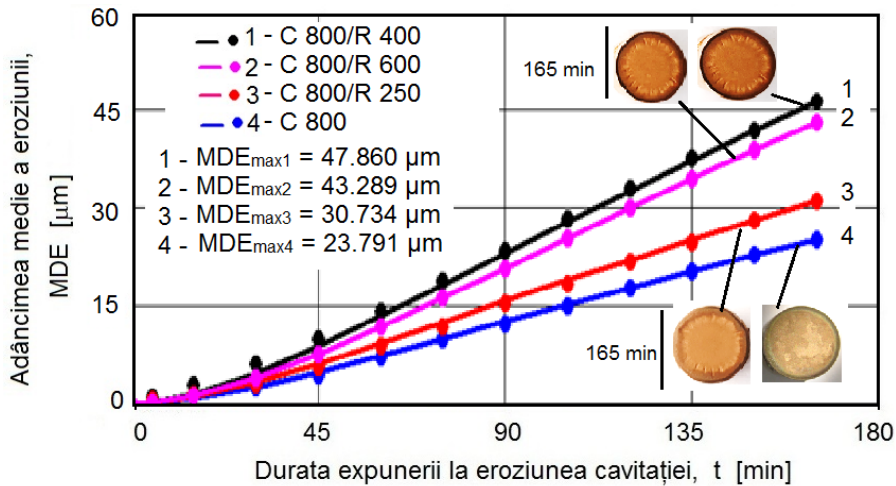


Fig. 4.38 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației

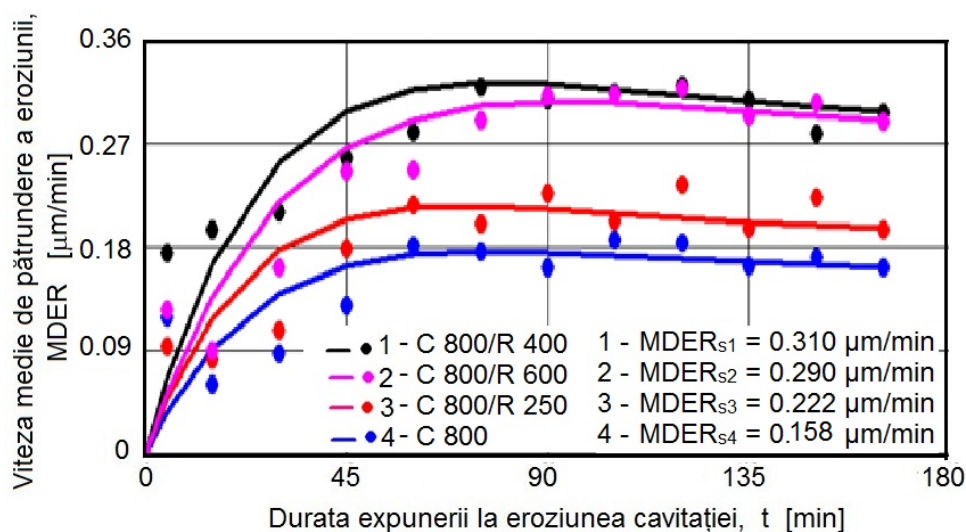


Fig. 4.39 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata de cavitație

Din punct de vedere al evoluției în timp a curbelor  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , forma acestora este asemănătoare, diferențele fiind de pantă (în cazul curbelor  $MDE(t)$ ) și de valoarea vitezei spre care curba  $MDER(t)$  tinde asimptotic spre stabilizare. Aceste asemănări arată că prin cele patru regimuri de tratament termic volumic structurile rezultate sunt caracterizate de creșterea gradului de finisare, cu distribuție omogenă a proprietăților mecanice în volumul piesei și respectiv în stratul suprafeței erodate. Diferențele dintre valorile proprietăților mecanice, în special ale durtății (vezi tabelul 4.1), sunt exprimate de valorile maxime și de stabilizare, date de curbele  $MDER(t)$  din fig.4.39.

Indiferent de curba specifică, la care ne raportăm, se constată că cea mai bună comportare și rezistență la eroziunea generată de cavitația vibratoare este obținută prin tratamentul termic de călire de la 800 °C (care are o durtate medie de 167 HV5), iar cea mai scăzută pentru călirea de la 800 °C urmată de revenire la 400 °C (care are o durtate medie de 128 HV5). Însă, după modul în care interferează valorile experimentale ale vitezelor de eroziune (fig.4.39), la anumite durate de cavitație (exceptând intervalul 0-30 minute în care degradarea stratului din suprafață este afectat de zgura și rugozitatea suprafeței expuse [9], [13]), se poate afirma că prin călire de la 800 °C cu revenire la 250 °C comportarea și rezistența la eroziunea cavitației sunt apropiate celor obținute prin călire la 800 °C.

Fig.4.40 arată clar sporul semnificativ de comportare și rezistență adus prin cele patru regimuri de tratament termic, față de ale alamei în stare de livrare (analizată în capitolul 3). Valorile maxime și de stabilizare, spre care tind curbele specifice celor patru regimuri de tratament termic, sunt net inferioare celor realizate de curba  $MDER(t)$  aferentă stării de livrare. Acest spor este în primul rând efectul durtății HV5.

În histograma din fig.4.41 și în tabelul 4.2 sunt comparate valorile parametrilor utilizați de Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [9] și recomandați de normele ASTM G32 [99], în evaluarea rezistenței unei suprafețe la eroziunea prin cavitație generată în același aparat.

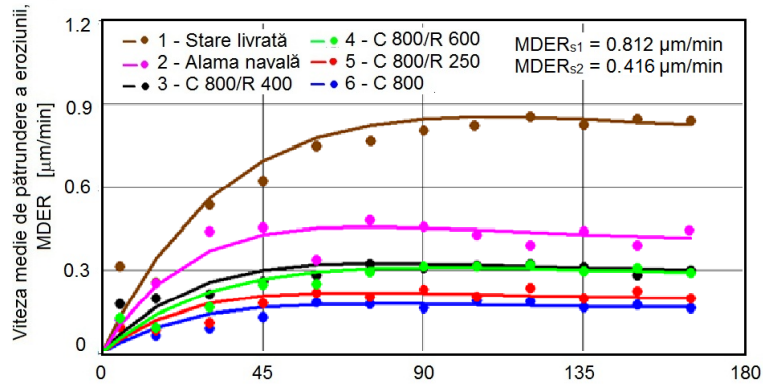


Fig. 4.40 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

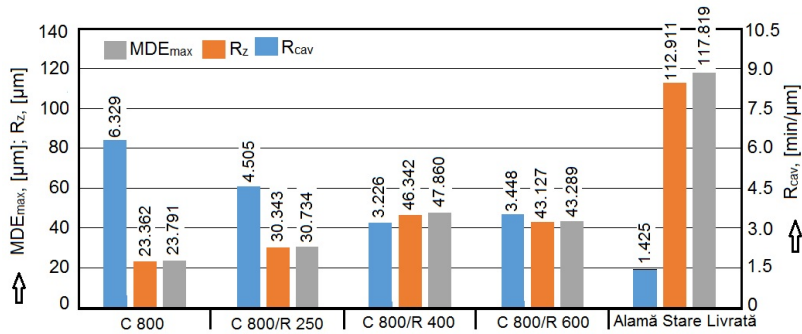


Fig. 4.41 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

Tabelul 4.2 Compararea cu parametrii tratamentului de călire

Materialul de referință	Parametrul eroziunii cavitaționale	Variația față de parametrii materialului de referință [%]			
		C 800 °C	C 800 °C+ R 250 °C	C 800 °C+ R 400 °C	C 800 °C+ R 600 °C
Alama stare livrată	MDE <sub>max</sub> [μm]	↓395.22 (4.95x)	↓283.35 (3.83x)	↓146.17 (2.46x)	↓172.17 (2.72x)
	R <sub>cav</sub> [min/μm]	↑313.92 (4.13x)	↑277.67 (3.77x)	↑161.94 (2.61x)	↑180 (1.8x)
	R <sub>z</sub> [μm]	↓383.31 (4.83x)	↓272.11 (3.72x)	↓143.64 (2.43x)	↓161.81 (2.61x)
C 800 °C	MDE <sub>max</sub> [μm]	-	↑29.18	↑101.17	↑81.96
	MDER <sub>s</sub> [μm/min]	-	↓40.51	↓96.2	↓83.54
	R <sub>z</sub> [μm]	-	↑29.88	↑98.36	↑84.6

↑ - creștere; ↓ - scădere



Și aceste comparații arată că cea mai însemnată creștere de rezistență la eroziunea cavitației, față de starea de livrare, este obținută prin călirea de la 800 °C (funcție de parametrul de referință creșterea este de circa 4...5 ori). În ansamblu, prin cele patru regimuri de tratament termic (vezi tabelul 4.2), creșterea rezistenței la eroziunea cavitației, evaluată prin valoarea oricăruia din cei trei parametri ( $R_{cav}$ ,  $MDE_{max}$  sau  $R_z$ ) este de 1,8 ori până la 4,95 ori.

Datele din tabelul 4.2 arată și sporul de rezistență realizat doar prin călire de la 800 °C, față de celelalte trei regimuri, la care s-a făcut și revenire. După cum s-a afirmat mai sus se observă că prin revenire la 250 °C se obține o rezistență superioară tratamentelor de revenire la 400 °C și 600 °C, dar mai scăută decât cea conferită doar de călire. Aceste diferențe sunt efectul durității rezultate prin tratamentele termice aplicate (vezi tabelul 4.1)

În histograma din fig.4.42 și tabelul 4.3 este realizată evaluarea rezistenței conferite de cele patru regimuri de tratament termic, prin compararea valorilor celor doi parametri de referință  $R_{cav}$  și  $MDE_{max}$ , cu ale materialelor etalon, din Laboratorul de cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Acestea sunt:

- oțelul inoxidabil OH12NDL, cu structură martensitică, folosit la paletel turbinelor Kaplan și bulb de la Centralele Hidroelectrice Porțile de Fier I și II [2, 3], [13], coniderat ca având o bună rezistență la eroziunea cavitației vibratoare;
- bronzul naval de înaltă rezistență CuNiAl I- RNR (cu bună rezistență la cavitație) și alama navală (cu rezistență acceptabilă), recomandate de Registrul Naval Român [105] (vezi tabelul 1.5 și fig. 1.10) și utilizate în fabricarea elicelor vapoarelor maritime (în special CuNi Al I- RNR), dar și a celor fluviale (mai rar bronzul, dar foarte des alama navală) [37], [103,104].

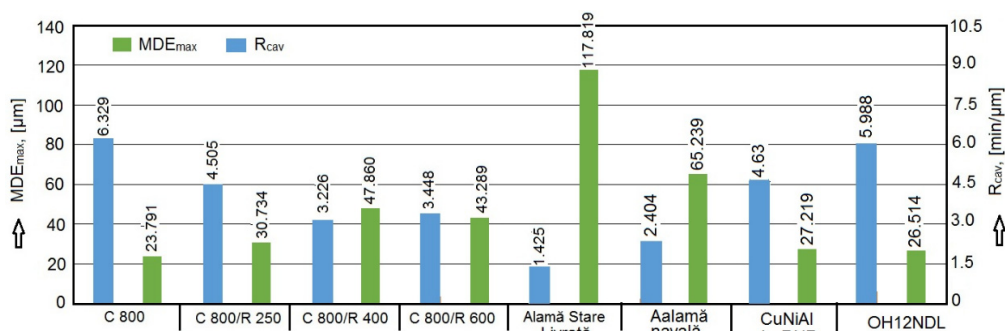


Fig. 4.42 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

Datele din histogramă arată că, prin călire, alama CuZn39Pb3 dobândește o rezistență ce depășește pe cea a materialelor de referință. Conform datelor din tabelul 4.3, adâncimea maximă de eroziune scade cu 11.45 % față de a oțelului OH12NDL, cu 14.41 % față de a bronzului CuNiAl I-RNR și cu 174.22 % față de a alamei navale. După valorile parametrului  $R_{cav}$  se constată că rezistența la eroziunea cavitației crește cu 5.7 % față de a oțelului inoxidabil OH12NDL, cu 36,71 % față de a bronzului CuNiAl I-RNR și cu 163,29 % față de a alamei navale.

Datele din tabelul 4.3 arată că prin tratamentele termice de călire urmată de revenire la 400 °C și la 600 °C, raportat la oțelul inoxidabil și la bronzul CuNiAl I-RNR nu se înregistrează sporul de rezistență dorit. Dimpotrivă rezistența este mai mică cu

circa 59-80 %, după valorile adâncimii de eroziune ( $MDE_{max}$ ), respectiv cu 34-85 % după valorile parametrului  $R_{cav}$ .

De remarcat că, prin călire urmată de revenire la 250 °C, după  $MDE_{max}$  rezistența la cavitație este mai mică, dar după  $R_{cav}$  este semnificativ mai mare.

Tabelul 4.3 Compararea cu parametrii materialelor de referință

Materialul de referință	Parametrul eroziunii cavitaționale	Variația față de parametrii materialului de referință [%] [x]			
		C 800 °C	C 800 °C+ R 250 °C	C 800 °C+ R 400 °C	C 800 °C+ R 600 °C
OH12NDL	$MDE_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	↓ 11.45	↑ 15.92	↑ 80.51	↑ 63.27
	$R_{cav}$ [min/ $\mu\text{m}$ ]	↑ 5.7	↓ 28.74	↓ 85.62	↓ 73.65
CuNiAl I-RNR	$MDE_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	↓ 14.41	↑ 12.91	↑ 75,83	↑ 59.04
	$R_{cav}$ [min/ $\mu\text{m}$ ]	↑ 36.71	↑ 0.47	↓ 43.51	↓ 34.25
Alama a navală	$MDE_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	↓ 174.22	↓ 112.27	↓ 36.31	↓ 50.71
	$R_{cav}$ [min/ $\mu\text{m}$ ]	↑ 163.29	↑ 93.49	↑ 34.19	↑ 43.44
Alama stare livrată	$MDE_{max}$ [ $\mu\text{m}$ ]	↓ 395.22 (4.95x)	↓ 283.35 (3.83x)	↓ 146.17 (2.46x)	↓ 172.17 (2.72x)
	$R_{cav}$ [min/ $\mu\text{m}$ ]	↑ 313.92 (4.13x)	↑ 277.67 (3.77x)	↑ 161.94 (2.61x)	↑ 180 (1.8x)

↑ - creștere; ↓ - scădere

În fapt, aceste diferențe sunt în ecartul erorilor, având în vedere complexitatea mecanismului de răspuns al materialului la solicitările ciclice, repetate ale microjeturilor cavitaționale, dependent de proprietățile mecanice, fizico-chimice și structurale [29, 30], [39], [54]. Însă, prin comparație cu oțelul inoxidabil OH12NDL rezistența este mai scăzută, dar această scădere nu este atât de semnificativă ca și la celelalte două tratamente termice, cu revenire la 400 °C și 600 °C.

Pentru edificare, în histogramă și în tabelul 4.3 sunt afișate și valorile celor doi parametri, aferenți alamei în stare de livrare, care arată că, deși în raport cu materialele de referință sporul de rezistență nu este cel așteptat, prin aceste tratamente termice volumice se obțin creșteri importante de rezistență la cavitație, motiv pentru care ele rămân în continuare soluții tehnologice de aplicare la piese solicitate cavitațional.

#### 4.1.4. Concluzii

- ❖ Forma curbelor  $MDE(t)$ , ca evoluție, cu durata atacului cavitației, este specifică materialelor cu o bună rezistență la eroziunea cavitației, având tendința de a se stabiliza la valoarea maximă;

- ❖ Evoluția ariei erodate, cu durata atacului cavitației, în suprafața expusă, cu formarea inelului periferic și al cavernelor dispuse stelar, respectă același mecanism, indiferent de tratamentul termic aplicat; diferența fiind dată de timpul la care se vizualizează conturul, care, conform analizei efectuate pe baza curbelor MDER(t), corespunde valorii maxime a vitezei dată de aceste curbe;
- ❖ Diferențele dintre adâncimile medii cumulate maxime de eroziune (medie a celor trei probe testate, din fiecare stare de tratament termic,  $MDE_{max}$ ) și ale rugozității medii  $R_{zmed}$ , arătate în analizele efectuate pe fiecare tratament termic, pot suferi modificări în creștere sau în descreștere, cauzate de valorile parametrului  $R_z$ , care s-a determinat cu aparatul Mitutoyo, în diverse zone din ariile erodate, pe fiecare din cele trei probe. Datele obținute certifică folosirea acestui parametru în evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației, deoarece este cel mai aproape de valoarea adâncimii medii cumulate de la finalul testelor de cavitație;
- ❖ Imaginile SEM arată că rețelele de fisuri sunt generate și progresează cu preponderență la frontiera dintre constituenții structurali;
- ❖ Gradul de degradare al suprafeței expuse la atacurile microjeturilor cavitaționale este dependent de tipul structurii, gradul de finisare și omogenitate, precum și de valoarea durtății suprafeței, obținută prin aplicarea tratamentelor termice;
- ❖ Raportat la starea de livrare, cea mai ridicată rezistență la eroziunea cavitației se obține prin călire de la 800 °C, care determină o scădere a adâncimii cumulate maxime  $MDE_{max}$  de până la 5 ori, respectiv o creștere a rezistenței la cavitație, exprimată de valorile parametrului  $R_{cav}$ , de peste 4 ori; iar cea mai scăzută rezistență este realizată de probele călite de la 800 °C + revenire la 400 °C, caracterizată de o scădere a adâncimii cumulate maxime  $MDE_{max}$  de până la 2,5 ori, respectiv o creștere a rezistenței la cavitație, exprimată de valorile parametrului  $R_{cav}$ , de peste 2,6 ori;
- ❖ Compararea cu materialele etalon arată că, indiferent de materialul etalon, prin călire de la 800 °C rezistența la eroziunea cavitației crește. În schimb, prin tratamentele de călire urmate de revenire (oricare ar fi temperaturile (250 °C, sau 400 °C, sau 600 °C) rezistența la cavitație este mai mică decât a oțelului inoxidabil OH12NDL și a bronzului naval CuNiAl I-RNR, dar mai mare decât a alamei navale;
- ❖ Rezultatele cercetărilor și evaluările făcute pe baza curbelor specifice sau prin comparație, folosind valorile parametrilor de referință,  $MDE_{max}$ ,  $R_{cav}$  sau  $R_z$ , confirmă necesitatea utilizării tratamentelor termice volumice pentru că alama CuZn39Pb3 își sporește substanțial rezistența la cavitație față de starea de livrare și se poate folosi la piese ce lucrează în curenți cavitaționali cu o intensitate redusă și medie, cum sunt fitingurile, sertarele și corpurile robineților, sertarele vanelor de pe conductele forțate, rotoarele pompelor centrifuge, elicele vapoarelor de apă dulce și unele componente ale aparatelor din sistemele de acționare și alimentări cu apă.

#### 4.2 Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C

##### 4.2.1 Tratamentele termice volumice

În diagrama din fig. 4.43 este prezentată ciclograma celor 3 tipuri de tratamente termice:

- călire de la 700°C (cu o durată de menținere de 60 minute și răcire în apă)-simbolizată **C 700**;
- călire de la 700°C (cu o durată de menținere de 60 minute și răcire în apă), urmată de revenire la 250°C (cu durată de menținere de 60 minute, și răcire în aer) -simbolizată **C 700/R 250**;

- călire de la 700°C (cu o durată de menținere de 60 minute și răcire în apă), urmată de revenire la 500 °C (cu durată de menținere de 60 minute și răcire în aer) -simbolizată **C 700/R 500**.

Procedura folosită a fost similară celei aplicate la tratamentul termic al alamei CuZn39Pb3, în sensul că:

- fiecare tip de tratament termic a fost realizat pe o bară cilindrică cu diametrul de 20 mm și o lungime de 100mm;
- din barele tratate termic s-au realizat 4 probe, trei pentru realizarea testelor de cavitație și una pentru analize metalografice și măsurări de duritate.

În tabelul 4.4 sunt date valorile durității HV0.5 pentru cele 8 măsurători, realizate pe suprafața circulară a probelor netestate la cavitație, precum și valoarea medie a acestora, care, conform cercetărilor anterioare ale lui Hobbs [48, 49], Garcia &Hammit [46], Bordeasu [9], [13], etc, au o principală influență asupra vitezei medii de pătrundere a eroziunii (MDER).

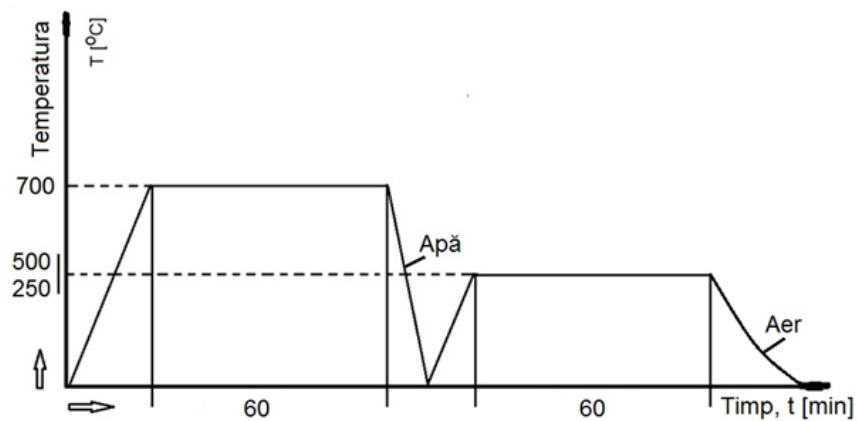


Fig. 4.43 Ciclograma tratamentelor termice

Tabelul 4.4 Duritatea HV0.5

Nr.	Proba 2 C 700/R 250	Proba 1 C 700	Proba 3 C 700/R 500
1	149	153	138
2	138	140	149
3	147	149	148
4	139	154	138
5	153	155	145
6	149	154	145
7	158	163	154
8	158	159	152
<b>Media</b>	<b>148,875</b>	<b>153,375</b>	<b>146,125</b>

Datele din tabelul 4.4 arată că cea mai mare valoare medie HV0.5 se obține prin tratamentul termic de calire de la 700 °C, iar cea mai mică prin călirea de la 700 °C, urmată de revenire la 500 °C.

#### 4.2.2 Rezultatele cercetării la cavitație

Aparatul utilizat pentru generarea cavitației a fost tot aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, prezentat în capitolul 2.

La toate testele, realizate pe cele trei probe ale fiecărui tip de tratament termic, prin procedura folosită, s-au respectat prevederile normelor ASTM G32-2010 și cutuma laboratorului.

Lichidul în care s-a generat cavitația este același ca și la testele efectuate anterior, apa, a cărei temperatură, pe durata atacului cavitației, s-a menținut la valoarea  $22 \pm 1$  °C.

##### 4.2.2.1 Călirea volumică de la 700°C

##### 4.2.2.1.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

Rezultatele testelor de cavitație, realizate pe cele trei probe, sunt prezentate prin valorile obținute pe fiecare din cele 12 perioade de testare și prin curbele de aproximare/mediere  $MDE(t)$ , fig. 4.44, respectiv  $MDER(t)$ , fig.4.45, construite analitic cu relațiile (2.1), prezentate în capitolul 2. În cele două diagrame sunt afișate și valorile parametrilor  $MDE_{max}$ ,  $MDER_s$  și  $MDER_{max}$ , folosiți pentru analiză comportării și rezistenței conferite de tratamentul termic.

În diagrama și tabelul din fig.4.46 sunt afișate datele prelucrarilor statistice (intervalul de toleranță de 99 % al dispersiei valorilor experimentale față de curba de mediere și valoarea de 0.194 a erorii standard de estimare) care arată ca testele de cavitație, derulate pe cele trei probe, din cadrul programului experimental, au respectat procedurile standard descrise de ASTM G32-2010 și cutuma laboratorului și că parametrii funcționali ai aparatului vibrator au fost menținuți la aceleași valori, indiferent de probă.

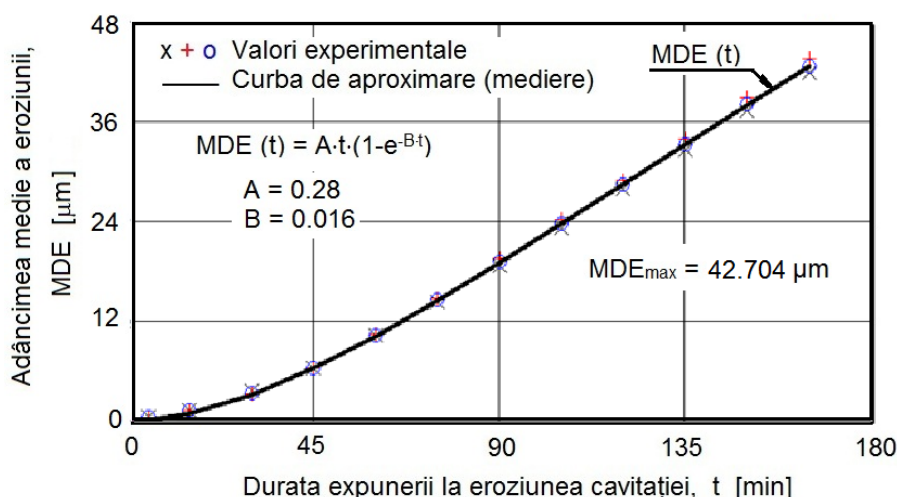


Fig. 4.44 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

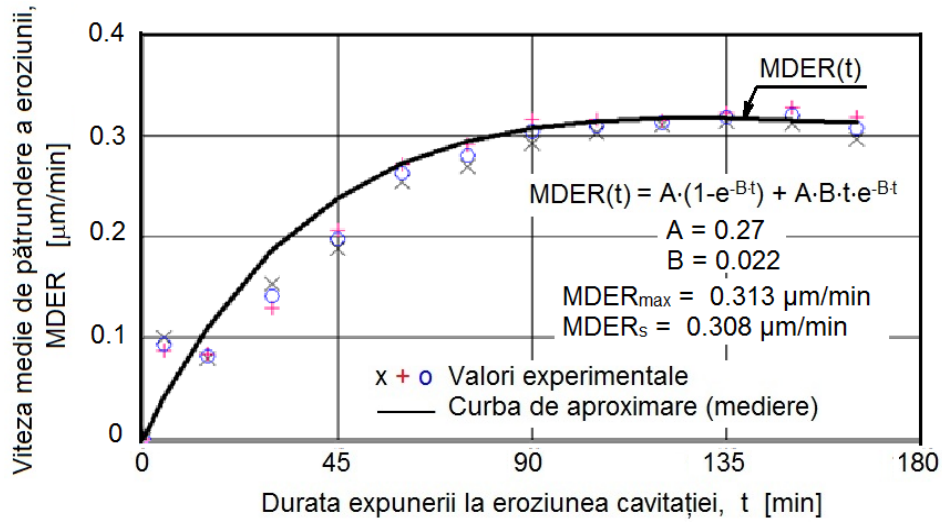


Fig. 4.45 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

		Parametrii calculați	C 700
		Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, $MDE_{max}$ , după 165 minute de atac [ $\mu\text{m}$ ]	42.704
		Valoarea maximă conform curbei de regresie polinomială [ $\mu\text{m}$ ]	43.287
		Valoarea minimă conform curbei de regresie polinomială [ $\mu\text{m}$ ]	42.101
		Eroarea standard de estimare ( $\sigma$ )	0.194
	-a-	-b-	

Fig. 4.46 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Diagramele specifice ale adâncimii medii de eroziune, fig. 4.44 și ale vitezei medii de pătrundere a eroziunii, fig.4.45, arată o foarte mică diferență între valorile experimentale (uneori chiar identice, cum sunt cele de la 120 minute, fig.45) și o foarte bună mediere de către curbele analitice MDE(t), respectiv MDER(t). De

asemenea, se observă o diferență foarte mică, de 0.005  $\mu\text{m}/\text{min}$  între valoarea maximă  $\text{MDER}_{\text{max}}$  și cea finală spre care tinde să se stabilizeze  $\text{MDER}_{\text{s}}$ . Aceste constatări, cauzate în primul rând de duritatea suprafeței (159 HV0.5-vezi tabelul 4.4) sunt specifice materialelor cu omogenitate structurală și grad ridicat de finețe care conferă bune comportamente și rezistență la eroziunea produsă de cavitația generată cu aparatul vibrator al Laboratorului de cavitație al Universității Politehnica Timișoara [1], [13], [45], [79], [89].

#### 4.2.2.1.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

În acest capitol se analizează modul de degradare a ariei suprafeței expuse, pe baza imaginilor fotografice de la finalul duratei totale de atac al cavitației și din timpul cavitației, realizate la timpi considerați semnificativi.

##### 4.2.2.1.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

În fig. 4.47 sunt prezentate imagini fotografice ale extinderii eroziunii în aria suprafeței expuse. Imaginile, prezentate doar pentru una dintre probe (proba nr.3), sunt exemplificative și pentru celelalte două probe, deoarece modul de manifestare a evoluției eroziunii este similar, după cum se poate constata din imaginile prezentate pentru cele trei probe, în fig. 4.48, realizate la finalizarea testului de cavitație (165 minute de atac al cavitației). Aceste imagini sunt expresia efectului tratamentului termic de călire volumică de la 700  $^{\circ}\text{C}$ , asupra comportării și rezistenței suprafețelor probelor la solicitările ciclice ale microjeturilor cavitaționale.

Imaginile din fig.4.47, arată că după 15 minute, de solicitare cavitațională în aria suprafeței, degradarea este caracterizată de o mătuire extinsă specifică suprafețelor cu multiple pittinguri/ciupituri, rețele de fisuri și deformații plastice [9], [40], [60]. După acest timp, eroziunea se manifestă puternic și în structură, astfel încât la 120 minute de solicitare cavitațională, când viteza medie de eroziune  $\text{MDER}$ , conform  $\text{MDER}(t)$ , fig.4.45, atinge valoarea maximă, se formează inelul periferic, cu caverne vizibile, sub formă de striații spre periferia ariei erodate.

Imaginile din fig.4.48 arată că nu există diferențe semnificative, între suprafețele erodate ale celor trei probe, din punct de vedere al ariei erodate și al modului de pătrundere a eroziunii în structura materialului.

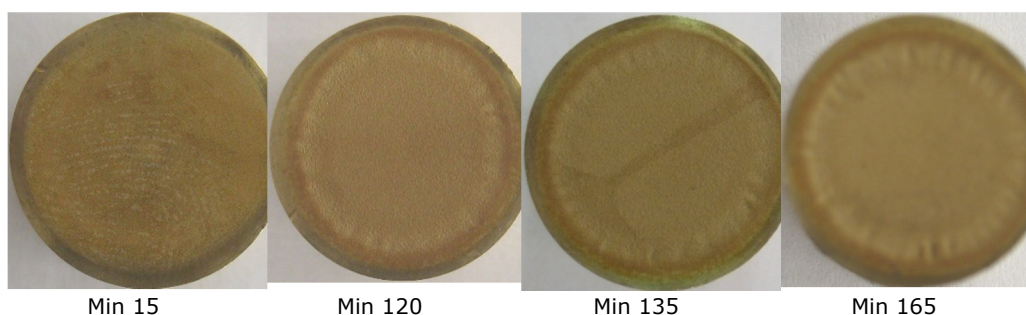


Fig. 4.47 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)



Fig. 4.48 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A 480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165 minute

În imaginea SEM din fig.4.49, corelat cu imaginea macroscopică (atașată), sunt puse în evidență fisurile, cavernele și golurile create prin expulzarea grăunților. Acestea arată modul de pătrundere a eroziunii în structura materialului, rezultată prin tratamentul termic de călire de la 700 °C, precum și răspunsul proprietăților mecanice, în special al durității, la presiunile de impact cu microjeturile cavitaționale.

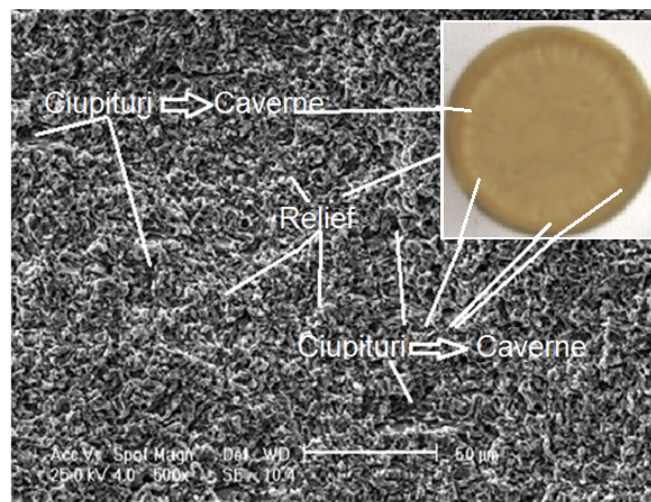


Fig. 4.49 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) din suprafața expusă după 65 minute (macro) – **Proba 1**

#### 4.2.2.1.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

În fig.4.50, este dată o profilogramă arbitrar aleasă, înregistrată pe una dintre cele trei probe (notată ca fiind proba 3), cu aparatul Mitutoyo, cu scopul punerii în evidență a nivelului parametrilor rugozității ( $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ ). Această profilogramă sugerează aspectul suprafeței erodate, din punct de vedere al distrugerii structurii, care este în concordanță cu imaginile macroscopice din fig.4.47-4.48 și SEM din 4.49, de la 165 minute.

În fig.4.51 sunt afișate valorile parametrilor rugozității, după trei direcții, dispuse la aproximativ 120°, una față de cealaltă, pe una dintre ele fiind valorile din



fig.4.50. Tot aici sunt date valorile mediate ale celor trei parametri, înregistrați pe cele trei direcții.

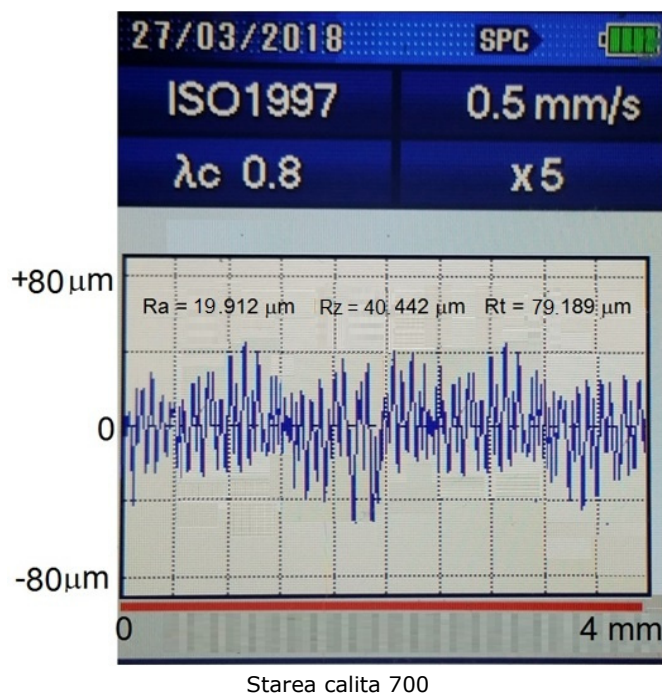


Fig. 4.50 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare - **Proba 3**)

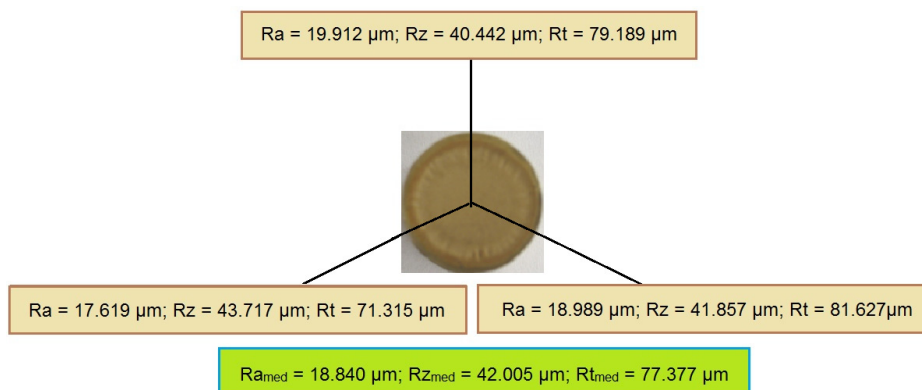
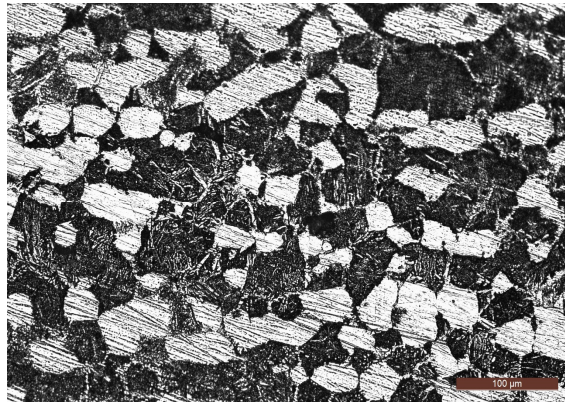


Fig. 4.51 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.50 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (**Proba 3**)

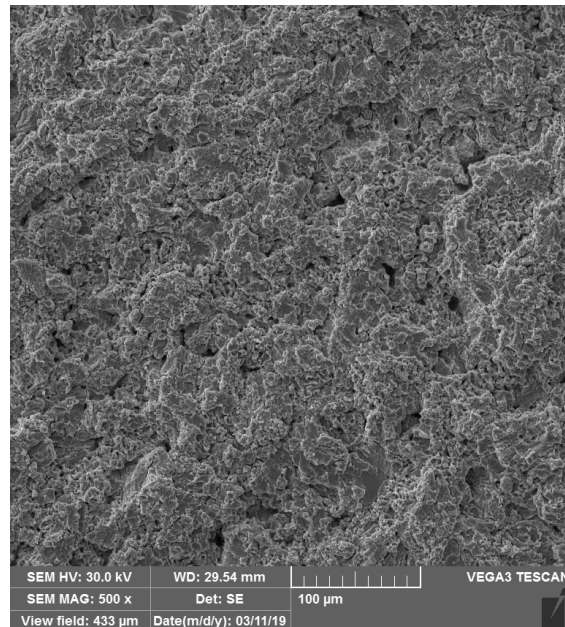
Comparând cu valoarea adâncimii cumulate ( $MDE_{max} = 42,704 \mu\text{m}$ ), medie a celor celor trei probe, fig.4.44, ca și la analizele anterioare, se constată o foarte mică diferență față de valoarea  $R_{zmed} = 42,005 \mu\text{m}$ , firească, una fiind obținută prin calcul, iar alta fiind o medie a valorilor măsurate, reale.

#### 4.2.2.1.2.3 Morfologia structurii erodate

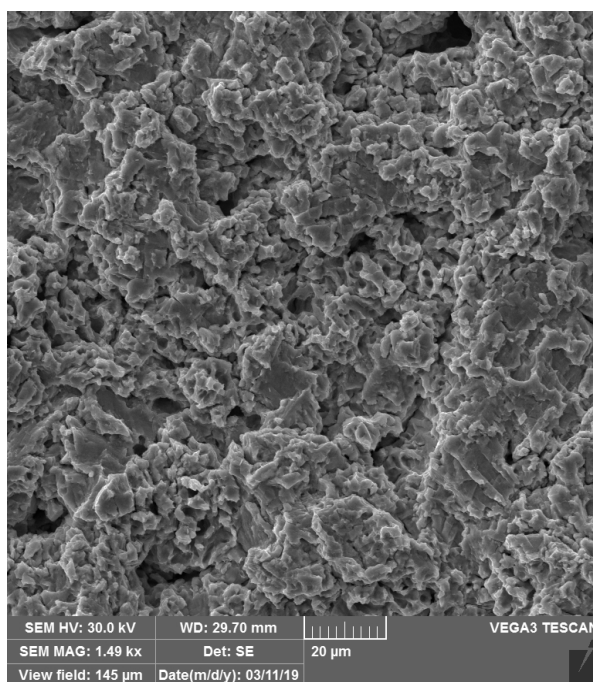
În cursul fazelor de încălzire-menținere a bronzului cu 12% Sn, microstructura inițială alcătuită din soluția solidă  $\alpha$  și din eutectoidul  $\alpha + \delta$  se transformă într-un amestec de soluție solidă  $\beta$  și o anumită proporție de  $\alpha$  rămasă nedizolvată. Prin călire în apă până la temperatura camerei, fenomenele de difuzie fiind estompate, faza  $\beta$  devine suprasaturată, cu aspect apropiat de cel al martensitei din oțeluri, iar faza  $\alpha$  nu suferă transformări (fig. 4.52 a). Duritatea materialului crește în oarecare măsură față de cea specifică stării de livrare (fără tratament termic). Investigarea la microscopul electronic a suprafeței erodate prin cavitație (fig.4.52 b,c) arată că ruperea are un caracter ductil, iar limitele dintre grăunții de soluție solidă  $\alpha$  (fază mai moale și plastică) reprezintă microzonele de inițiere și dezvoltare ulterioară a cavernelor de cavitație.



-a-



-b-



-C-

Fig. 4.52 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație

#### 4.2.2.2 Călirea volumică de la 700 °C cu revenire la 250 °C

##### 4.2.2.2.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig.4.53 sunt prezentate valorile experimentale ale adâncimilor medii cumulate, înregistrate pe cele trei probe testate la cavitație și curba lor de mediere  $MDE(t)$ . În aceeași diagramă este dată și valoarea adâncimii medii cumulate,  $MDE_{max}$ , a celor trei probe, la finalul celor 165 minute de expunere la cavitația vibratoare,

În fig. 4.54 sunt prezentate valorile experimentale ale vitezelor medii de pătrundere a eroziunii, înregistrate pe cele trei probe supuse testului de cavitație și curba lor de mediere  $MDER(t)$ . În diagramă s-au afișat și valorile maxime  $MDER_{max}$  și cea de final,  $MDER_s$ , spre care tinde să se stabilizeze viteza medie de pătrundere a eroziunii. Cele două viteze sunt definite de curba  $MDER(t)$ .

Rezultatele testelor de cavitație, realizate pe cele trei probe, sunt prezentate prin valorile obținute pe fiecare din cele 12 perioade de testare și prin curbele de aproximare/mediere  $MDE(t)$ , fig. 4.44, respectiv  $MDER(t)$ , fig.4.45, construite analitic cu relațiile (2.1), prezentate în capitolul 2. În cele două diagrame sunt afișate și valorile parametrilor  $MDE_{max}$ ,  $MDER_s$  și  $MDER_{max}$ , folosiți pentru analiza comportării și rezistenței conferite de tratamentul termic.

Prelucrarea statistică a datelor experimentale obținute pe cele trei probe, exprimată prin valoarea erorii standard de 0.253 și prin banda de frecvență, corespunzătoare unui interval de toleranță de 99 % (fig.4.55), arată că întregul program de cercetare, derulat pe cele trei probe, a fost realizat în condiții identice și cu acuratețe.

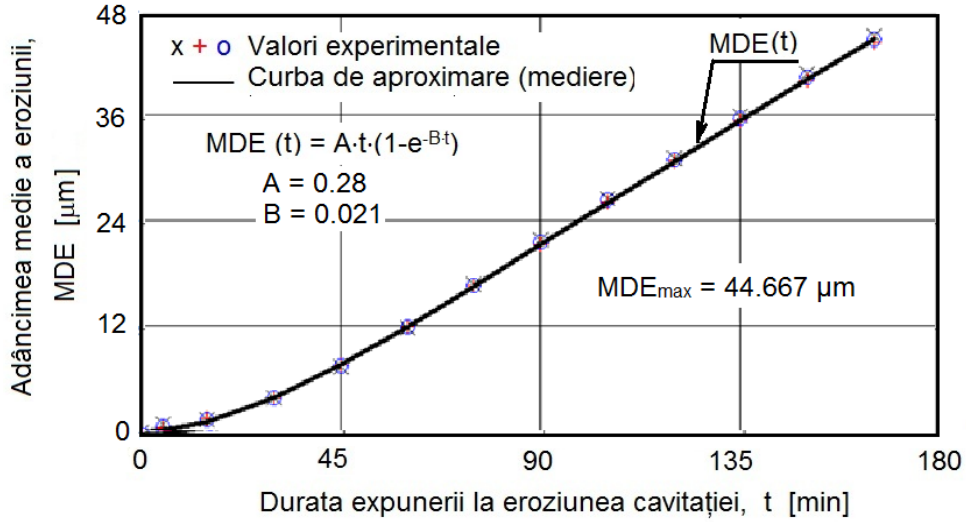


Fig. 4.53 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

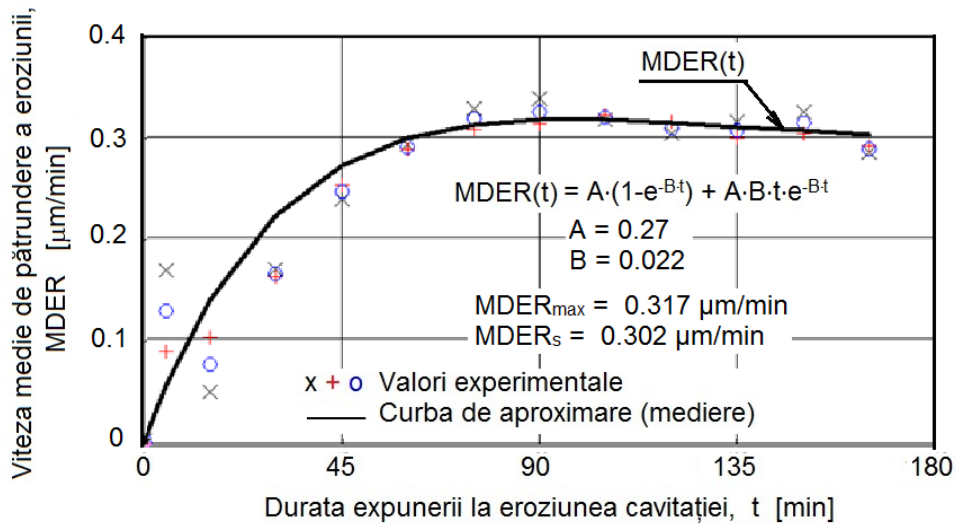


Fig. 4.54 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

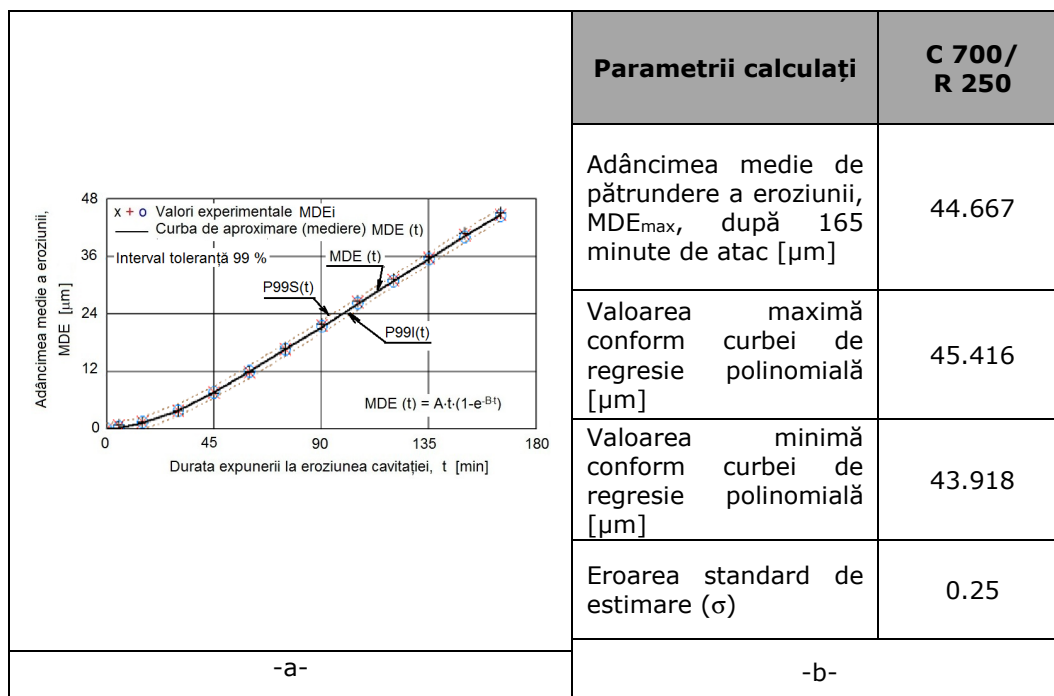


Fig. 4.55 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Conform datelor din diagramele prezentate în fig.4.53 și 4.54, după dispersia valorilor experimentale față de curbele de mediere  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , și valorile identice ale vitezelor medii, înregistrate pe cele trei probe la 30, 60, 105 și 165 minute de solicitare la atacul cavitației, rezultă că prin tratamentul termic volumic de călire de la 700 °C, urmată de revenire la 250 °C s-a obținut o structură cu grad ridicat de finețe, iar proprietățile mecanice, care determină rezistența la cavitație sunt uniform distribuite pe secțiuni și în volumul probei. Toate acestea, și cu o duritate de 148.75 HV0.5, au condus la creșterea rezistenței suprafeței la impactul cu microjeturile cavitaționale, realizate prin implozia bulelor. Din punctul de vedere al evoluției formelor curbelor  $MDE(t)$ , cu liniarizare, începând de la minutul 45, fig. 4.53, și de o ușoară descreștere a curbei  $MDER(t)$ , după minutul 105, de la valoarea  $MDE_{max} = 0.317 \mu\text{m}/\text{min}$  la valoarea finală de palier  $MDE_{max} = 0.302 \mu\text{m}/\text{min}$ , încadrează bronzul astfel tratat în categoria materialelor cu bună comportare și rezistență la cavitația specifică testelor realizate pe acest tip de aparat vibrator [13], [62, 63].

#### 4.2.2.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

##### 4.2.2.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

Evoluția eroziunii cu durata atacului cavitației, ca extindere în aria suprafeței expuse, este dată de imaginile macroscopice, obținute prin fotografiere la timpi semnificativi, fig.4.56 și la finalul testului de cavitație, fig.4.57, iar gradul de degradare, respectiv de pătrundere în structura materialului, este arătat de imaginea SEM, cu imaginea macroscopică atașată, din fig.4.58.

Imaginile din fig.4.56, date doar pentru proba 2, precum și cele din fig.4.57, arată că mecanismul prin care materialul suprafeței răspunde la solcitarea cavitației vibratoare este identic cu cele descrise anterior, din punct de vedere al deformațiilor, formării rețelei de fisuri, ciupituri și caverne, respectiv al delimitării ariei erodate de toată suprafața expusă, prin inelul periferic, specific suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare [59, 60]. Diferența este dată de timpul (90 minute-corespunzător vitezei maxime din fig. 4.54) la care sunt bine conturate inelul periferic și cavernele de pe acesta.

Imaginile din fig. 4.57 arată că degradarea suprafețelor celor trei probe este similară, indicând că pe parcursul testelor parametrii funcționali ai aparatului au fost bine controlați, iar structura, din punct de vedere al granulației și al dispersiei valorilor proprietăților mecanice (în special al durității - vezi tabelul 4.4), a răpuns identic la acest tratament termic.

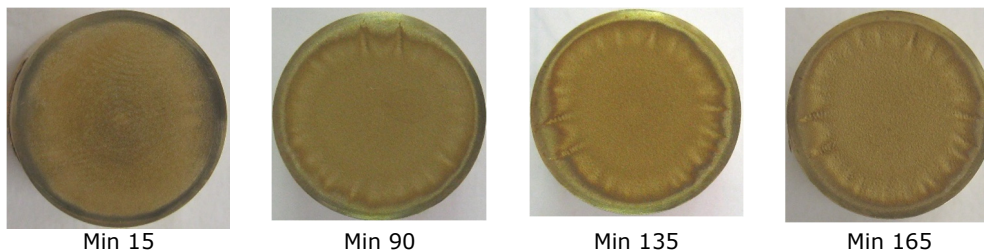


Fig. 4.56 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (**Proba 2**)

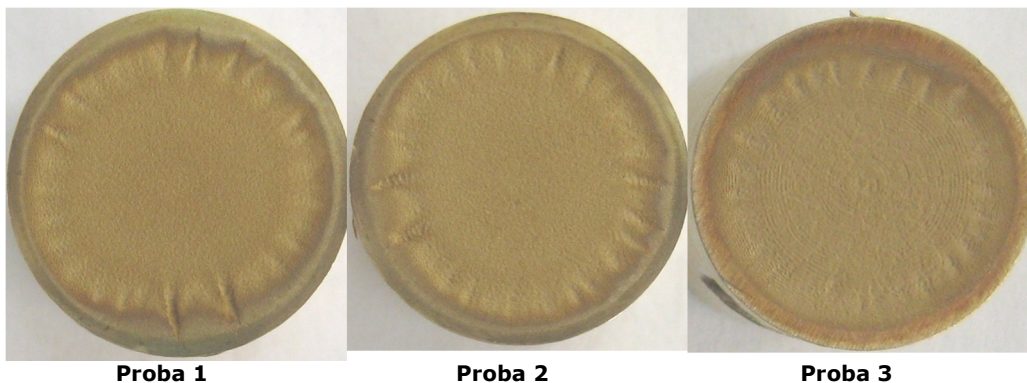


Fig. 4.57 Imagini macro (înregistrări aparat Canon A 480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165 minute

Imaginea SEM și macroscopică (atașată), din fig.4.58, arată gradul de finețe al structurii, rezultată prin tratamentul termic de călire volumică de la 700 °C cu revenire la 250 °C, modul de propagare a fisurilor și de formare a cavernelor prin eroziunea cavitației.

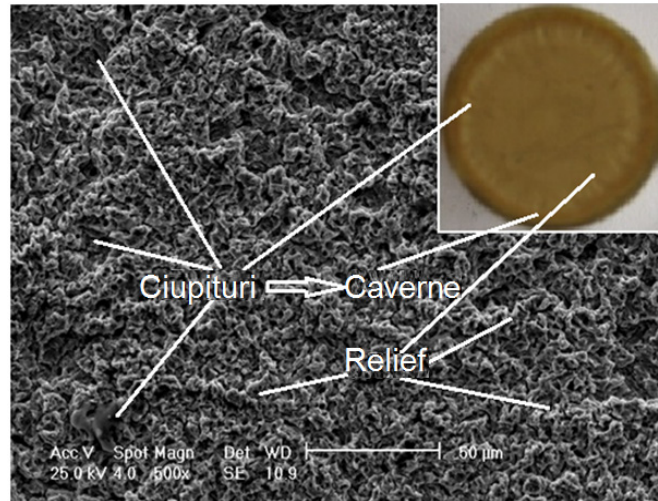


Fig. 4.58 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 65 minute (macro) – **Proba 2**

#### 4.2.2.2.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

Profilograma din fig.4.59 și valorile celor trei parametri caracteristici ( $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ ), înregistrați cu aparatul Mitutoyo, sunt în concordanță cu aspectul macroscopic al suprafețelor din fig 4.56 și 4.57, precum și cu cea dată de imaginea SEM din fig.4.58, arătând modul de propagare a eroziunii în structura materialului suprafeței.

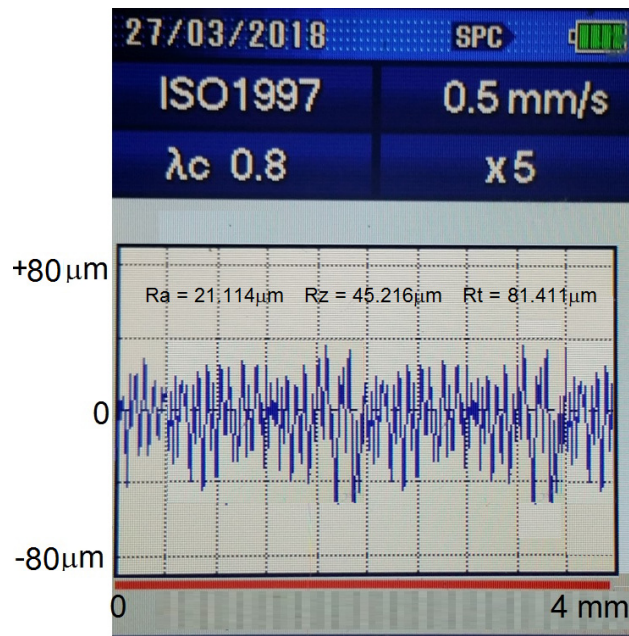


Fig. 4.59 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare – **Proba 2**)

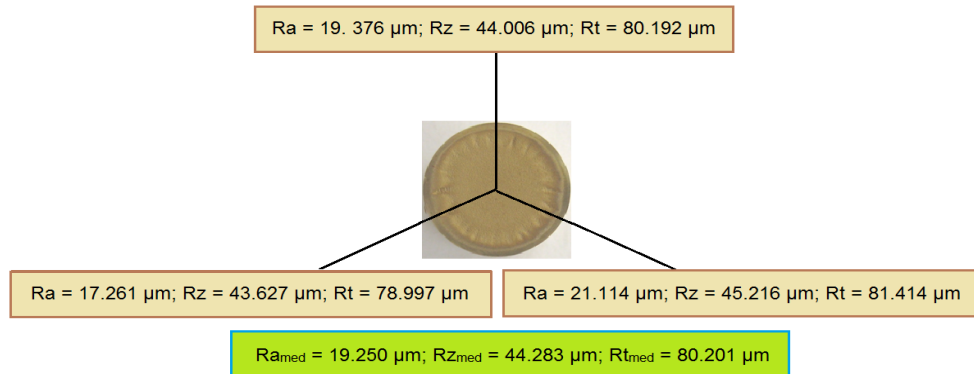
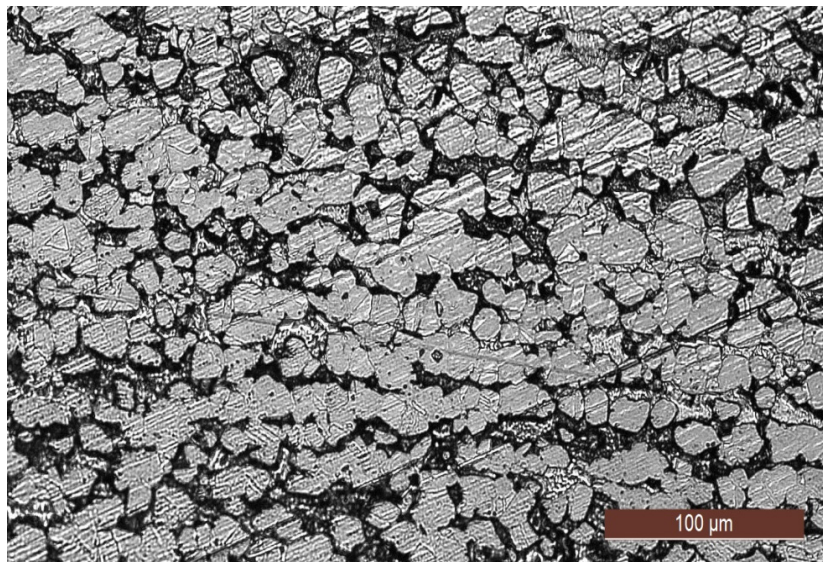


Fig. 4.60 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.59 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (**Proba 2**)

Și în acest caz se constată că valoarea medie  $R_{zmed} = 44.283 \mu\text{m}$ , a valorilor înregistrate pe cele trei direcții pentru una dintre probe (notată ca proba nr.2), este apropiată de cea obținută prin prelucrare statistică pentru adâncimea medie cumulată de la finalul testului de cavitație ( $MDE_{max} = 44.667 \mu\text{m}$ ), fig.4.53 și 4.55.

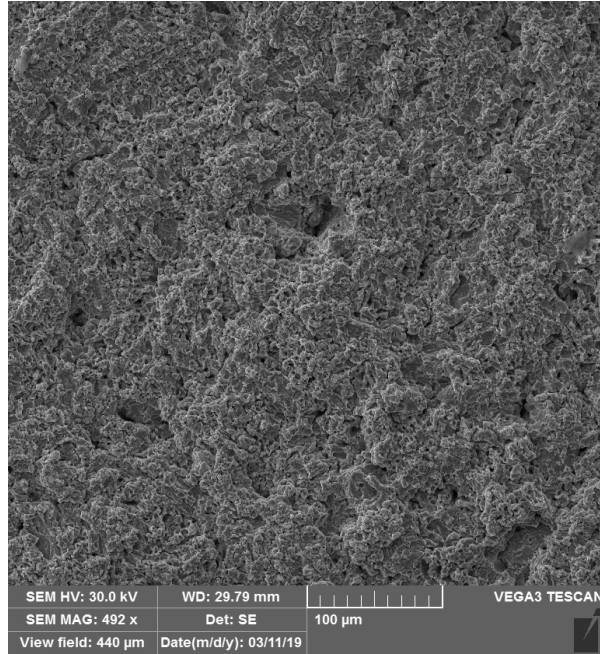
#### 4.2.2.2.3 Morfologia structurii erodate

Efectuarea tratamentului termic de revenire la  $250^\circ\text{C}$ , cu răcire lentă în aer, provoacă o ușoară detensionare termică a materialului și o declanșare a fenomenelor de precipitare a fazelor secundare. Duritatea bronzului nu scade semnificativ, astfel că suprafața degradată prin cavitație prezintă caracteristici similare stării structurale obținute în urma călirii în apă de la  $700^\circ\text{C}$  (fig.4.61 b,c).

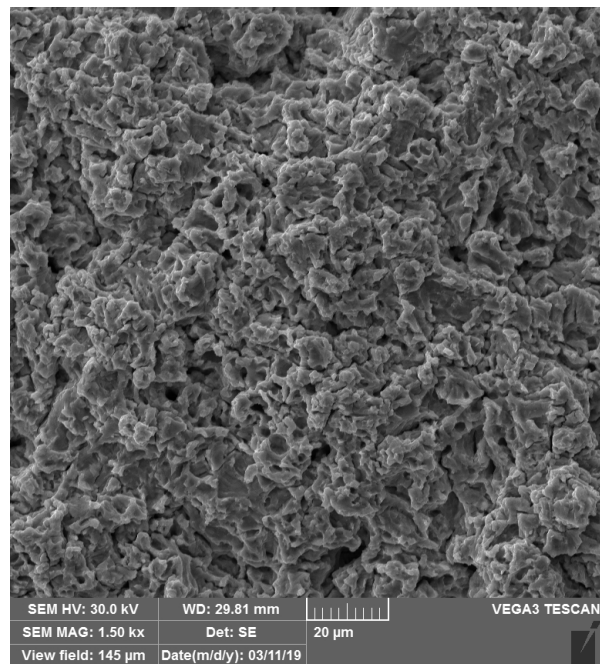


-a-





**-b-**



**-c-**

Fig. 4.61 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație

### 4.2.2.3 Călirea volumică de la 700 °C cu revenire la 500°C

#### 4.2.2.3.1 Curbele și parametrii comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În fig. 4.62 și fig.4.63 sunt afișate valorile experimentale ale celor trei probe testate, precum și curbele de mediere a acestora, construite analitic cu relațiile (2.1) din capitolul 2. Ca și la diagramele anterioare, în cele două diagrame s-au afișat valorile  $MDE_{max}$ ,  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$ , definite de curbele  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ .

Și la cercetarea din acest caz, similar ca la cele prezentate anterior, precum și în capitolul 3, acuratețea experimentului este dată de banda de dispersie în care se încadrează valorile experimentale înregistrate pe cele trei probe testate, intervalul de toleranță de 99 % și valoarea erorii standard de estimare de 0.336 (vezi fig.4.64).

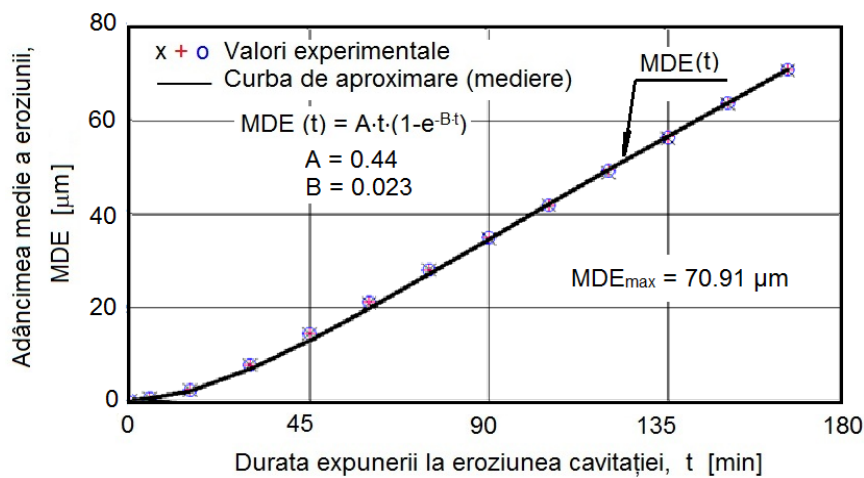


Fig. 4.62 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

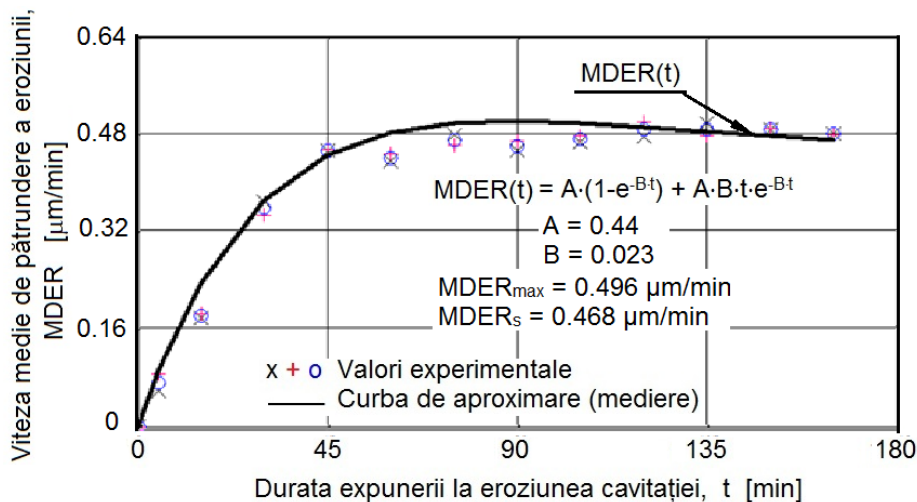


Fig. 4.63 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

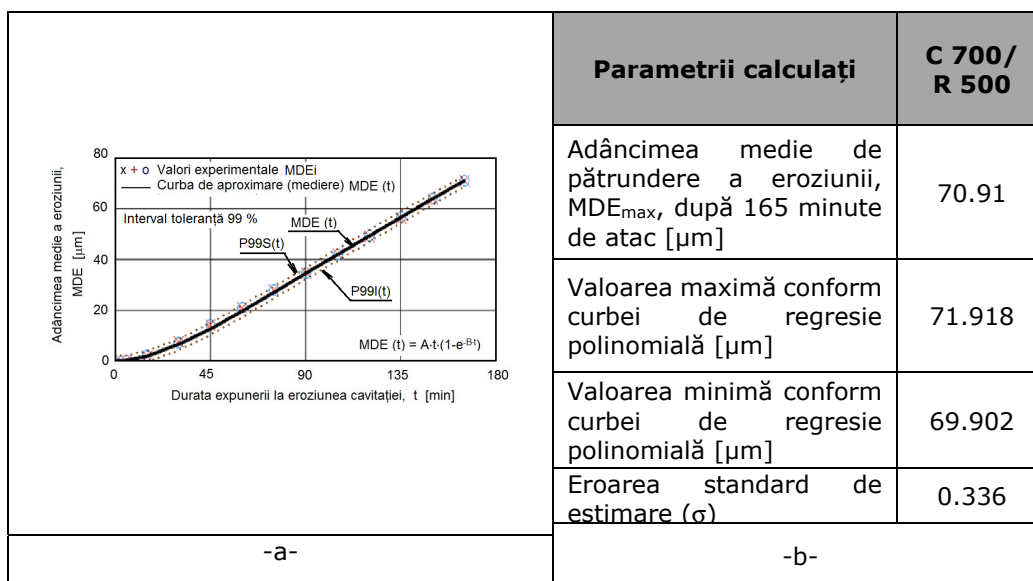


Fig. 4.64 Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici

Evoluțiile curbelor de mediere, valorile experimentale ale adâncimilor medii de eroziune, fig.4.62 și ale vitezelor medii de eroziune, fig. 4.63, oferă concluzii similare celor enumerate la călirea de la 700 °C urmată de revenire la 250 °C. Apreciez că această apropiere de comportament și rezistență la cavitație, este cauzată și de valoarea duriții suprafeței (146.125 HV05), mai mică cu 2.75 unități HV05 (nesemnificativă- vezi tabelul 4.4) față de cea măsurată la probele călite la 700 °C urmată de revenire la 250 °C. Deși diferența 0.028  $\mu\text{m}/\text{min}$  dintre valoarea  $MDER_{max}$  și  $MDER_s$  este cea mai mare dintre toate valorile prezentate până acum, ea nu constituie un argument care să afecteze calitățile sporite conferite de acest tratament termic, fiind o diferență în banda de erori a statisticii eroziunii cavitației [1], [52], [55, 56], [84], [90, 91], [97]. Prin urmare, se poate afirma că modul de evoluție al curbelor  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , precum și dispersiile valorilor experimentale, cu diferențele reduse între cele trei probe, la aceleași durate de atac al cavitației, încadrează astfel tratat în categoria materialelor cu bună comportare și rezistență la eroziunea cavitației vibratoare.

#### 4.2.2.3.2 Degradarea suprafeței și structurii prin cavitația vibratoare

##### 4.2.2.3.2.1 Evoluția degradării cu durata expunerii la atacul cavitație

Extinderea eroziunii cavitației în suprafața expusă, cu durata atacului, este reliefată de imaginile fotografice (macro), din fig. 4.65 (exemplificativ doar pentru proba notată ca fiind nr.2), iar modul de realizare a cavernelor este artătat de imaginile din fig.4.66 și 4.67.

De remarcat că inelul periferic, ce delimitează aria erodată de aria suprafeței expuse cavitației, cu cavernele stelare, sunt bine conturate după aceeași durată de expunere (90 minute) ca și la tratamentul de călire volumică de la 700 °C cu revenire la 250 °C.

Imaginile din fig.4.67 arată că cele trei probe s-au comportat aproximativ identic, din punct de vedere al rezistenței suprafețelor la atacurile cavitației vibratoare. Această remarcă conduce la aprecierea că structura materialului celor trei probe, din punct de vedere al omogenității granulației și al dispersiei valorilor

proprietăților mecanice (în special a durității - vezi tabelul 4.4) a răspuns identic la acest tratament termic.

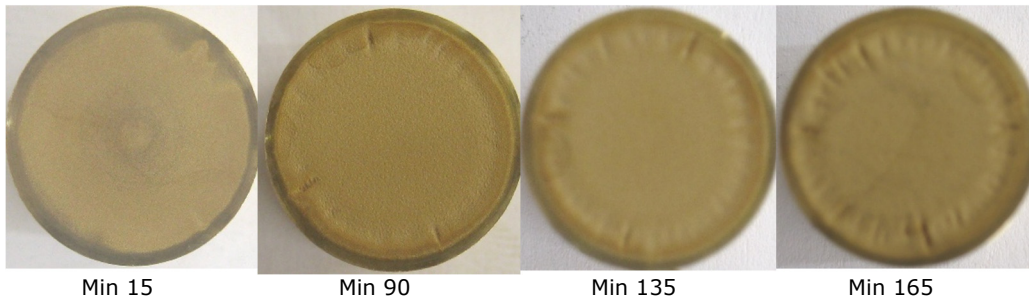


Fig. 4.65 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (**Proba 2**)

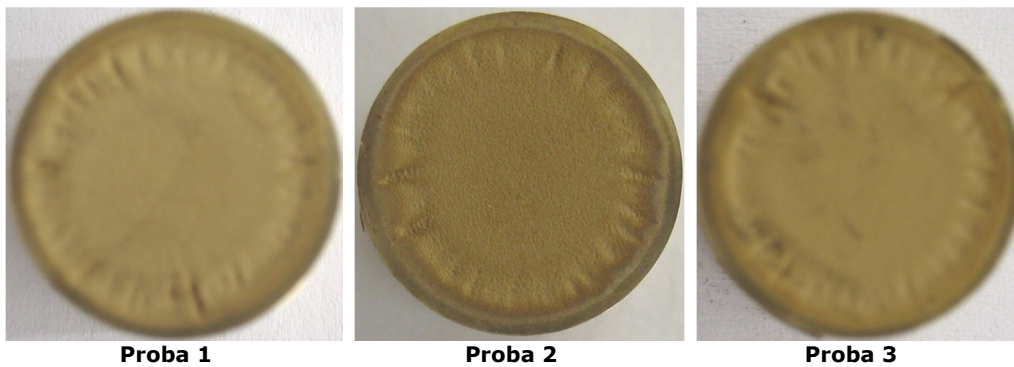


Fig. 4.66 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165 minute

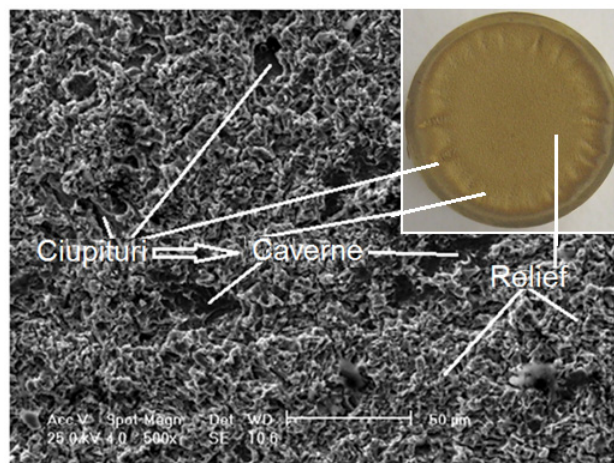


Fig. 6d Bronz călit 700-rev 500 (x 500)

Fig. 4.67 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 165 minute (macro) - **Proba 1**

În imaginea microscopică, din fig. 4.67, se văd mult mai bine cavernele rămase după expulzarea grăunților, precum și rețelele de fisuri, ca urmare a unei structurii, ceva mai grosiere, comparativ cu cele două anterioare.

#### 4.2.2.3.2 Profilograma suprafeței erodate prin cavitație

În fig.4.59 sunt prezentate profilograma și valorile celor trei parametri caracteristici ( $R_a$ ,  $R_z$  și  $R_t$ ), înregistrați cu aparatul Mitutoyo pentru proba notată ca fiind nr.2. Forma acestora confirmă aspectul macroscopic al suprafețelor din fig 4.65 și 4.66, precum și structura degradată, arătată de imaginea SEM din fig.4.69.

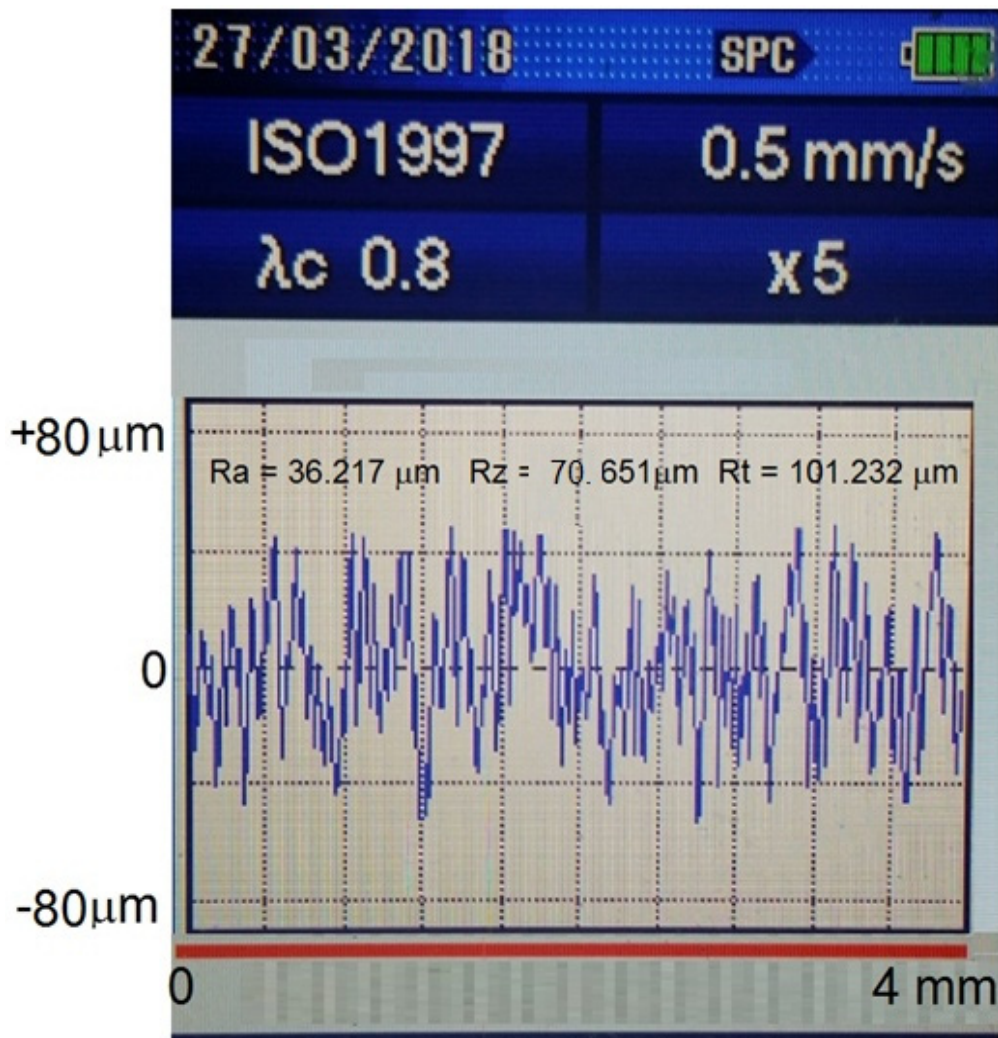


Fig.4.68 Valorile parametrilor rugozității  
(exemplificare pentru o măsurătoare – **Proba 2**)

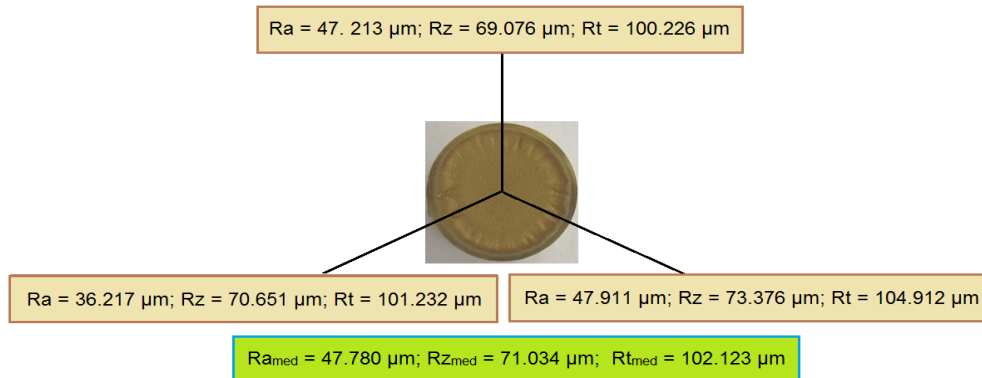
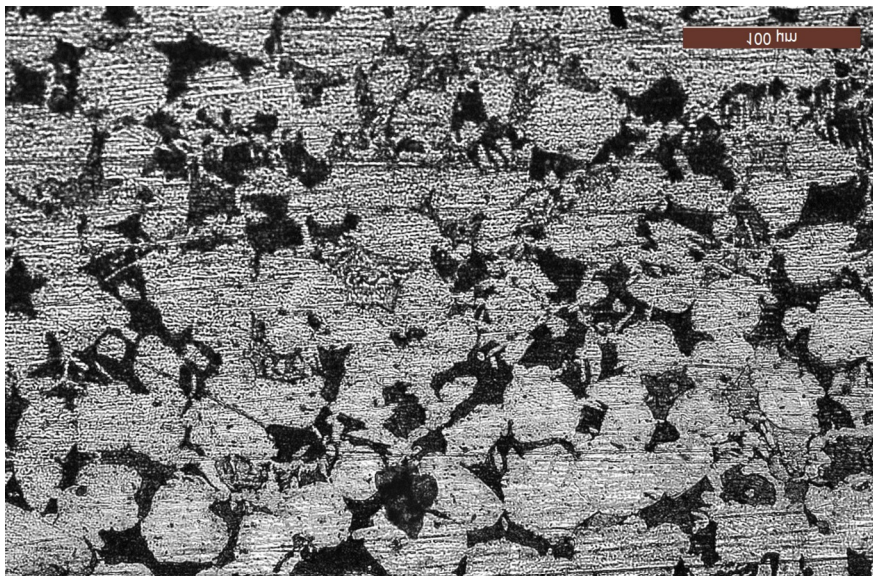


Fig. 4.69 Tehnica de înregistrare a profilogramelor și parametrilor rugozității din fig.4.68 cu aparatul Mitutoyo SJ 201 P (**Proba 2**)

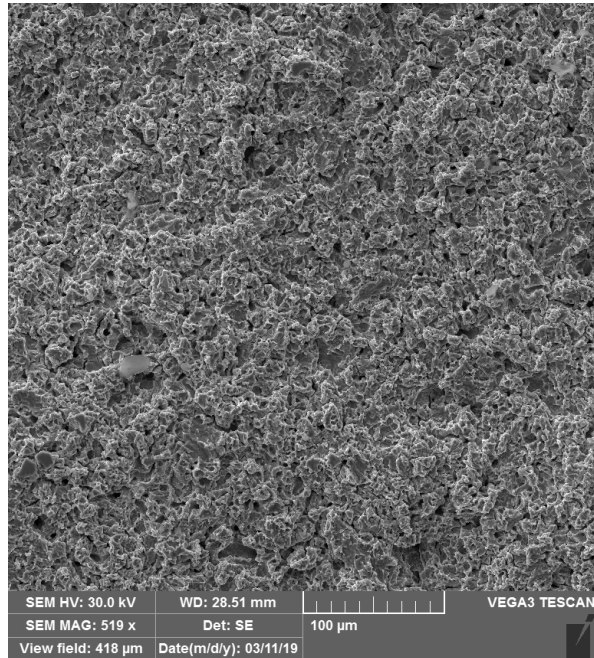
După cum era de așteptat, diferența cea mai mică este cea dintre valoarea lui  $MDE_{\max} = 70.91 \mu\text{m}$ , dată de curba  $MDE(t)$ , fig.4.63, și cea corespunzătoare valorii medii pe cele trei direcții, pentru proba 2,  $Rz_{\text{med}} = 71.034 \mu\text{m}$ .

#### 4.2.2.3.2.3 Morfologia structurii erodate

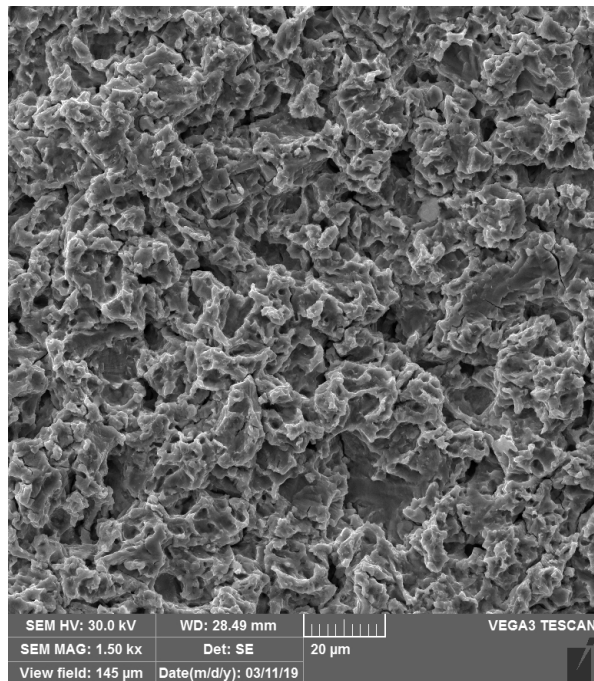
Creșterea temperaturii de revenire la  $500^{\circ}\text{C}$  conduce la o mărire ușoară a dimensiunilor fazelor precipitate (fig. 4.70 a) și implicit la o scădere relativ mică a durtății și rezistenței la cavitație. Cercetarea SEM a suprafeței acestor probe cavitate evidențiază formarea de microcratere cu formă neregulată în urma expulzării particulelor de faze secundare precipitate din soluția solidă suprasaturată  $\beta$  și a coalescenței rețelei de fisuri dezvoltate cu precădere în zona limitelor dintre grăunți (fig.4.70 b,c).



- a -



-b-



-c-

Fig. 4.70 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație

#### 4.2.3 Compararea rezultatelor cercetării

Compararea efectelor celor trei regimuri de tratament termic asupra comportării și rezistenței structurilor, distruse de solicitările ciclice ale microjeturilor dezvoltate prin cavitația vibratoare, este arătată în diagramele din figurile 4.71-4.74. În figurile 4.71 și 4.72 sunt arătate diferențele realizate de cele trei regimuri de tratamente termic, iar în figurile 4.73 și 4.74 se pune în evidență sporul realizat față de starea de livrare a bronzului CuSn12-C.

Din figurile 4.71 și 4.72 se observă că cele trei regimuri de tratament termic conferă, structurilor suprafețelor erodate, comportamente similare; curbele MDE(t) având evoluții similare, cu tendințe liniare, după circa 40 minute de solicitare cavitațională, dar cu pante diferite, iar curbele MDER(t) scad ușor, asimptotic, spre o valoare de stabilizare, ușor scăzută față de valorile maxime atinse de curbă.

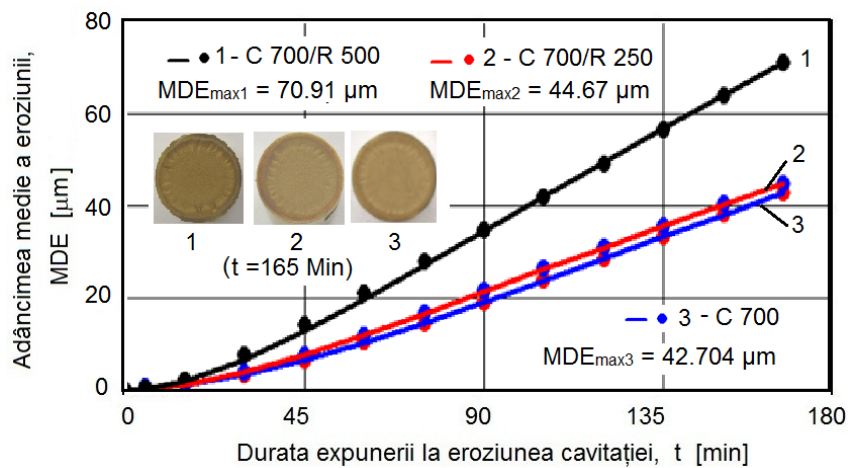


Fig. 4.71 Comparații între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației

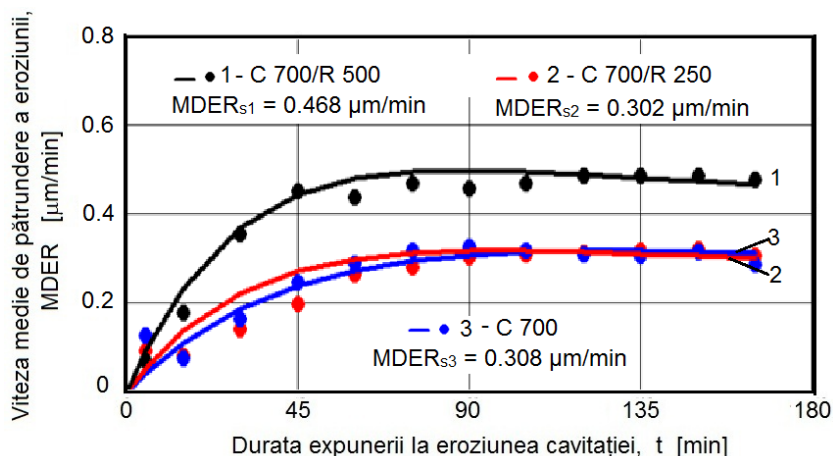


Fig. 4.72 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației



Se constată că probele supuse tratamentelor termice de călire de la 700 °C, respectiv călire de la 700 °C + revenire la 250 °C, practic, au aceleași comportamente, respectiv rezistențe; diferențele dintre curbele MDE(t) și MDER(t), pe tot parcursul solicitării la cavitație (0-165 minute), sunt neesențiale, în domeniul intervalului de erori acceptat în astfel de teste experimentale [55, 56] și net superioare celui realizat prin călire de la 700 °C + revenire la 500 °C.

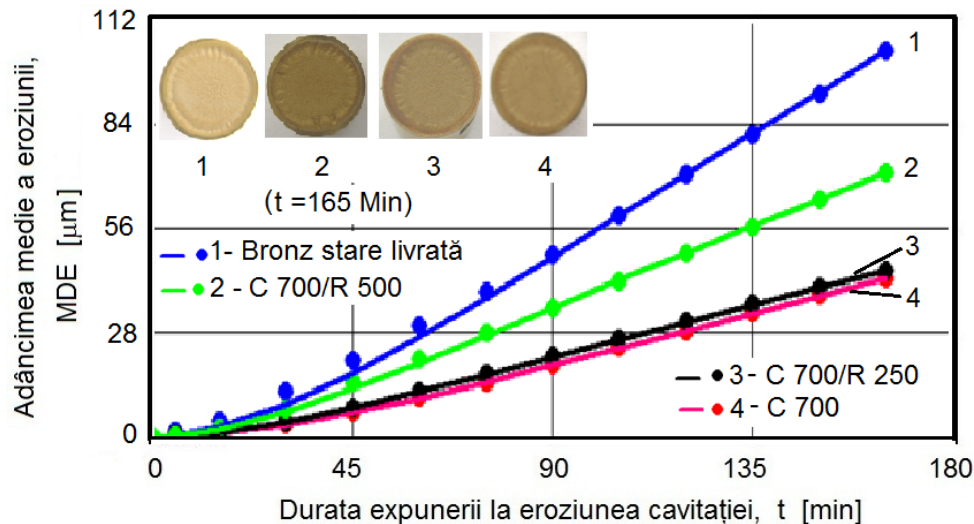


Fig. 4.73 Comparatii între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației

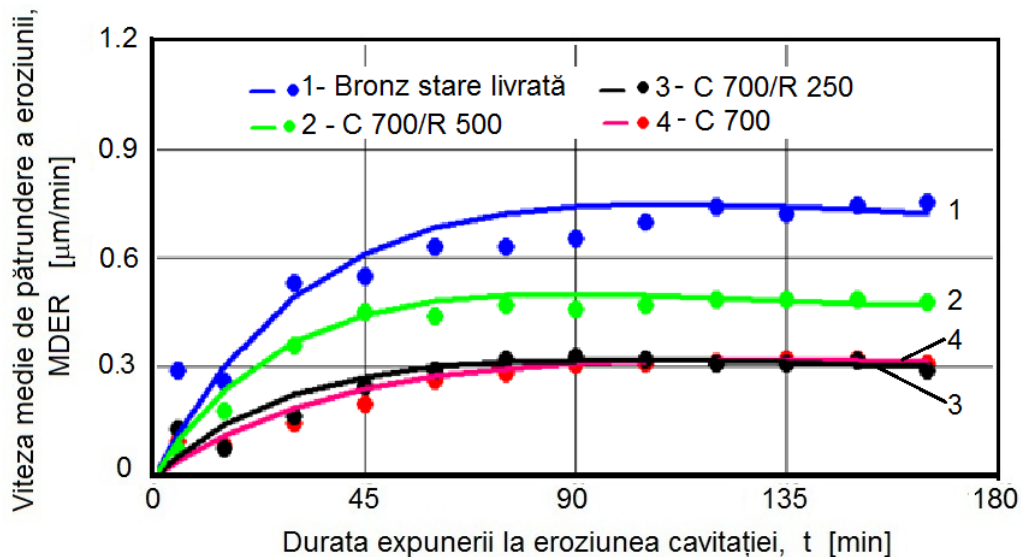


Fig. 4.74 Comparatii între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Comparația din figurile 4.73 și 4.74 arată clar că prin cele trei regimuri de călire, respectiv călire urmată de revenire, la parametrii menționați, se îmbunătățesc foarte mult atât comportarea cât și rezistența la eroziunea cavitației (vezi forma curbelor MDE(t) și MDER(t) și dispersiile reduse la valorilor experimentale față de curbele de mediere, înregistrate pentru cele trei regimuri de tratamente).

Dispersiile valorilor experimentale, reduse și uniform distribuite față de curbele MDER(t), comparativ cu ale bronzului în stare de livrare, sunt efectul modificărilor microstructurale (vezi imaginile fotografice cu analiza morfologică a structurilor erodate) simultan cu creșterea durității suprafeței (vezi tabelul 4.4).

Evaluarea cantitativă a rezistenței conferite de cele trei regimuri, comparativ cu starea de livrare, este realizată în histograma din fig.4.75 și prezentată prin datele din tabelul 4.5.

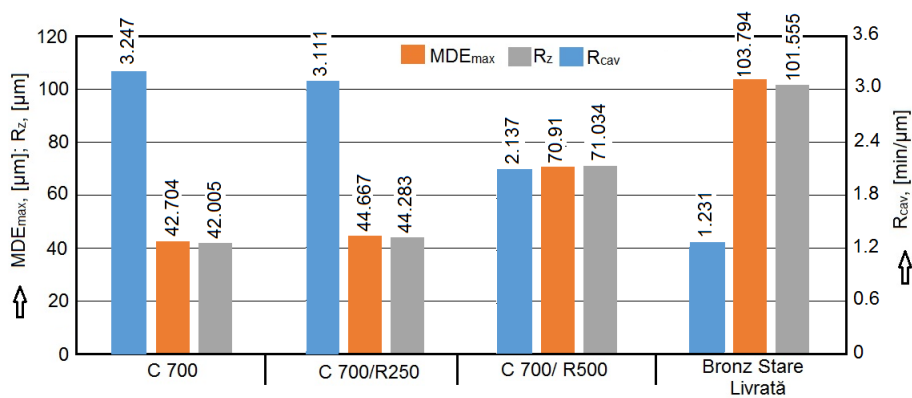


Fig. 4.75 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

Tabelul 4.5 Compararea cu parametrii materialelor de referință

Materialul de referință	Parametrul eroziunii cavitaționale	Variația față de parametrii materialului de referință [%]		
		C 700 °C	C 700 °C+ R 250 °C	C 700 °C+ R 500 °C
Bronz stare livrată	MDE <sub>max</sub> [μm]	↓ 143.05	↓ 132.37	↓ 46.37
	R <sub>cav</sub> [min/ μm]	↑ 163.77	↑ 152.64	↑ 73.6
	R <sub>z</sub> [μm]	↓ 141.77	↓ 129.33	↓ 42.97
C 700 °C	MDE <sub>max</sub> [μm]	-	↑ 4.6	↑ 66.05
	R <sub>cav</sub> [min/ μm]	-	↓ 1.98	↓ 51.94
	R <sub>z</sub> [μm]	-	↑ 0.63	↑ 64.44

↑ - creștere; ↓ - descreștere

Datele comparative din histogramă (fig.4.75) arată valorile net inferioare ale rugozităților medii,  $R_z$  (măsurate cu aparatul Mitutoyo și calculate conform metodologiei descrise anterior) și ale adâncimilor maxime,  $MDE_{max}$ , respectiv ale valorilor net superioare ale parametrului rezistența la cavitație,  $R_{cav}$ , realizate prin cele trei regimuri de călire, respectiv călire și revenire.

Datele din tabelul 4.5, prin cei trei parametri caracteristici ( $MDE_{max}$ ,  $R_z$  și  $R_{cav}$ ), pun în evidență sporul de rezistență adus de fiecare regim de tratament termic, față de rezistența bronzului în stare de livrare (de la 46.37 % la 143.05 %, după valorile lui  $MDE_{max}$ , de la 73.6 % la 163.77%, după valorile lui  $R_{cav}$  și de la 42.97 % la 141.77%, după valorile lui  $R_{cav}$ ). Totodată, datele din tabelul 4.5 arată diferența nesemnificativă (de 0.65% între  $R_z$ , 1.98 între  $R_{cav}$ , respectiv 4.6 % între  $MDE_{max}$ ) dintre rezistențele conferite prin călire de la 700 °C și călire de la 700 °C + revenire la 250 °C.

Histograma din fig.4.76, în care se compară valorile parametrilor specifici eroziunii prin cavitație, aferenți celor 4 regimuri ale tratamentelor termice folosite pentru alama CuZn39Pb și respectiv celor trei regimuri folosite pentru tratamentele termice ale bronzului CuSn12-C, este cel mai convingător argument pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziunea cavitației prin utilizarea tratamentelor termice volumice.

Rezultatele din capitolul 3, analizate comparativ în subcapitolul 3.3 au arătat că rezistența la cavitație a bronzului CuSn12-C, în stare de livrare, era ușor mai ridicată decât a alamei CuZn39Pb3, în stare de livrare. Din datele prezentate în histograma din fig.4.76, constatăm valori superioare pentru parametrul  $R_{cav}$  și inferioare pentru  $MDE_{max}$  și  $R_z$ . Asta înseamnă că prin toate cele 4 tratamente termice, aplicate alamei CuZn39Pb3, se obține o creștere de rezistență, la eroziunea cavitației, superioară oricăreia dintre cele obținute pentru regimurile de tratament termic, aplicate bronzului CuSn12-C.

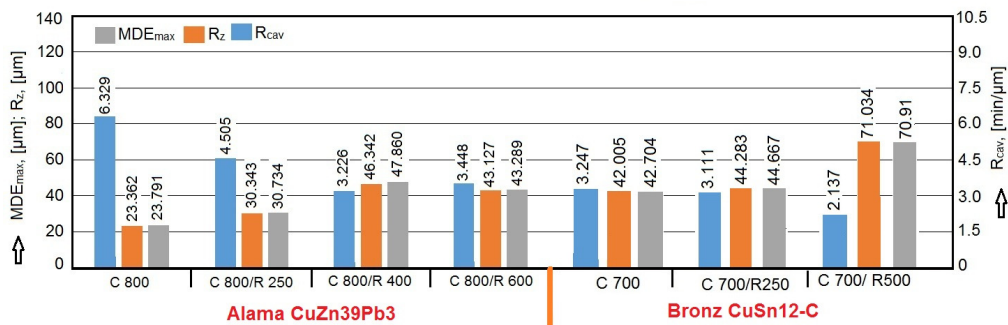


Fig. 4.76 Comparații între valorile parametrilor specifici rezistenței alamei CuZn39Pb3, tratate termic și cei ai bronzului CuSn12-C tratat termic

Orientativ, sporurile de rezistență, înregistrate de alama tratată termic, dependente de tipul tratamentului termic și de valorile parametrilor regimului, sunt:

- pentru călirea alamei de la 800 °C (regimul care conferă cea mai ridicată rezistență):
  - sporul de rezistență la cavitație, față de bronzul CuSn12-C, călit de la 700 °C (regimul care conferă cea mai bună rezistență), este caracterizat prin: creșteri cu circa 95% a lui  $R_{cav}$  și cu circa 80 % a lui  $MDE_{max}$  și  $R_z$ ;

- sporul de rezistență la cavitație, față de bronzul CuSn12-C, călit de la 700 °C și revenit la 500 °C (regimul care conferă cea mai scăzută rezistență), este caracterizat prin: creșteri cu circa 196% a lui  $R_{cav}$ , cu circa 198 % a lui  $MDE_{max}$  și cu circa 204 a lui  $R_z$ ;
- pentru călirea alamei de la 800 °C + revenire la 400 °C (regimul care conferă cea mai scăzută rezistență):
  - scăderea rezistenței la cavitație, față de a bronzului CuSn12-C, călit de la 700 °C (regimul care conferă cea mai bună rezistență), este caracterizată prin: scăderea cu circa 1.00% a lui  $R_{cav}$ , cu circa 10 % a lui  $MDE_{max}$  și cu 12 % a lui  $R_z$ . Ținând cont de complexitatea fenomenului, dar și de erorile de mădurare și prelucrare statistică, se poate afirma că la cele două tratamente diferența dintre rezistențele la cavitație este nesemnificativă;
  - sporul de rezistență la cavitație, față de bronzul CuSn12-C, călit de la 700 °C + revenit la 500 °C (regimul care conferă cea mai scăzută rezistență), este caracterizat prin: creșteri cu circa 48 % a lui  $R_{cav}$ , cu circa 48 % a lui  $MDE_{max}$  și cu circa 53% a lui  $R_z$ ;

În figurile 4.77 și 4.78 sunt comparate curbele  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$ , caracteristice eroziunii probelor tratate termic, cu cele ale bronzului în stare de livrare și ale materialelor etalon, cele folosite și în cazul alamei tratate (subcapitolul 4.1.3). Modul de așezare a curbelor arată că doar două dintre tratamente, și anume tratamentele de călire de la 700 °C și călire de la 700 °C + revenire la 250°C, conferă comportări și rezistențe mai mari decât ale alamei navale, dar inferioare celor obținute pentru bronzul CuNiAl I-RNR și pentru oțelul inoxidabil OH12NDL. În schimb, comportarea și rezistența suprafețelor probelor supuse celui de-al treilea tratament termic, de călire de la 700 °C + revenire la 500°C, sunt mult inferioare în raport cu ale bronzului naval și oțelului inoxidabil și ușor scăzute (în domeniul abaterilor admisibile) față de ale alamei navale. Se remarcă formele de evoluții similare cu ale materialelor etalon, specifice suprafețelor cu bună rezistență la eroziunea cavitației, cu structuri omogene și proprietăți mecanice care asigură o distrugere omogenă, dependentă de dimensiunile grăunților și de valorile durității, uniform distribuite în suprafața atacată de cavitație [9], [40].

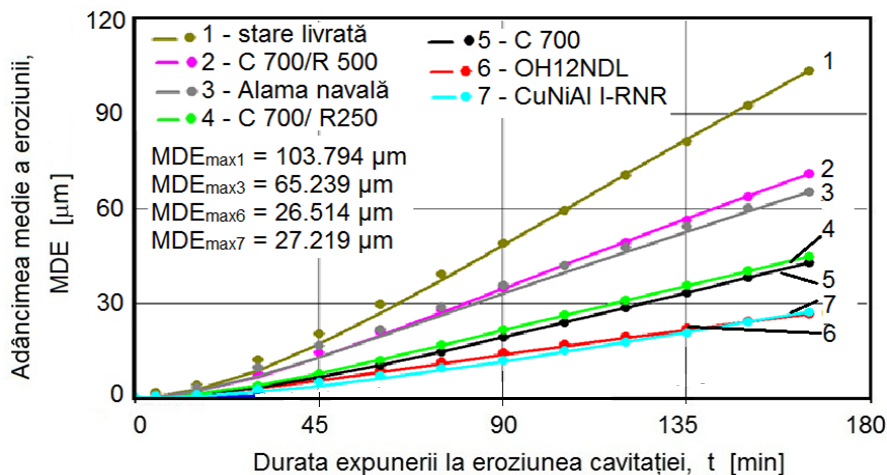


Fig. 4.77 Comparatii între variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației

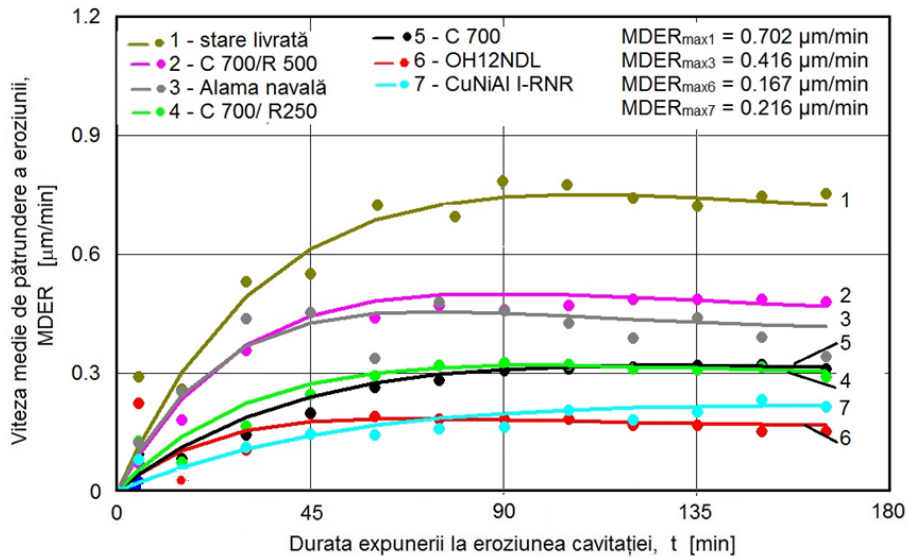


Fig. 4.78 Comparații între variațiile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Evaluarea cantitativă a rezistenței la eroziunea cavitației, conferită prin cele trei regimuri ale tratamentelor termice, este evidențiată de valorile parametrilor  $MDE_{max}$  și  $R_{cav}$ , din histograma prezentată în fig.4.79 și de diferențele procentuale din tabelul 4.6.

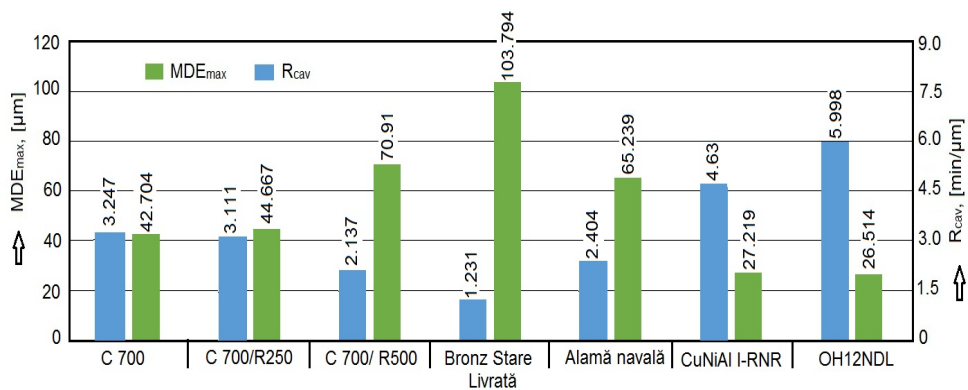


Fig. 4.79 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

Tabelul 4.6 Compararea cu parametrii materialelor de referință

Materialul de referință	Parametrul eroziunii cavitaționale	Variația față de parametrii materialului de referință [%]		
		C 700 °C	C 700 °C+ R 250 °C	C 700 °C+ R 500 °C
OH12NDL	MDE <sub>max</sub> [μm]	↑ 61.06	↑ 68.47	↑ 167.44
	R <sub>cav</sub> [min/μm]	↓ 84.43	↓ 80.84	↓ 180.23
CuNiAl I-RNR	MDE <sub>max</sub> [μm]	↑ 56.89	↑ 64.10	↑ 160.51
	R <sub>cav</sub> [min/μm]	↓ 42.59	↓ 39.81	↓ 116.67
Alama navală	MDE <sub>max</sub> [μm]	↓ 52.77	↓ 52.90	↑ 8.69
	R <sub>cav</sub> [min/μm]	↑ 35.06	↑ 37.74	↓ 12.5

↑ - creștere; ↓ - descreștere

Din histogramă se observă valorile superioare ale adâncimii maxime de eroziune MDE<sub>max</sub> și inferioare ale rezistenței la cavitație R<sub>cav</sub>, față de ale bronzului naval CuNiAl I-RNR (MDE<sub>max</sub> = 21.219 μm, R<sub>cav</sub> = 4.63 min/μm) și ale oțelului inoxidabil OH12NDL (MDE<sub>max</sub> = 26.514 μm, R<sub>cav</sub> = 2.404 min/μm). De asemenea, comparativ cu alama navală (MDE<sub>max</sub> = 65.239 μm, R<sub>cav</sub> = 5.998 min/μm), se observă că pentru călire de la 700 °C și călire de la 700 °C + revenire la 250°C valorile lui MDE<sub>max</sub> și R<sub>cav</sub> sunt mai mici (pentru primul), respectiv mai mare (pentru al doilea), iar pentru călire de la 700 °C + revenire la 500°C sunt sensibil apropiate (MDE<sub>max</sub> = 70.91 μm, R<sub>cav</sub> = 2.137 min/μm). Histograma arată și diferențele semnificative dintre starea de livrare a bronzului și materialele etalon, în special cele cu bună comportare (bronzul naval și oțelul inoxidabil).

Diferențele procentuale din tabelul 4.6 arată că:

- prin călire, adâncimea de eroziune crește cu circa 61 % față de a oțelului inoxidabil OH12NDL și cu circa 57 % față de a bronzului naval CuNiAl I-RNR, dar scade cu circa 53 % față de a alamei navale, iar parametrul rezistență la cavitație R<sub>cav</sub> scade cu circa 84 % față de al oțelului inoxidabil OH12NDL și cu circa 43 % față de al bronzului naval CuNiAl I-RNR, dar crește cu circa 35 % față de al alamei navale;
- prin călire de la 700 °C + revenire la 250°C adâncimea de eroziune crește cu circa 68 % față de a oțelului inoxidabil OH12NDL și cu circa 64 % față de a bronzului naval CuNiAl I-RNR, dar scade cu circa 53 % față de a alamei navale, iar parametrul rezistență la cavitație R<sub>cav</sub> scade cu circa 81 % față de al oțelului inoxidabil OH12NDL și cu circa 40 % față de al bronzului naval CuNiAl I-RNR, dar crește cu circa 38 % față de al alamei navale;
- prin călire de la 700 °C + revenire la 500°C, adâncimea de eroziune crește cu circa 167 % față de a oțelului inoxidabil OH12NDL, cu circa 161 % față de a bronzului naval CuNiAl I-RNR și cu circa 9 % față de a alamei navale,

iar parametrul rezistență la cavitație  $R_{cav}$  scade cu circa 180 % față de al oțelului inoxidabil OH12NDL, cu circa 117 % față de al bronzului naval CuNiAl I-RNR și cu circa 13 % față de al alamei navale.

Această analiză, realizată prin comparație, arată că tratamentele termice volumice modifică substanțial, prin creștere, rezistența suprafețelor față de solicitările cavitaționale, fiind dependente de structura de bază, inițială, a materialului.

#### 4.2.4 Concluzii

În mare parte, cu unele diferențe, determinate de structura bronzului și duritatea suprafeței, rezultate după tratamentul termic volumic, sunt similare celor prezentate la alama tratată termic în subcapitolul 4.1.4

- Diferențele, dintre  $MDE_{max}$  și  $R_{zmed}$  constatate în analizele realizate pe fiecare tratament pot suferi modificări în sus sau în jos, valorile lui  $R_z$  determinându-se cu aparatul Mitutoyo în mai multe zone din ariile erodate, pe fiecare din cele trei probe și apoi se face media. Cert este că datele obținute arată că acest parametru este cel mai aproape de valoarea adâncimii medii cumulate de la finalul testelor de cavitație, calculată pe baza pierderilor de masă înregistrate pe cele trei probe.

- Forma curbelor  $MDE(t)$ , ca evoluție cu durata atacului cavitației, este specifică materialelor cu o bună rezistență la eroziunea cavitației, având tendința de a se stabili la valoarea maximă.

- Evoluția ariei erodate cu durata atacului cavitației, cu formarea inelului periferic și al cavernelor dispuse stelar, respectă același mecanism, indiferent de tratamentul termic aplicat, diferența fiind dată de timpul la care se vede foarte bine conturat, care este corespunzător valorii maxime a vitezei dată de curba  $MDE(t)$ .

- Imaginile SEM arată că rețelele de fisuri sunt generate și progresează preponderent la granița dintre constituenții structurali.

- Gradul de degradare este dependent de morfologia structurii și valoarea durității, rezultate prin tratamentele termice.

- Raportat la starea de livrare utilizarea tratamentelor termice volumice, de călire de la 700 °C, de călire de la 700 °C urmată de revenire la 250 °C, respectiv 500 °C, determină o scădere a adâncimii cumulate maxime  $MDE_{max}$  de eroziune cu până la 143 %, respectiv o creștere a rezistenței la cavitație, exprimată de valorile parametrului  $R_{cav}$ , cu până la 142 %.

- Comparația cu materialele etalon arată că, raportat la oțelul inoxidabil OH12NDL și bronzul naval CuNiAl I-RNR, indiferent de tipul tratamentului utilizat, rezistența la eroziunea cavitației scade, cel mai puțin pentru tratamentul de călire, cel mai mult pentru călire urmată de revenire la 500 °C. Orientativ, adâncimea de eroziune crește cu până la 167 %, iar rezistența suprafeței la eroziunea cavitației, exprimată de valorile lui  $R_{cav}$  scăderea este de până la 180 %. Raportat la alama navală, spor de rezistență la eroziunea cavitației se realizează doar prin călire la 700 °C, și prin călire de la 700 °C + revenire la 250 °C.

- Compararea cu starea de livrare confirmă că tratamentele termice volumice rămân soluții de creștere a rezistenței la eroziunea prin cavitație.

- Analizele realizate pe baza curbelor specifice comportării și rezistenței conferite de fiecare tip de tratament termic, precum și evaluările făcute prin comparație cu materialele etalon (oțelul inoxidabil OH12NDL, bronzul naval CuNiAl I-RNR și alama navală), pe baza parametrilor de referință  $MDE_{max}$ ,  $R_{cav}$  sau  $R_z$ , confirmă că bronzul CuSn12-C, cu tratamente termice de călire sau călire + revenire, se poate folosi la piese ce lucrează în curenți cavitaționali cum sunt: fittingurile, corpurile robinetelor și vanelor de pe conductele forțate, rotorii pompelor volumice și chiar elicele vapoarelor de apă dulce.

## **CAP. 5**

# **TEHNICI ȘI MATERIALE UTILIZATE ÎN ACOPERIREA SUPRAFEȚELOR PENTRU PROTECȚIE LA SOLICITĂRILE CAVITAȚIONALE**

Ritmul alert de dezvoltare industrială, dependent de producerea de energie electrică și transportul pe apă, a determinat oamenii de știință, în special pe cei din domeniul cercetării, să caute soluții de creștere a duratei de viață a echipamentelor ce influențează acest ritm, precum: rotoarele mașinilor hidraulice (turbine și pompe), organe de închidere (robinete și vane) și elicele vapoarelor. Printre multitudinile studii, privind promovarea noilor tehnologii de fabricație, prelucrare, conduse de calculatoare prin softuri și programe specializate [16], [34], [64], [78] și tratamente specifice [51, 52], sunt vizate și extinderile aplicării noilor materiale, cum sunt produsele compozite cu matrice polimerice [27], [46], [94], [96], la piesele supuse solicitărilor hidrodinamice și mecanice, de a căror formă geometrică și integritate, depinde performanța și durata de exploatare a ansamblului din care fac parte. În ultima perioadă, amestecurile polimerice încep să fie tot mai utilizate ca materiale, straturi de protecție și materiale de reparație a suprafețelor pieselor aflate în câmpuri hidrodinamice (palete și rotoare de mașini hidraulice, palele elicelor vapoarelor, inelele și discurile vanelor de pe conductele forțate, organele de închidere ale robinetelor, suprafețele interioare ale conductelor) care produc distrugerii prin eroziune, etc [27], [46], [66], [94], [96], [128], [131]. Pe aceste considerente, în acest capitol se prezintă rezultate cercetărilor privind comportarea și rezistența la eroziunea produsă prin cavitație vibratoare a unor tipuri de amestecuri polimerice modificate depuse pe suprafața metalică a probelor cavitaționale realizate din bronz destinat pieselor solicitate la cavitație precum [12], [30], [74], [89], [95]: organe de închidere ale vanelor și robinetelor, elice de vapoare și inelele de fixare din cadrul vanelor fluture.

Pentru că în literatură pentru materialele polimerice se folosesc diverse denumiri pentru straturile realizate în scopul prezentei teze, în prezentarea ce urmează, în urma discuțiilor cu specialiștii în materie se va utiliza sintagma ***amestec polimeric modificat***.

### **5.1 Amestecuri polimerice modificate**

#### **5.1.1 Materiale utilizate. Tehnologia de realizare a straturilor polimerice**

Pentru cercetarea comportării polimerilor modificați la cavitația vibratoare s-au utilizat epruvete, fig.5.1, prelevate din bronzul studiat anterior (CuSn12-C), care, așa cum s-a mai precizat, este folosit la turnarea palelor și elicelor de vapoare, precum și a corpurilor de robinete și vane. Straturile de polimeri, sub formă de pelicule, au fost depuse pe suprafața activă și cilindrică a acestor epruvete. Pentru identificare și analiza rezultatelor cercetării probele au fost marcate cu cifre arabe, după cum se va vedea în subcapitolele de rezultate ale cercetării.



Au fost studiate 5 tipuri de straturi de rășini polimerice, din fiecare tip testându-se câte două probe.

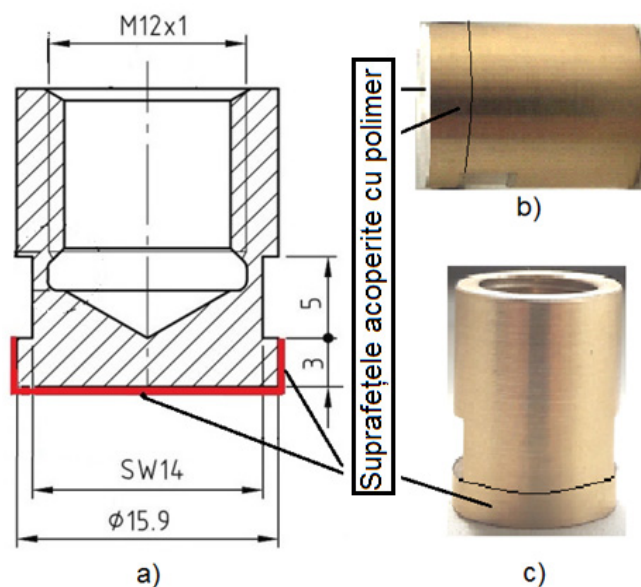


Fig. 5.1 Imaginea probei cavitaționale, în secțiune, cu indicarea suprafețelor acoperite cu pelicule de polimeri  
a) - secțiune prin probă; b) și c) - proba reală

*Prepararea și depunerea polimerilor modificați pe suprafețele de cavitație ale probelor din bronz a fost realizată în Laboratoarele de specialitate ale Universității "Dunărea de Jos" din Galați, sub conducerea distinsului fizician Prof.dr. ing. Adrian Cîrciumaru, căruia îi mulțumesc pentru sprijin și colaborare.*

Pe baza unei idei de dezvoltare a reacțiilor chimice locale în interiorul unui polimer lichid sau a unui prepolimer (ca în cazul metodei cu gel citric) [6], [7], [35], [76], un amestec între o rășină epoxidică (EPIPHEN RE42-20 cu întăritor DE 4020, [129]) și o rășină vinil esterică modificată epoxi-novolac (SIRESTER VE 64-M-140 [130]), cunoscută ca rășina novolac epoxidată și denumit polivinil, a fost modificat prin utilizarea diferiților agenți anorganici și a colagenului pentru acoperirea probelor pentru testarea la cavitație cu un strat subțire, care să protejeze suprafețele expuse efectelor eroziunii, în general și în particular a cavitației.

Deoarece, rășinile epoxidice provin din mai mulți polimeri adezivi [6, 7], [35], [76], în general, sunt materiale fragile și pot ceda la sarcini mecanice aleatorii, cum sunt solicitările microjeturilor cavitaționale și ale undelor de șoc, pierzând integritatea peliculei și, prin urmare, periclitând protecția suprafeței metalice. Din acest motiv, amestecul, realizat pentru cercetarea din cadrul tezei, este mai elastic și are scopul de a spori elasticitatea filmului subțire cu rezistență la desprindere de pe suprafața solicitată. În același timp, prezența compușilor anorganici, cu dimensiuni nanometrice, duce la schimbări locale în proprietățile polimerului crescând nivelul de aderență dintre suprafața polimerică și suprafața metalică, contribuind, astfel, la creșterea rezistenței la desprindere, sub solicitările locale de oboseală ale microjeturilor cavitaționale.

Rășina epoxidică Epiphen RE4020 cu întăritor DE4020, folosită în realizarea amestecului, este produsă de Resoltech, are un timp de gel de aproximativ 45 minute (în cantități mari) și un timp de polimerizare completă de aproximativ șapte zile. Cea de a doua componentă, vinil esterul diluat în stiren Sirester VE 64-M-140, este produsă de Sir Industriale SPA și are un timp de gel de 20 de minute. Deoarece aceste intervale de timp nu sunt adecvate pentru polimerizarea filmelor subțiri, polimerii au fost modificați cu colagen și substanțe anorganice conținând Ba, Cu, Sc, Ag, La, Y pentru a determina o nano-structurare prin reacții chimice locale (ca în cazul metodei gelului citric) [7], [35], [76].

Pentru facilitarea prezentării și analizei rezultatelor cercetării amestecurile polimerice modificate utilizate pentru acoperirea suprafețelor probelor din bronz CuSn12-C, ce urmau a fi expuse cavitației vibratoare, sunt notate ca **amestecuri de tip 1, 2...5**.

Procesul de modificare a amestecului polimeric cu agenți organici și anorganici a fost un proces de foarte lungă durată care a început prin dispersia colagenului în rășina vinil-estică modificată epoxy-novolac urmată de solubilizarea unor cantități bine precizate de agenți anorganici BaCl<sub>2</sub> (pentru toate amestecurile studiate) CuCl<sub>2</sub> pentru amestecurile notate 1, 2 și 5, AgNO<sub>3</sub> pentru amestecurile 3 și 4 și, în final, de solubilizarea unor cantități bine precizate de YCl<sub>3</sub> pentru amestecurile 2 și 4, ScCl<sub>3</sub> pentru amestecurile 1 și 3 și, respectiv, La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, pentru amestecul 5. În final, a fost adăugată o cantitate de rășină epoxidică pentru obținerea amestecului polimeric.

Înainte de începerea procedurii tehnologice de acoperire cu amestecul polimeric, la fiecare proba de bronz s-a realizat oxidarea părților plană și cilindrică - vezi fig.1- prin spălare cu acid citric, urmată de: arderea acestuia într-un cuptor la 100 °C; lustruire cu hârtie abrazivă (realizându-se o rugozitate Ra = 20-25 μm); spălare cu apă distilată și etanol (99%).

Pașii tehnologici parcurși în depunerea amestecurilor polimerice pe suprafața ce urma a fi expusă atacului cavitației sunt:

1. încălzirea în cuptor a probelor din bronz la 90 °C;
2. scufundarea suprafețelor de acoperit în baie de amestec polimeric (rotație continuă în jurul axei probei timp de 5 minute la 50rot/min) îndepărtarea surplusului de amestec prin centrifugare (timp de un minut la 1000rot/min);
3. scufundare a suprafețelor de acoperit în întăritorul rășinii epoxidice (EPIPHEN DE 4020), proba este menținută în mișcare de rotație în jurul axei pentru 3 minute la 50rot/min după care este centrifugată timp de un minut la 1000rot/min, pentru îndepărtarea excesului de întăritor;
4. proba este reintrodusă în etuvă la 90°C, timp de o oră;
5. se repetă pașii doi și trei din descrierea de mai sus pentru depunerea unui nou strat de amestec polimeric;
- 6.a. după depunerea celui de-al doilea strat de amestec polimeric, o epruvetă a fost lăsată să polimerizeze la temperatura ambiantă (cea notată x.2), timp de o oră;
- 6.b. după depunerea celui de-al doilea strat de amestec polimeric proba (notată x.1) a fost introdusă în etuvă la 90°C;
7. se repetă etapele 2 și 3 din descrierea de mai sus, pentru depunerea celui de-al treilea strat de polimer modificat și proba este introdusă în etuvă, la 90°C, pentru polimerizare, timp de 24 de ore.

Datorită faptului că probele marcate x.2 (cu x denotând tipul amestecului polimeric) au cel de-al doilea strat polimerizat natural este posibil ca acoperirile acestora să fie mai flexibile și să conducă la un răspuns mai bun în cazul testelor de eroziune cavitațională. În toate cazurile rezultatul este o peliculă de amestec polimeric modificat cu grosimea de sub 0.1mm, realizată din trei straturi

### 5.1.2 Morfologia structurii amestecurilor polimerice

Analiza morfologică, s-a realizat pe fiecare dintre cele 5 tipuri de straturi polimerice, depuse pe fiecare probă, urmărind identificarea eventualelor nano-structuri în pelicula de polimer și s-au măsurat unele agregări.

Această analiză este prezentată pe fiecare tip de rășină polimerică.

#### a) Amestecurile de tip 1 și 2

Așa cum se poate observa în fig. 5.2a, 5.3a, 5.4a și 5.5a analiza SEM nu evidențiază diferențe semnificative între cele două probe cu același polimer și nici între eșantioanele cu polimeri diferiți. De asemenea, analizele SEM și EDAX sunt menite să identifice elementele anorganice plasate în polimer - fig.5.2+5.5. Analizele EDAX evidențiază atât existența unor structuri de dimensiuni nanometrice, cât și distribuția lor uniformă în pelicula subțire polimerică (fig.5.2b, 5.3b, 5.4b și 5.5b).

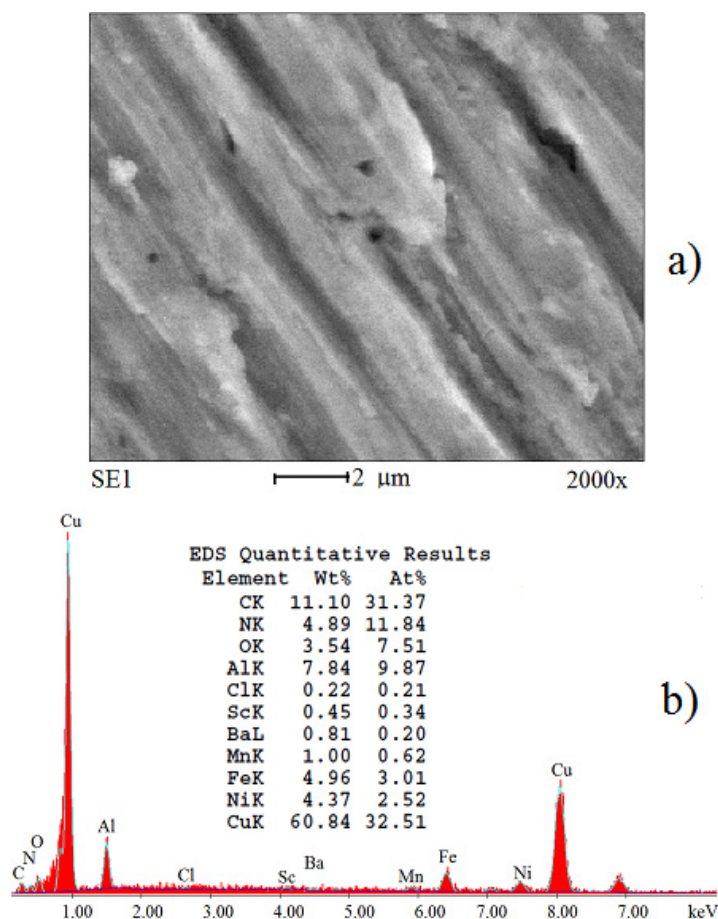


Fig. 5.2 Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 1 (Proba 1.1)

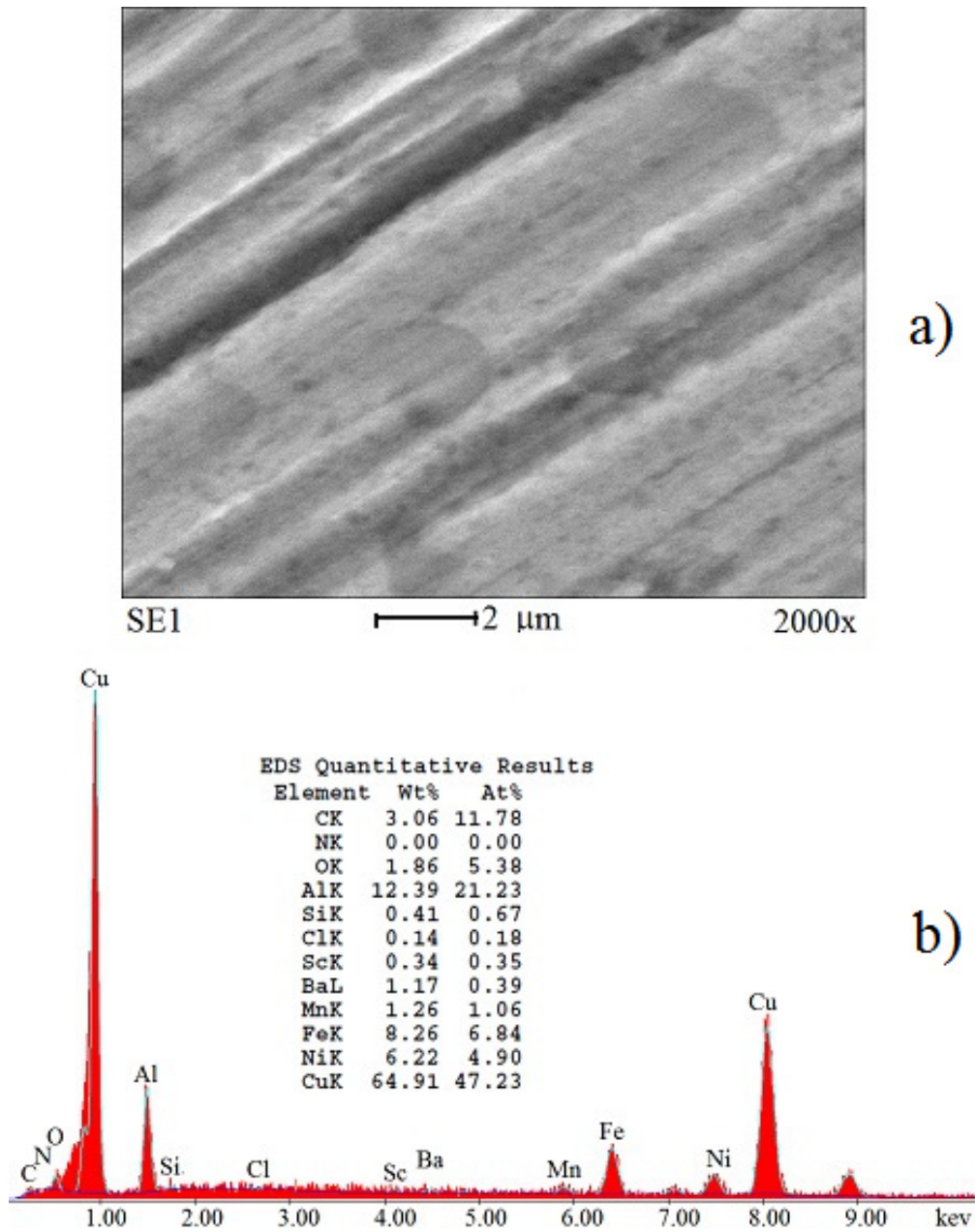


Fig. 5.3. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 1 (Proba 1.2)

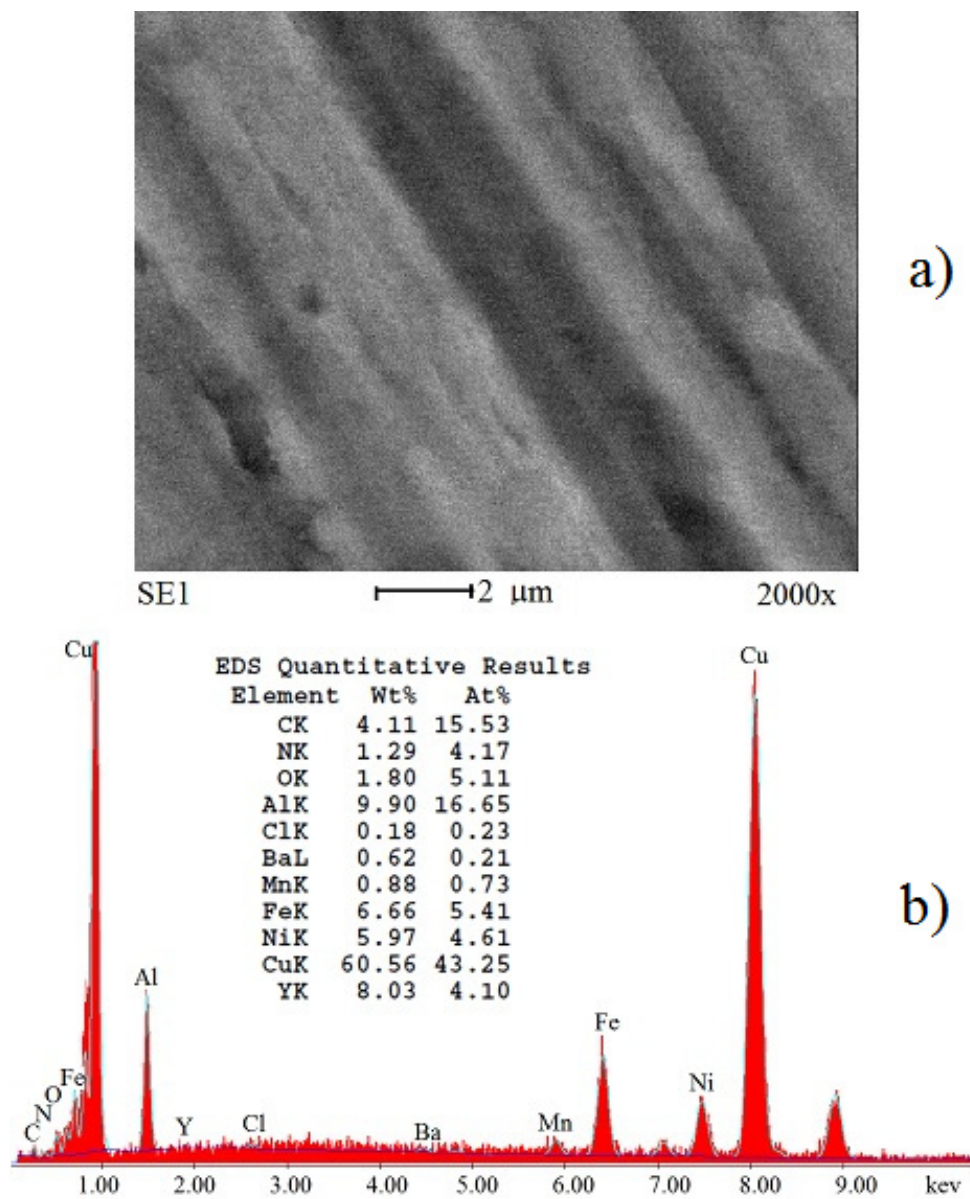


Fig. 5.4. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 2 (proba 2.1)

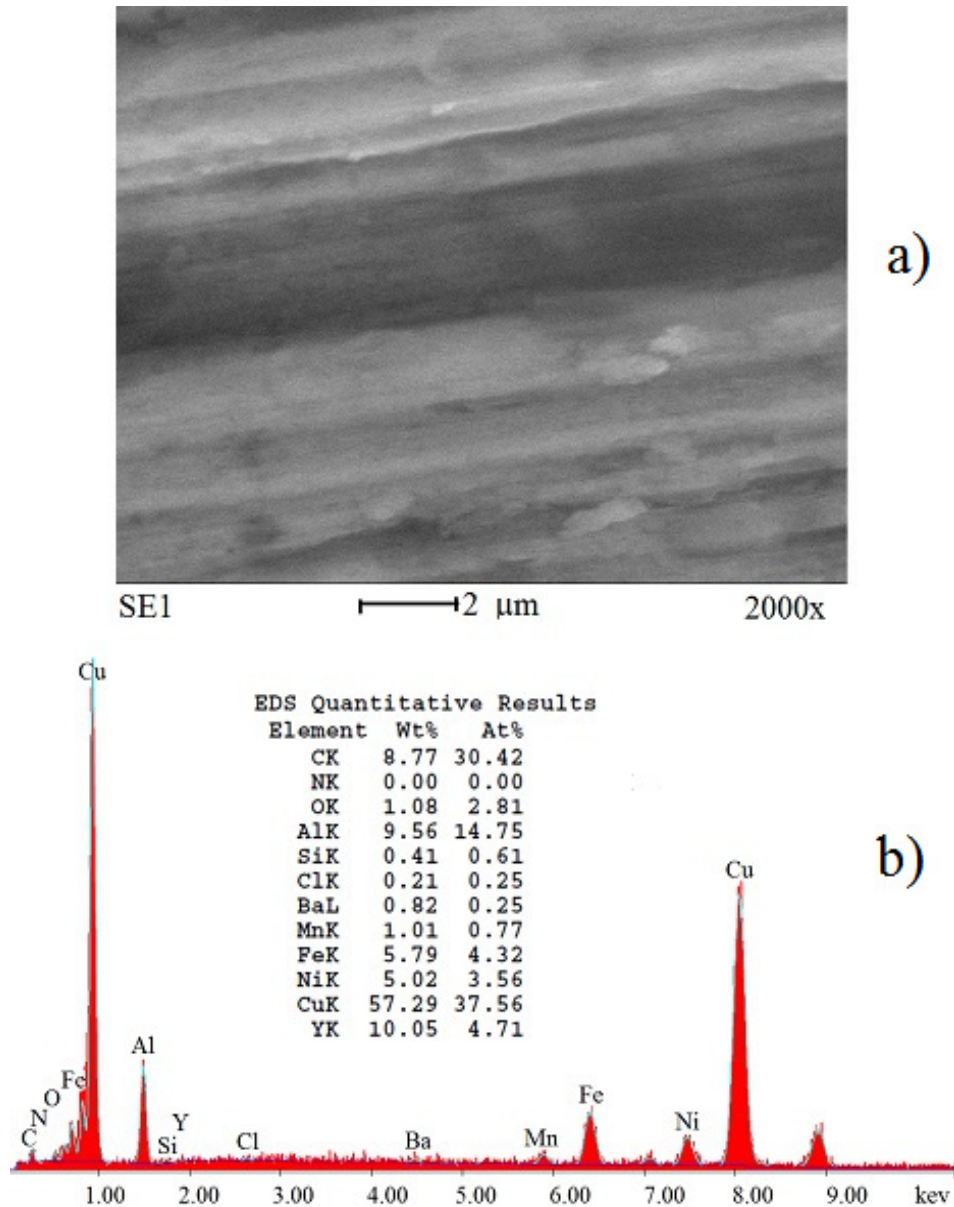


Fig. 5.5. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestec de tip 2 (proba 2.2)

Analiza cantitativă arată prezența masivă a cuprului (componenta principală a aliajului metalic) și a concentrațiilor relativ ridicate de fier, mangan, nichel, siliciu și aluminiu, toate prezente în compoziția chimică a aliajului. Așa cum era de așteptat,

prezența bariului și a scandiului sunt foarte scăzute deoarece nu sunt prezenți în aliaj, ci în pelicula subțire.

Diferențele de valori ale concentrației, pentru aceeași componentă, în cele două analize sunt datorate faptului că analiza EDAX este realizată pe o anumită porțiune din suprafață (în acest caz aproximativ  $80 \mu\text{m}^2$ ), selectată aleator și ar putea să fie interpretată ca o diferență cauzată de neomogenitatea distribuției spațiale a atomilor de componente ale aliajului. De asemenea, trebuie spus că concentrația cuprului include contribuția atomilor de cupru care au fost adăugați pentru a modifica polimerul.

Analiza cantitativă relevă și prezența elementelor organice cum ar fi carbonul, oxigenul, azotul, clorul, toate fiind prezente în amestecul de polimeri, dar oxigenul poate fi prezent și ca oxizi ai componentelor metalice ale aliajului la suprafața probei.

Analiza Raman, realizată pe microscop, nu a evidențiat modificări chimice, așa cum se poate observa în fig. 5.6b,c și 5.7b,c, deși era posibil, din cauza concentrației scăzute de compuși de collagen sau anorganici.

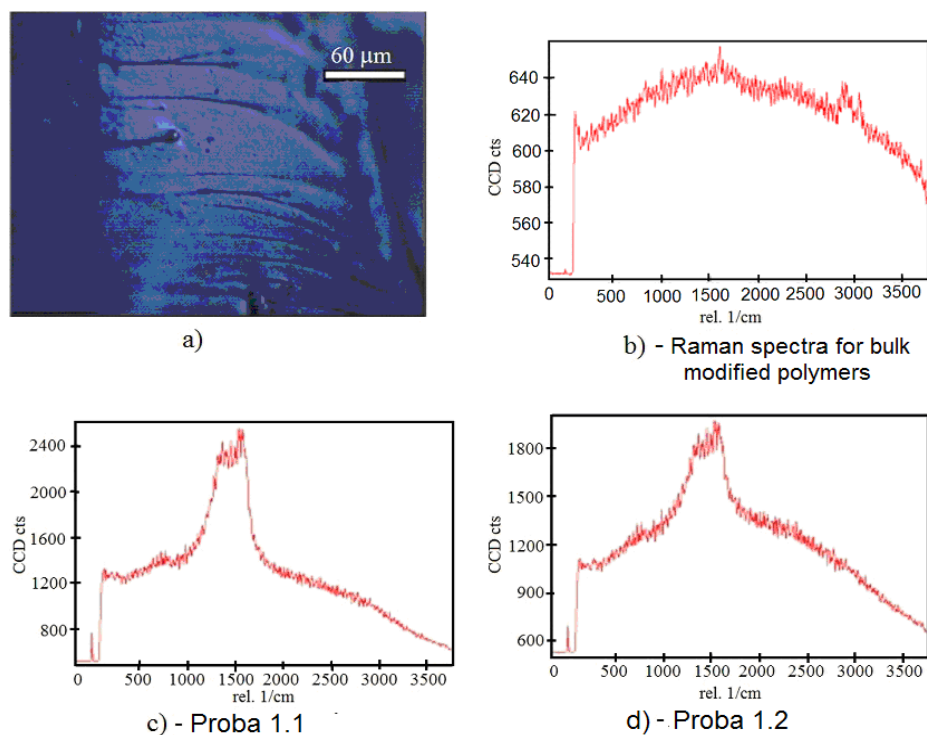


Fig. 5.6 Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 1)

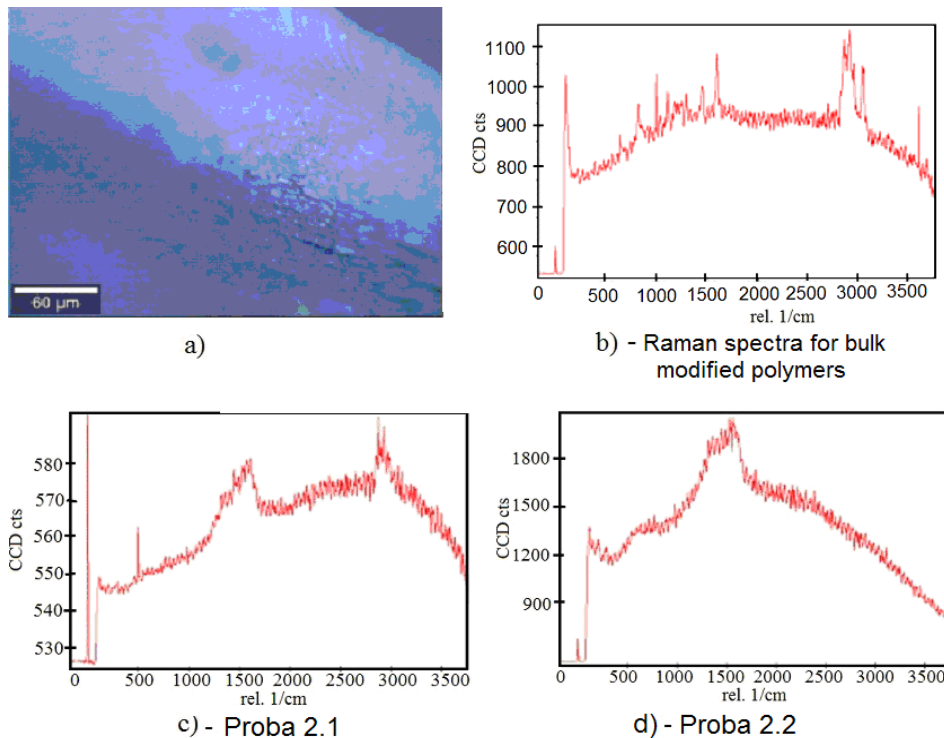


Fig. 5.7. Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d)  
(Strat de amestec de tip 2)

Din fig. 5.6 și 5.7 se poate observa că toate spectrele de polimeri Raman în volum arată un vârf la  $1500\text{ cm}^{-1}$  și un altul la aproximativ  $3000\text{ cm}^{-1}$ . În cazul filmelor subțiri, toate spectrele au același profil cu un vârf multiplu centrat pe valoarea de  $1500\text{ cm}^{-1}$ . Această situație poate fi asociată cu amprenta metalică Raman.

Ca analiză SEM, rezultatele analizei Raman sunt o chestiune de probabilitate (rezultatele sunt puternic dependente de zona analizată) și nu poate oferi rezultate exacte privind formarea sau neformarea noilor legături chimice. Este foarte posibil ca prezența particulelor anorganice de dimensiuni nanometrice să conducă la legături mai puternice între polimer și suprafața metalică a probelor de bronz, dar investigațiile trebuie continuate.

#### **b) Ametecurile de tip 3 și 4**

În ceea ce privește analiza SEM a suprafețelor acoperite cu straturi de polimeri, nu există diferențe majore (figurile 5.8a, 5.9a, 5.10a și 5.11a). Imaginile arată unele pete întunecate ale căror dimensiuni sunt de aproximativ câteva sute de nanometri. Probabil, aceste puncte întunecate reprezintă nanostructuri formate în interiorul amestecului de polimeri datorită unor reacții chimice locale între compușii anorganici. Analiza EDAX (efectuată împreună cu analiza SEM) relevă prezența tuturor speciilor în aliajul metalic și prezența foarte scăzută de bariu, argint, scandiu și ytriu care au fost introduse în polimer (fig.5.8b, 5.9b, 5.10b și 5.11b).



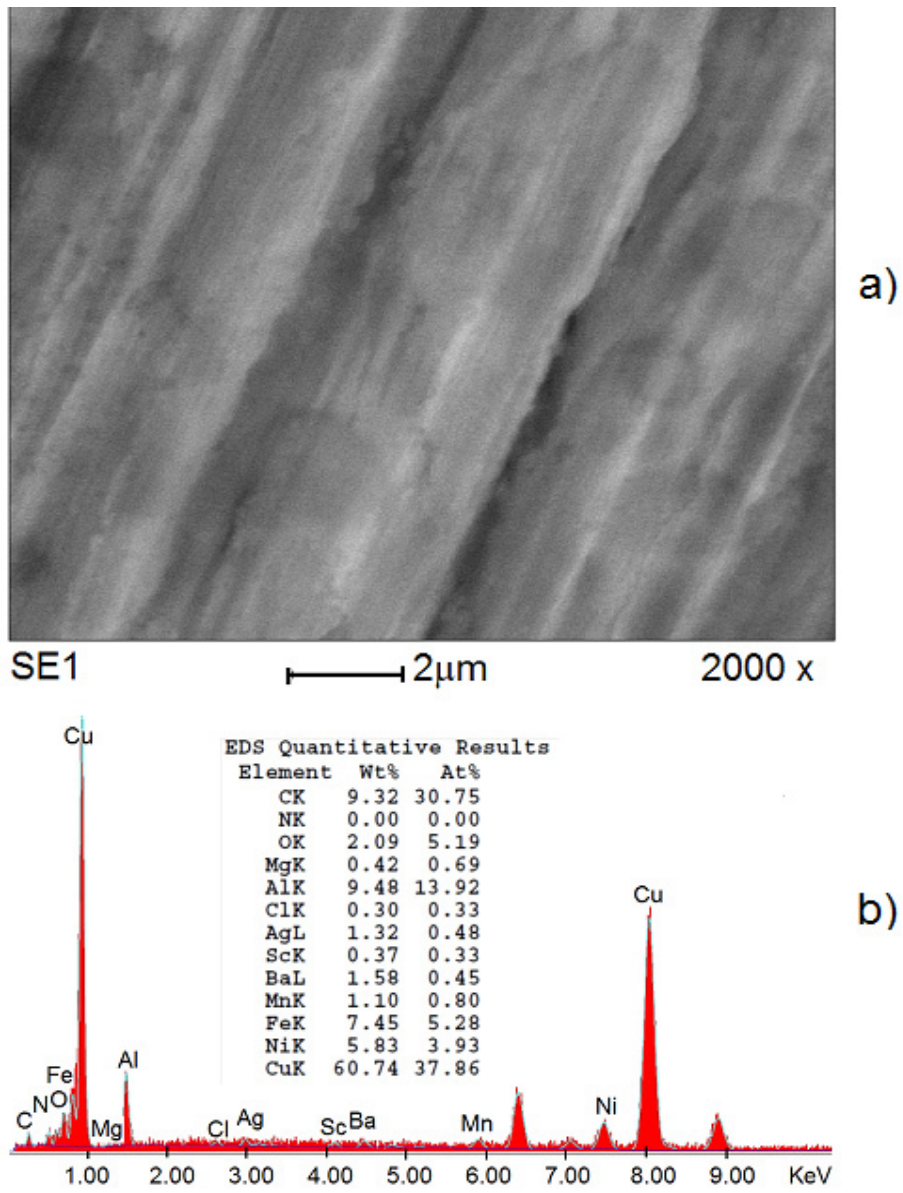


Fig. 5.8. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 3 (proba 3.1)

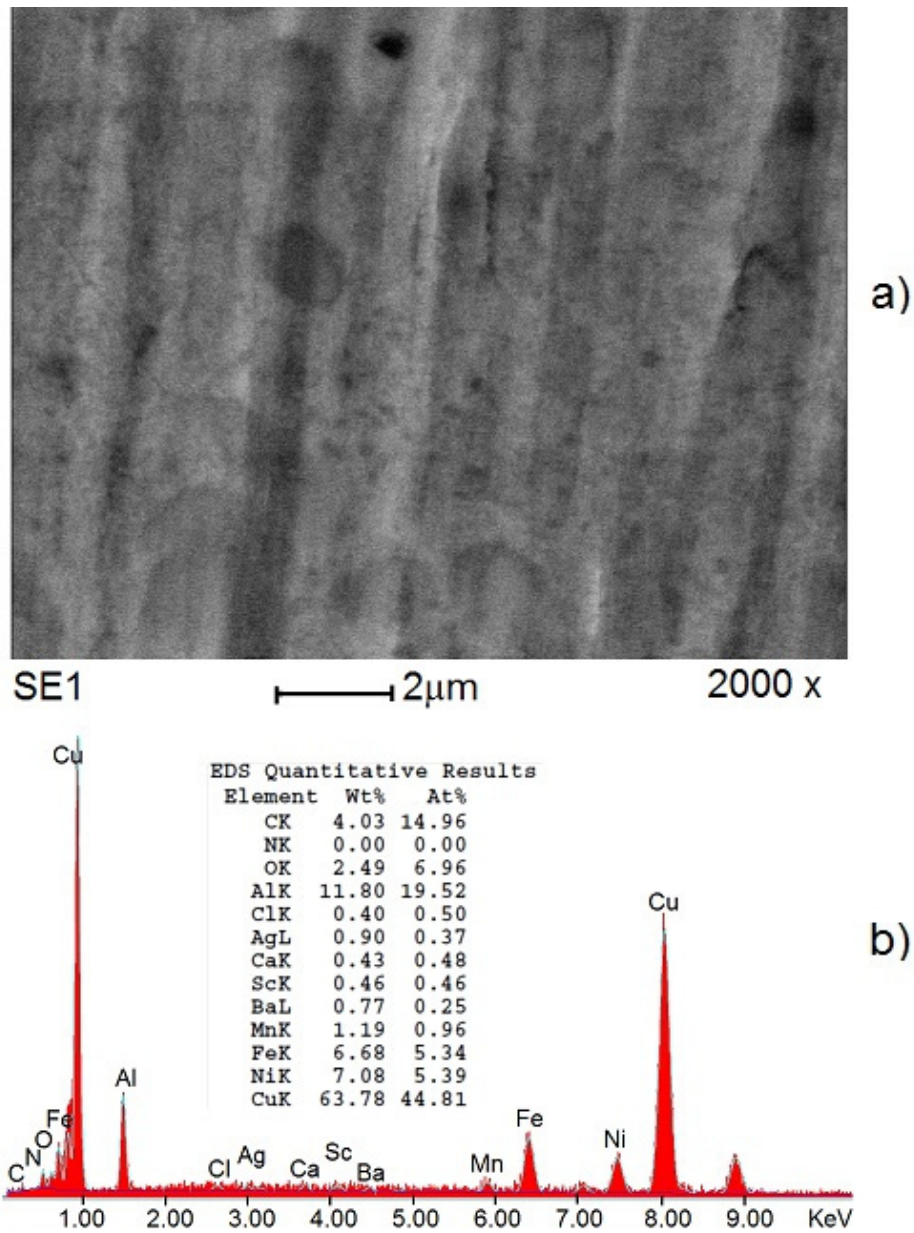


Fig. 5.9. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 3 (proba 3.2)

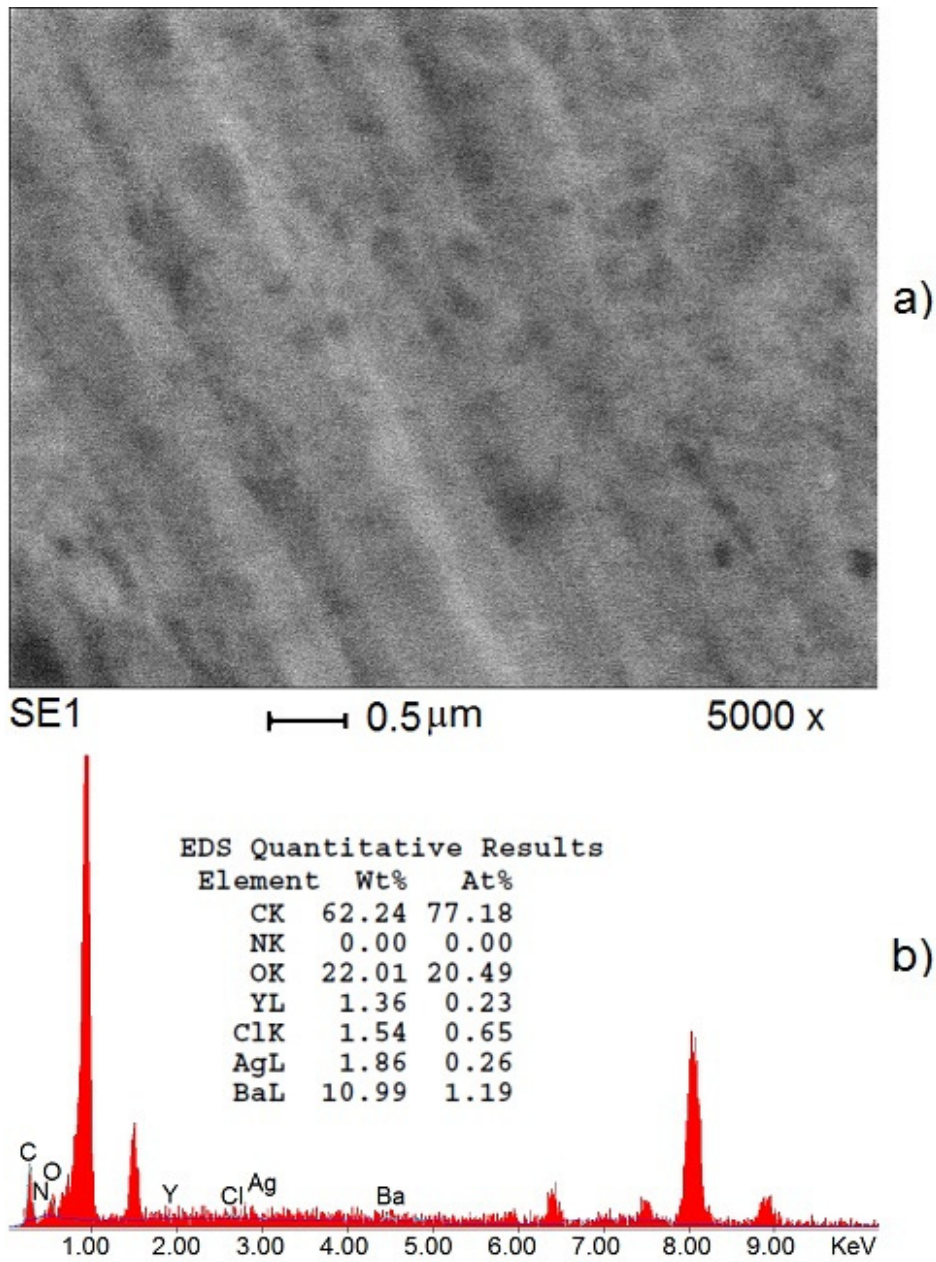


Fig. 5.10. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 4 (proba 4.1)

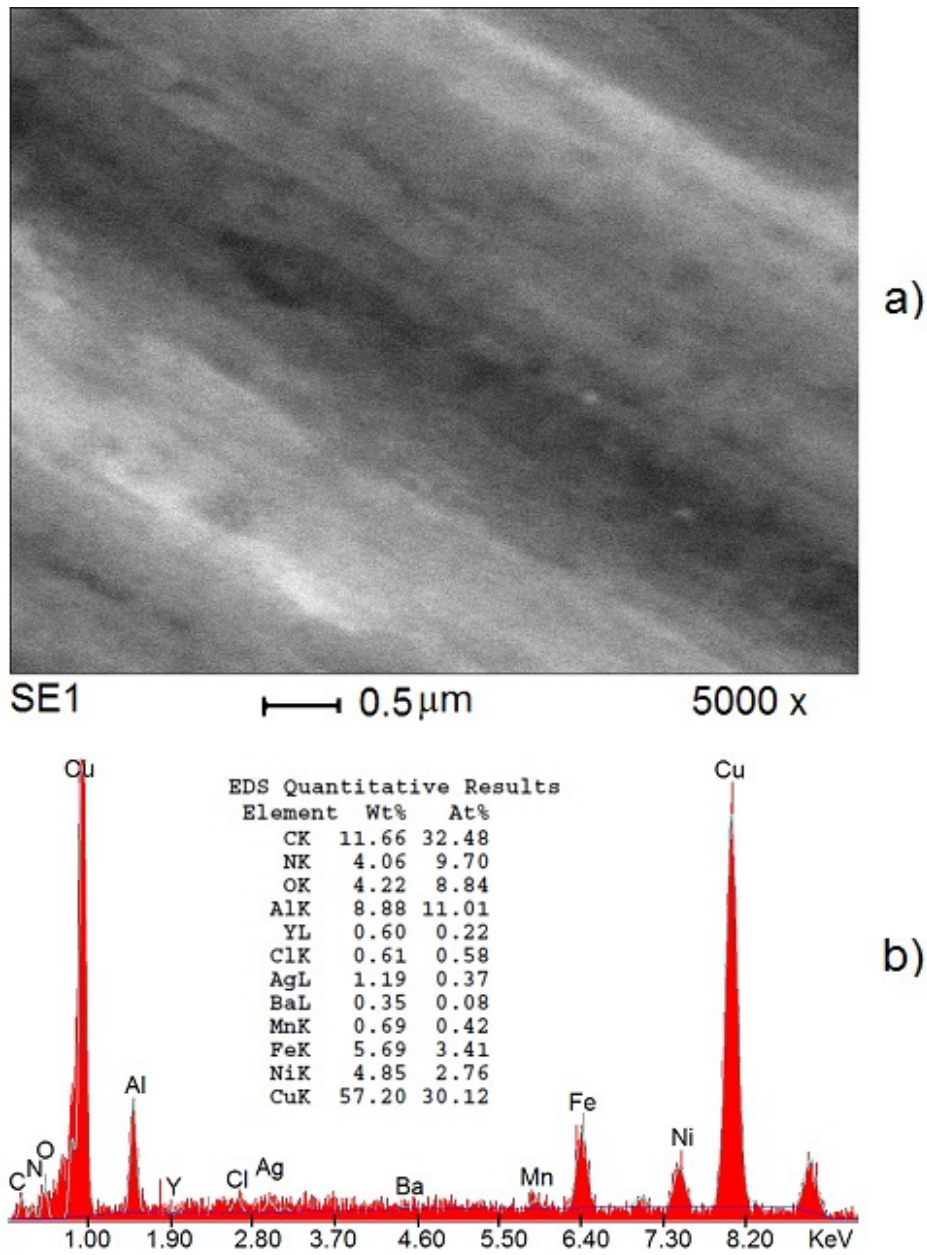
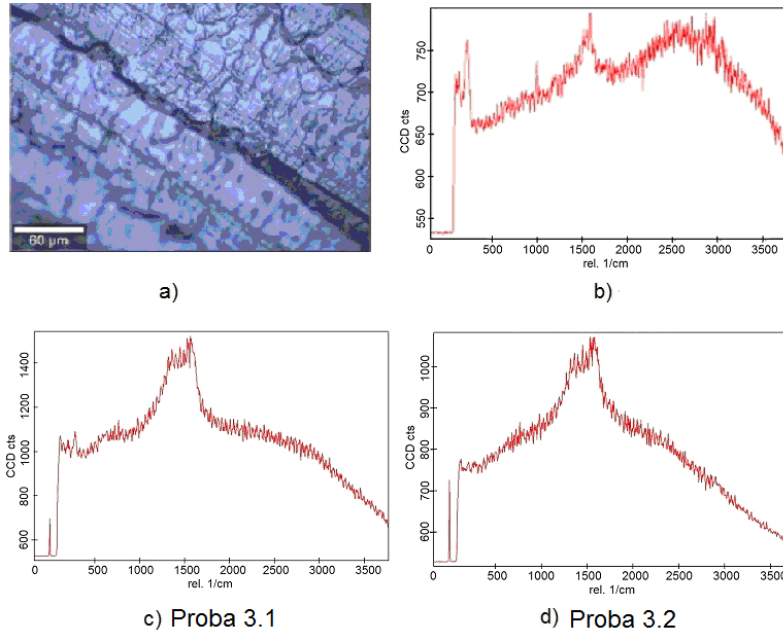
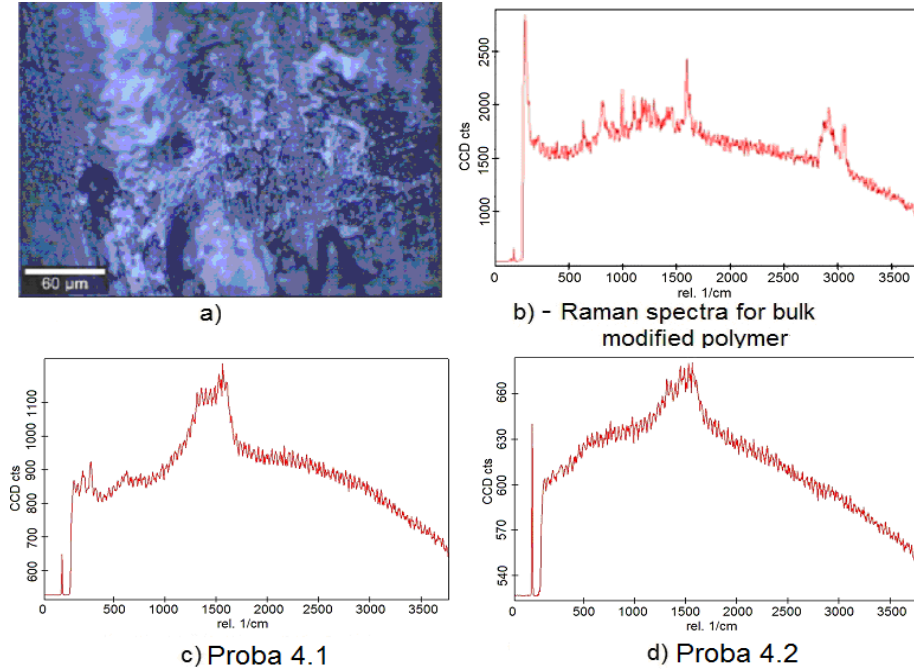


Fig. 5.11. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 4 (proba 4.2)



**Fig. 5.12.** Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 3)



**Fig. 5.13.** Imagine microscopică RAMAN (a) și Spectrul RAMAN (b, c și d) (Strat de amestec de tip 4)

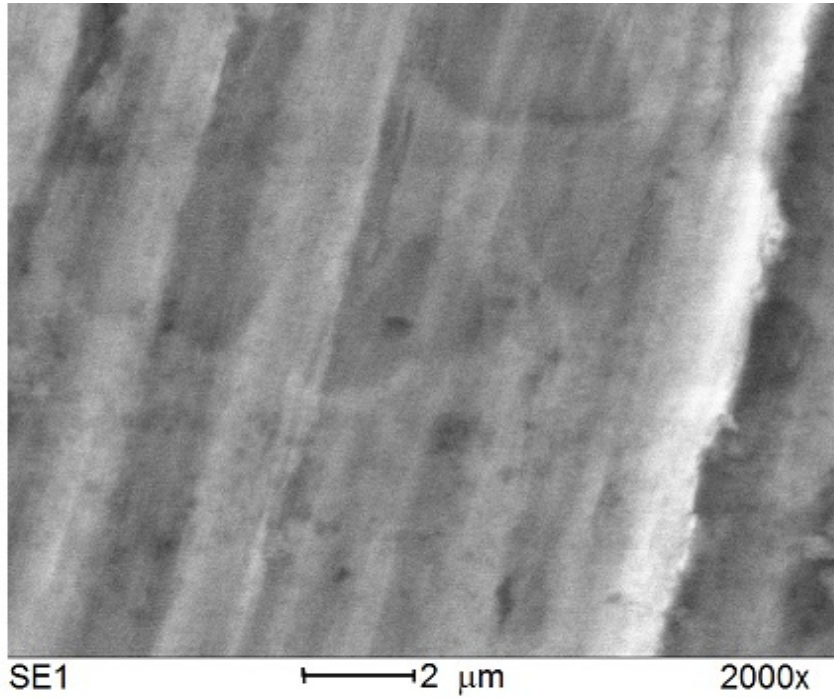
Imaginile microscopului Raman prezintă unele diferențe între suprafețele de ruptură ale celor două tipuri de polimeri (ambele bastoane polimerice au fost rupte aleator), motiv pentru care această zonă de fractură a fost investigată. În cazul polimerului (stratului de amestec polimeric) 3 aspectul este unul de solzi de pește, în timp ce polimerul 4 este mai compact și prezintă niște clustere de dimensiune transversală de aproximativ 20  $\mu\text{m}$ . Aceste diferențe se explică prin prezența Scandiului sau a Ytriului cu efecte asupra mecanismului de polimerizare. Spectroscopia Raman fig. 5.12b și 5.13b nu prezintă diferențe între cele două spectre Raman, cu excepția picului de  $3000\text{ cm}^{-1}$ , foarte bine definit pentru polimerul 4 și mai mare și dispersat pentru polimerul 3. În ceea ce privește analiza Raman, a filmelor polimerice, practic nu există diferențe între cele patru spectre (5.12c, d și 5.13c, d) cu familia foarte bine definită de vârfuri centrate în jur de  $1500\text{ cm}^{-1}$ . Aceste familii de vârfuri conțin atât semnul polimerului de bază (cel mai înalt vârf al fiecărei familii care poate fi observat și în spectrele Raman ale celor doi polimeri 5.12b și 5.13b) și semnele substratului metalic (formate de celelalte vârfuri ale fiecărei familii) care sunt identice pentru toate cele patru eșantioane.

### **c) Amestecul de tip 5**

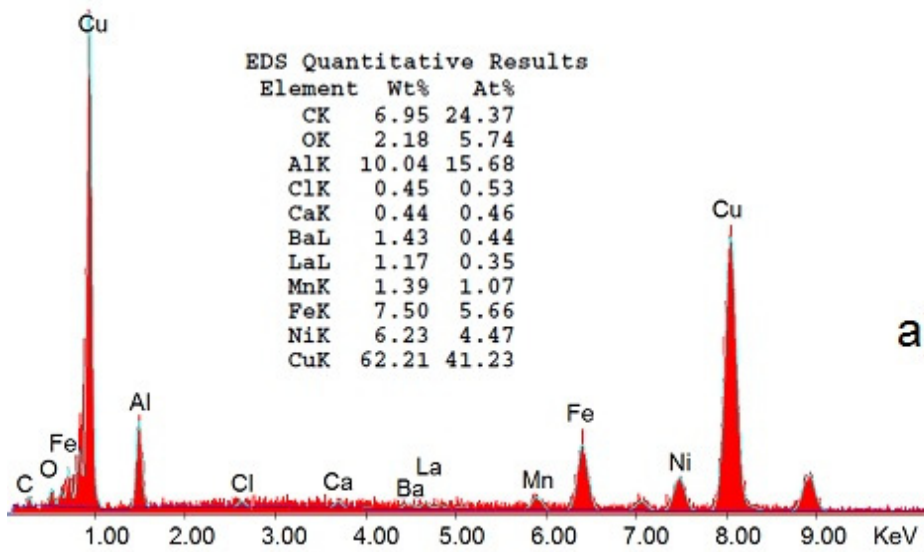
Analiza morfologică a filmelor de polimeri este realizată pe baza imaginilor din fig.5.14-5.16.

Constatări:

- analizele SEM, fig.5.14b -5.15b și EDAX, fig. 5.14a - 5.15a, nu evidențiază diferențe semnificative între cele două probe, însă analiza EDAX evidențiază și elementele anorganice plasate în polimer ;
- imaginile SEM din fig. 5.15b dezvăluie direcția principală de prelucrare mecanică (prima linie a fiecărui eșantion), în timp ce a doua linie relevă puncte mici care nu pot fi explicate ca un efect al sculei de prelucrare și ar putea fi asociate cu nanoparticule anorganice complexe;
- analiza EDAX, fig.5.14a și 5.15a, arată prezența masivă a cuprului (componenta principală a aliajului metalic) și a concentrațiilor relativ ridicate de fier, mangan, nichel și aluminiu, dar și prezența bariului, foarte scăzută, deoarece nu este prezentă în aliaj, ci în pelicula de polimer;
- analizele Raman, fig.5.16, nu au evidențiat modificări chimice, deși ar fi fost posibil din cauza concentrației scăzute de compuși de collagen sau anorganici. În această figură este redată și o imagine a fracturilor de polimer în vrac (fig.5.16b) care a fost capturată cu ajutorul microscopului Raman. Tot odată, se constată că ambele spectre au același profil, cu un vârf multiplu centrat pe valoarea de  $1500\text{ cm}^{-1}$ , situație ce poate fi asociată cu amprenta metalică Raman, fiind posibilă și prin prezența particulelor anorganice de dimensiuni nanometrice, care realizează legături mai puternice între polimer și suprafața metalică. Totuși, pentru certitudine, investigațiile trebuie continuate.



b)



a)

Fig. 5.14. Analiza EDAX (a) și imagine SEM (b) pentru stratul din amestecul de tip 5 (Proba 5.1)

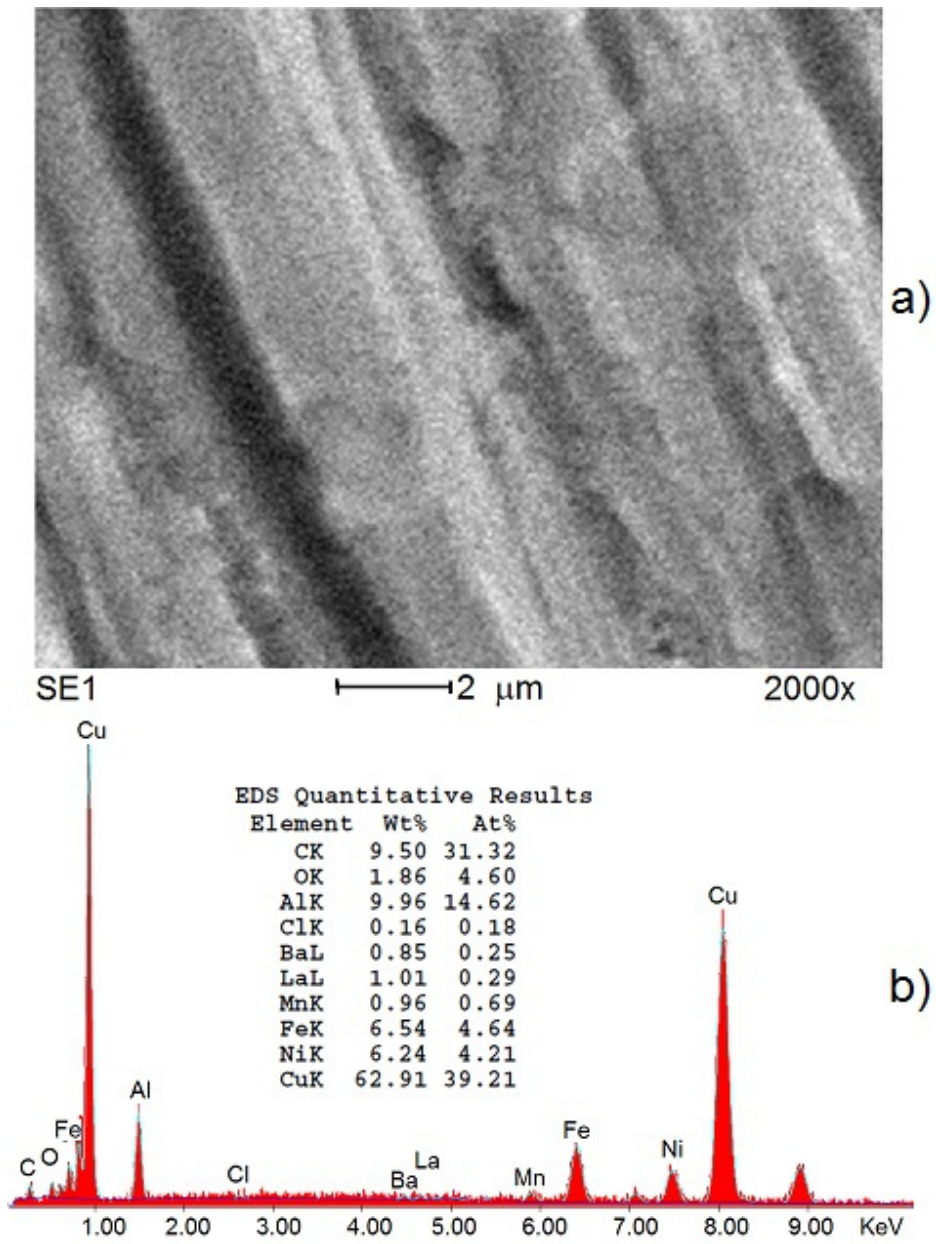


Fig. 5.15. Imagine SEM (a) și analiza EDAX (b) pentru stratul din amestecul de tip 5 (Proba 5.2)



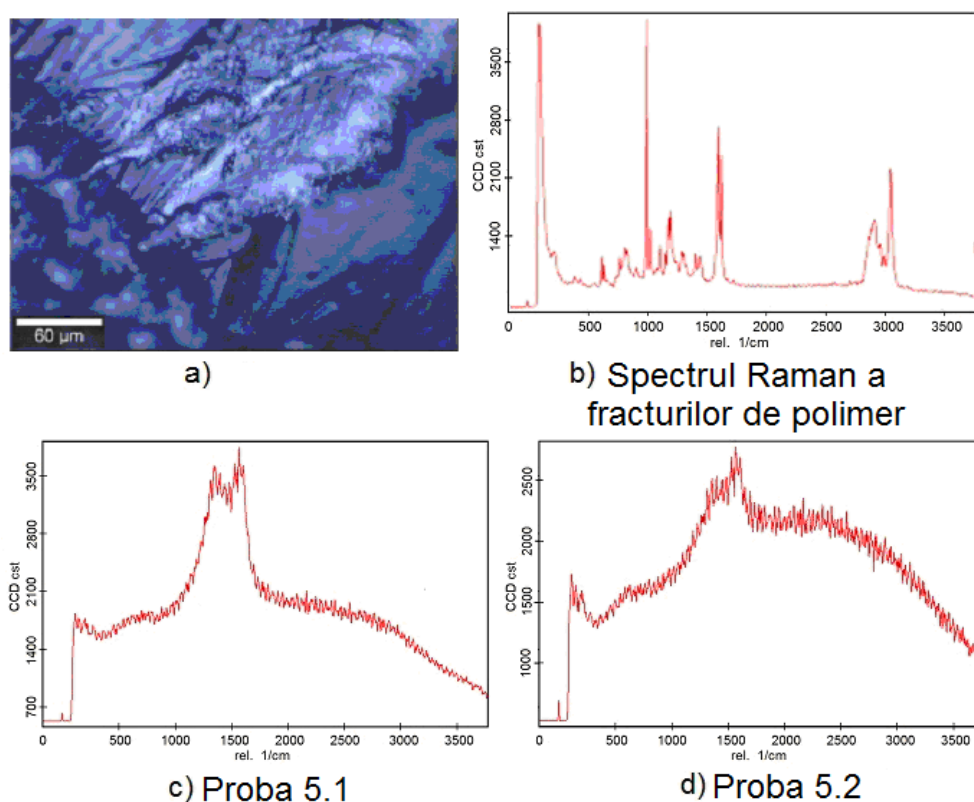


Fig. 5.16. imagine microscopica RAMAN (a) și spectrele Raman (b, c și d) (Strat de amestec de tip 5)

### 5.1.3. Cercetarea comportării la cavitația vibratoare

#### 5.1.3.1 Aparatura și metodică de cercetare

Pentru verificarea comportării și rezistenței amestecurilor polimerice la cavitație s-a utilizat aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [10], [12], descris în capitolul 2. Parametrii funcționali ai aparatului vibrator s-au menținut la valorile uzuale, iar procedura specifică testului de cavitație (pregătire probe, măsurare pierderi de masă, fotografierea suprafeței atacate), folosită pe parcursul derulării programului experimental, este cea descrisă în capitolul 1, prevăzută de normele ASTM G32-2010 și devenită cutuma laboratorului [10], [12], [23], [59].

Datorită duratei diferite de îndepărtare a peliculei polimerice, la cavitația vibratoare, (durata necesară de testare, conform cutumei laboratorului, fiind de 165 minute [13]), în actuala situație, ca urmare a slabei legături de aderență, dintre aceasta și metalul de bază (bronz), la presiunile foarte mari (sute de bari [1-4]), dezvoltate prin impactul cu microjeturile cavitaționale, durata testului, pentru evaluarea comportării, a fost impusă de apariția pittingurilor în suprafața plană a probei (vezi fig.5.1) și de expulzarea întregii pelicule de rășină de pe aceasta.

### 5.1.3.2 Rezultate și discuții

#### 5.1.3.2.1 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor de tip 1 și 2

Datorită faptului că aderența stratului de rășină, pe suprafața probei, atacată de microjeturile cavitaționale, nu a rezistat mai mult de 45 minute, evaluarea comportării și rezistenței la cavitația vibratoare, pe baza curbelor specifice și a comparării parametrilor caracteristici (adâncimea medie de eroziune, viteza de pătrundere a eroziunii), construite și determinate cu relațiile stabilite în cadrul laboratorului [22], [70], nu a mai fost posibilă. În această situație, evaluarea comportării straturilor de rășină la vibrațiile și microjeturile generate în timpul cavitației, pentru fiecare din cele două tipuri de straturi, respectiv cele 4 specimene (câte două pentru fiecare tip de rășină), este realizată pe baza imaginilor fotografice, fig.5.17-5.20, realizate cu aparate fotografice de înaltă rezoluție și a microscopelor optice.

Imaginile din figura 5.17 arată comportarea peliculei de rășină polimerică tip 1, depusă pe suprafața plană a probei 1.1. Astfel:

- după 5 minute de expunere la cavitație, înspre periferie, apar ușoare urme de pittinguri și desprinderi pe suprafețe mici, cu pătrunderea apei între stratul de rășină și metalul de bază;
- după 14 minute de expunere proba s-a fisurat și nu a mai fost posibilă continuarea testului, însă, se observă cum suprafața de desprindere a peliculei de amestec polimeric, fără a se rupe de restul, s-a mărit și în interiorul suprafeței probei apar ușoare ciupituri;

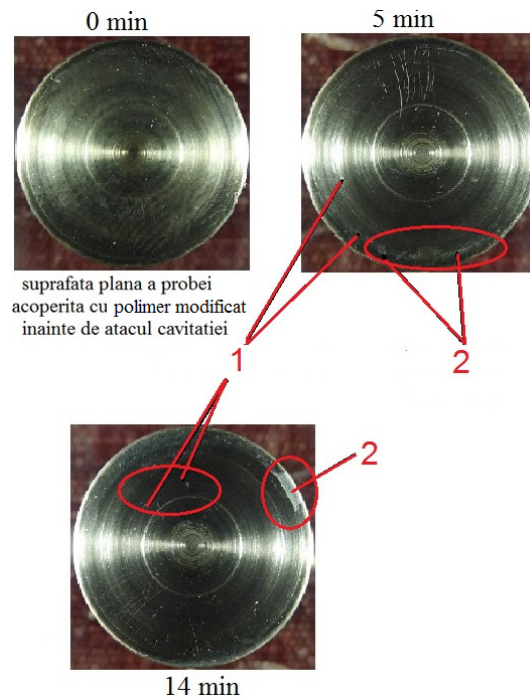


Fig.5.17 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 1 depuse pe suprafața plană a probei 1.1

- 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;
- 2-perforări în pelicula de polimer

Imaginile din figura 5.18 arată comportarea peliculei de amestec de tip 1, depus pe suprafața plană a probei 1.2. Astfel:

- după 5 minute de expunere la cavitație, suprafața atacată prezintă mici cavitați (pittinguri) și ușoare urme de exfoliere, fără a se desprinde de restul peliculei;
- după 15 minute de expunere apar noi suprafețe de exfoliere, spre zona centrală, dar și cavitați, fără a se accentua adâncimea, cum se constată, obișnuit, într-o structură metalică;
- după 30 minute, pelicula are desprinderi pe arii mari, cu predilecție spre periferie și aleatoriu în suprafața plană a probei;
- după 45 minute de solicitare la cavitație, întreaga peliculă a fost îndepărtată de pe suprafața metalică și au început să se realizeze caverne, obișnuit, pe inelul periferic, conform mecanismului de degradare, descris în [59].

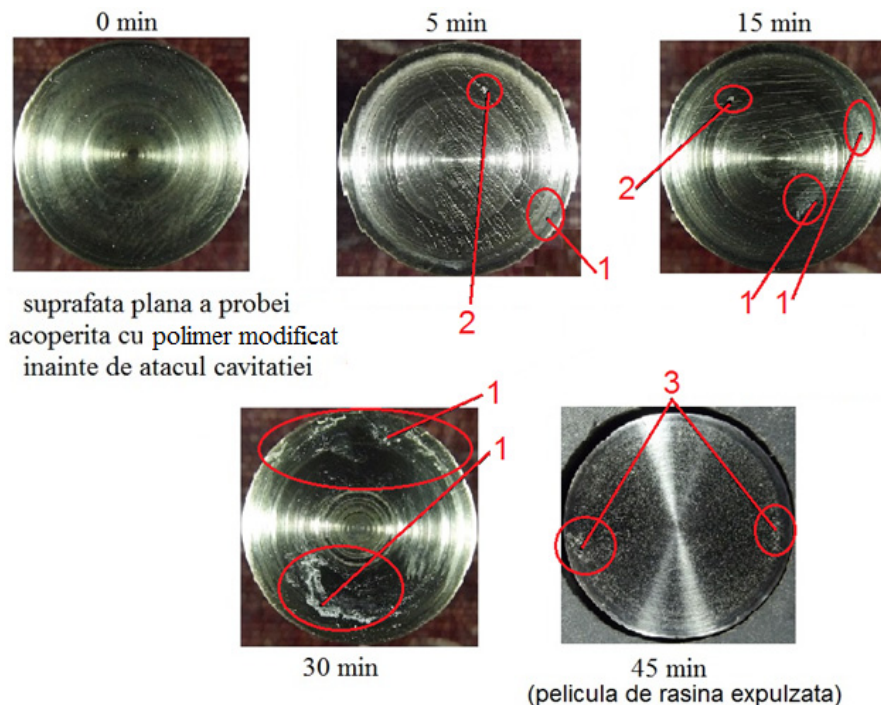


Fig.5.18 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec depuse pe suprafața plană a probei 1.2

- 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
2-perforări în pelicula polimerică; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Imaginile din figura 5.19 arată comportarea peliculei de amestec de tip 2, depus pe suprafața plană a probei 2.1. Astfel:

- după 5 minute de solicitare prin cavitație vibratoare apar zone mici în planul suprafeței și o zonă mare, de la periferie spre centru, în care pelicula s-a desprins de pe suprafața metalică, fără a se rupe de restul stratului de polimer, iar apa a pătruns între aceasta și metal. De asemenea, se văd și ciupituri, care arată că, în acele locuri, pelicula a fost perforată. Analiza la microscopul optic, arată că, în zonele perforate, metalul de bază nu a fost afectat. Modul de realizare a acestor desprinderi dă impresia

unor retasuri, respectiv aderențe ca la piesele turnate. Însă, dispersia în planul suprafeței, de forme spiralate, este efectul norului cavitațional, similar celui generat de vârtejul din elicele navale și rotoarele mașinilor hidraulice, descris în [10];  
 - după 15 minute ale atacului cavitației, suprafața de desprindere, creată în perioada de 5 minute, se mărește, dar, simultan, în planul suprafeței apar și noi zone de desprindere. Întrucât, chiar în primele secunde ale următoarei perioade de testare, proba de bronz s-a fisurat, studiul experimental al acestui ameste polimeric a fost sistat.

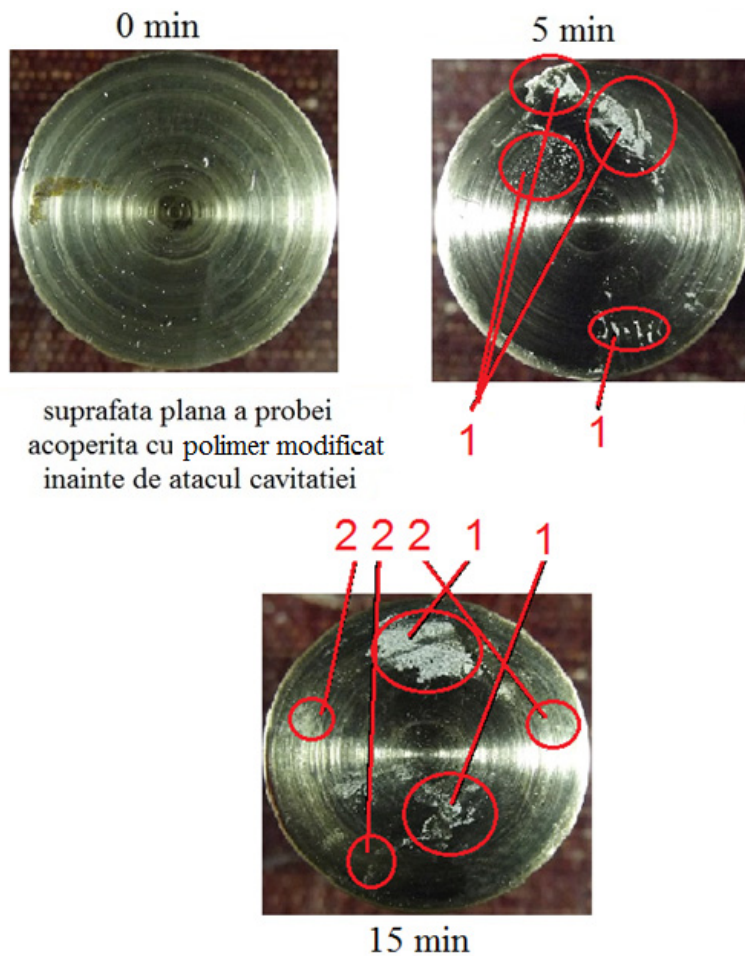


Fig. 5.19 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 2, depuse pe suprafața plană a probelor 2.1  
 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
 2-perforări în pelicula polimerică

Imaginile din figura 5.20 arată comportarea peliculei de amestec de tip 2 depusă pe suprafața plană a probelor 2.1. Astfel:

- după 5 minute de expunere la cavitație, în planul suprafeței, s-a produs o zonă de desprindere, cu ușoară infiltrare a apei și cu foarte multe bule de mici dimensiuni. Fenomenul este explicabil prin caracteristica formării norului și jetului cavitațional, din vasul cu lichid, descris în [59];
- după 15 minute de cavitație, se constată că, între peliculă și suprafața metalică, se formează o zonă foarte mare cu bule de mici dimensiuni. Analiza la microscopul optic a evidențiat un număr mare de perforări ale stratului de amestec (pleicului polimerice) care, în timpul oscilațiilor, a permis pătrunderea apei și aerului, determinând formarea bulelor, conform mecanismului de apariție a bulelor cavitaționale în aparatele vibratoare. Totodată, analiza la microscopul optic a arătat că spre periferie există mici ciupituri/pittinguri în metalul de bază;
- după 30 minute de atacul cavitației suprafața de peliculă desprinsă se mărește, apar și zone în care parte din pelicula de rășină a fost ruptă și expulzată;
- după 45 de minute, întreaga peliculă a fost expulzată, iar suprafața metalică are un aspect spongios, caracteristic suprafețelor erodate de cavitație. Această constatare sugerează că expulzarea stratului de rășină s-a realizat imediat după începerea testului, în perioada 30-45 minute, lăsând posibilitatea ca suprafața să fie degradată de impacturile cu undele de șoc și microjeturile cavitaționale.

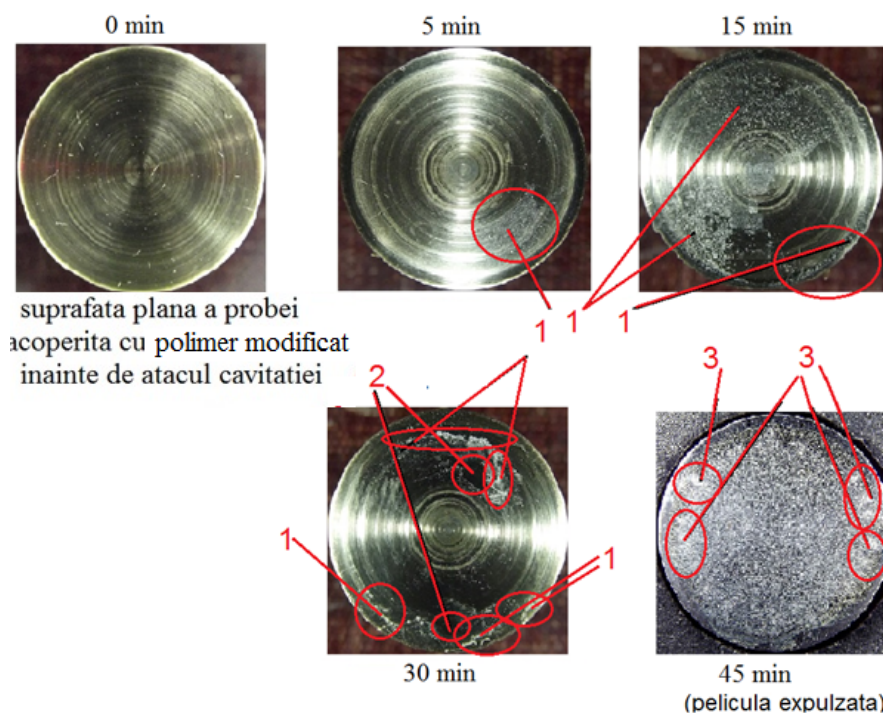


Fig. 5.20 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 2 depuse pe suprafața plană a probelor 2.2

- 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;
- 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Din analizele realizate mai sus se constată că la toate probele, indiferent de tehnologia utilizată la construirea rășinii și fixarea ei pe suprafața expusă la cavitație,

În primele 5 minute de solicitare la vibrațiile și tensiunile induse prin impacturile cu microjeturile, generate de imploziile bulelor cavitaționale, apar desprinderi ale peliculelor pe suprafețe mai mari sau mai mici, funcție de soluțiile și procedura utilizată la crearea și fixarea stratului de rășină (amestec). Cu creșterea duratei expunerii la cavitație, suprafața decopertată se mărește și apar eroziunile de tip pitting, specifice acestui fenomen hidrodinamic [12], [59].

Dintre cele două tipuri de amestecuri polimerice (patru tipuri de probe), după comportarea până la minutul 14/15, se poate afirma că amestecurile de tip 1 oferă o rezistență superioară solicitărilor de oboseală din timpul cavitației.

Comparativ cu unele straturi de materiale compozite depuse HVOF pe suprafețe de oțel carbon și oțel inoxidabil [10], [23] și cercetate în cadrul laboratorului nostru, la care expulzarea s-a manifestat încă din primele 5 minute, după modul în care se manifestă desprinderea și expulzarea straturilor amestec putem afirma că comportarea celor două tipuri de pelicule cercetate, depuse pe patru probe de cavitație, este superioară și oferă premisele găsirii parametrilor tehnologici de preparare și depunere, astfel încât să permită utilizarea lor la protejarea suprafețelor expuse solicitărilor cavitației.

**Observație:** *Vasul cu apă a fost golit după finalizarea fiecărui test; apa fiind filtrată printr-un tifon, în scopul reținerii peliculelor desprinse. Măsurătorile de grosime, realizate, pe câte 3 pelicule ale fiecărui specimen, au arătat că grosimea a fost aproximativ aceeași, de 75 -90 μm.*

#### **5.1.3.2.2 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor de tip 3 și 4**

Conform procedurii standard, au fost testate patru probe, două acoperite cu maestecuri de tip 3 și două acoperite cu amestecuri de tip 4.

Imaginile fotografice, combinate cu analizele la microscopul optic, arată comportări identice ale straturilor de polimer 3, respectiv ale straturilor de polimer 4. Prin urmare, pentru analiza comportării la solicitările ciclice, dezvoltate de șocurile produse prin impactul cu microjeturile și undele de șoc, create prin de mecanismul cavitației vibratoare, sunt utilizate imaginile fotografice, obținute pe una din cele două probe acoperite cu polimer 3, respectiv 4. Aceste imagini sunt prezentate în fig. 5.21 – 5.23.

Imaginile din fig.5.23 arată diferența dintre degradarea suprafeței metalice supusă eroziunii timp de 15 și 45 minute cu cea înregistrată pe suprafața protejată de straturile polimerice, după 45 minute de expunere la cavitație vibratoare.

Imaginile din figura 5.21 se referă la comportarea stratului de amestec de tip 3 și arată:

- după 5 minute, de expunere la cavitație, stratul de polimer prezintă perforări și zone de desprindere în care pătrunde apa și se formează mici bule vapoaze;
- după 15 minute, de expunere la cavitație zona desprinsă crește, simultan cu pătrunderea apei și formarea de bule vapoaze;
- după 30 minute de cavitație practic tot stratul de polimer este desprins de suprafața metalică a probei, iar o mare parte din acesta, în zona centrală a suprafeței, este rupt, permițând atacul eroziv al metalului suprafeței, așa cum se vede în fig.23, după 45 minute.

Imaginile din figura 5.22 arată comportări ale stratului din polimerul 4 apropiate de ale stratului realizat din amestecul de tip 3. Astfel:

- după 5, respectiv 15 minute, de expunere la cavitație, stratul de amestec are o comportarea similară celui realizat din polimer 3, cu deosebirea că gradul de perforare este mai mare;

- după 30 minute de cavitație, tot stratul de polimer este desprins de pe suprafața metalică a probei; mare parte din aria cuprinsă între peliculă și suprafața metalică este plină cu apă și bule vapoare, iar pe o zonă, dinspre periferie, unde pelicula a fost ruptă și expulzată, sunt vizibile cavernele de tip pitting, efect ale eroziunii în metalul de bază al probei.



Fig. 5.21 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 3  
 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

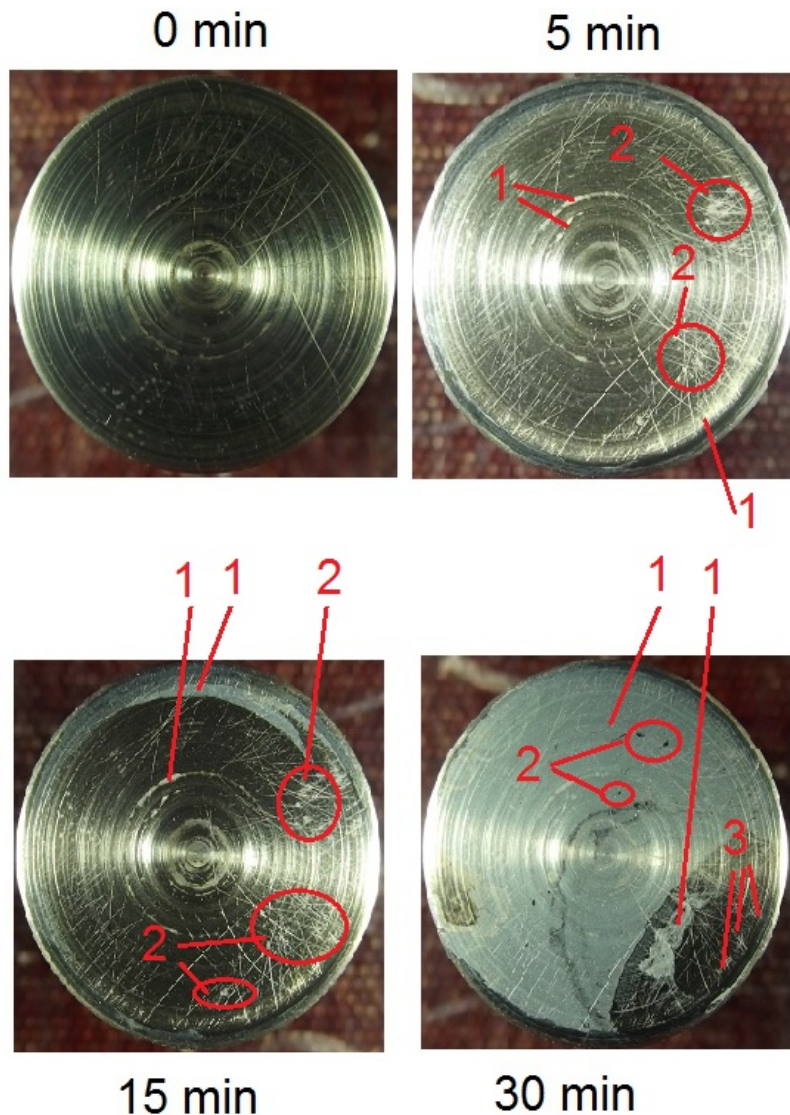


Fig. 5.22 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 4  
 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Ultimele 15 minute de expunere la cavitație, din durata totală de 45 minute, conform fig.5.23, sugerează că pelicula a fost expulzată în primele minute ale acestui interval, expunând suprafața metalică eroziunii propriu-zise. Afirmatia se bazează pe aspectul aproape identic al suprafețelor protejate cu polimer modificat (fig.5.23a și b) cu al suprafeței metalice după 15 minute de eroziune prin cavitație vibratoare, fig.23c.

Imaginea din fig.23 d, arată gradul avansat al degradării suprafeței metalice în 45 minute de expunere atacului cavitației. Practic, straturile de polimer modificat, folosite pentru acoperirea suprafeței metalice, au asigurat reducerea duratei de degradare, până la momentul desprinderii. Această comparație încurajează



continuarea cercetării pe direcția îmbunătățirii tehnologiei de realizare a filmelor subțiri de polimer simultan cu creșterea aderenței pe suprafețe metalice.

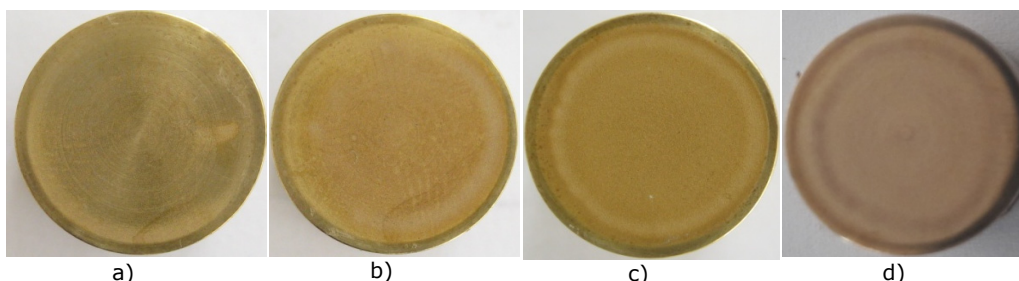


Fig.5.23 Imagini fotografice comparative, ale suprafețelor metalice după 15 și 45 minute de expunere la atacul cavitației

a) suprafața probei 3.1 după 45 minute de expunere la cavitație, după ce stratul de amestec de tip 3 a fost expulzat; b) suprafața probei 4.2 după 45 minute de expunere la cavitație, după ce stratul de amestec de tip 4 a fost expulzat; c) suprafața metalică a probei, neprotejată cu straturi din amestecuri polimerice, după 15 minute de expunere la eroziunea cavitației; d) suprafața metalică a probei, neprotejată cu straturi din amestecuri polimerice, după 45 minute de expunere la eroziunea cavitației

#### 5.1.3.2.3 Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecului de tip 5

Având în vedere expulzarea straturilor de polimer, în intervalul 30-45 minute de expunere la cavitația vibratoare, evaluarea comportării acestora este realizată doar pe baza imaginilor fotografice realizate după fiecare perioadă de testare.

În unele situații, pentru edificare, suprafața expusă cavitației, a fost examinată la microscopul optic.

Imaginile din fig.5.24-5.27 arată un comportament aproximativ identic al celor două probe (5.1 și 5.2), pe care s-au depus straturile protectoare din amestec de tip 5.

Primele 30 minute de comportare la cavitația vibratoare a stratului, depus pe cele două probe, se pot urmări în fig. 5.24 și 5.26. Astfel:

- în primele 5 minute, de solicitare prin cavitație vibratoare, pelicula a manifestat o aderență bună, cu desprinderea peliculei de polimer spre periferie, pe suprafață mică, fără a se rupe. Din acest motiv, între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei, datorită oscilației, a pătruns apă sub forme de bule cavitaționale;
- după 15 minute, de expunere la cavitație, datorită presiunilor foarte mari, induse prin impactul repetat cu microjeturile și undele de șoc, generate la implozia bulelor din norul cavitațional creat prin vibrație [30], [94], în suprafața peliculei apar perforări și zonele, în care aceasta a fost desprinsă în primele 5 minute, își măresc aria, iar cantitatea de apă și bule, pătrunse între stratul de polimer și metalul de bază al suprafeței, crește;
- după 30 minute de cavitație suprafața de desprindere crește substanțial, aderența devenind tot mai slabă, datorită solicitărilor tipice de oboseală. În unele zone apar și rupele de peliculă, care au permis realizarea eroziunii, prin mici caverne, în suprafața metalică.

După 45 minute de expunere la cavitație, fig. 5.25a și 5.27a, se constată că straturile de polimer au fost complet expulzate, iar suprafața metalică, sub impactul repetitiv cu microjeturile cavitaționale, a suferit eroziuni pe arii importante, semnificative spre zona periferică (forma inelară închisă la culoare). Analizele la

microscopul optic arată existența ciupiturilor, de tip pitting, specifice degradării prin acest mod de solicitare [82], [83].

Comparația cu evoluția degradării suprafeței metalice, fără straturi de protecție, fig. 5.25b,c și 5.27b,c, arată efectul benefic al straturilor de polimer, care face ca, după 45 minute de solicitare, prin cavitație suprafața acoperită să aibă distrugerii mai mici (fig.5.25a și 5.27a) decât cele obținute după 15 minute de solicitare ale suprafeței metalice (fig.5.25b și 5.27b), și mult mai reduse față de cele înregistrate după 45 minute (fig.5.25c și 5.27c).

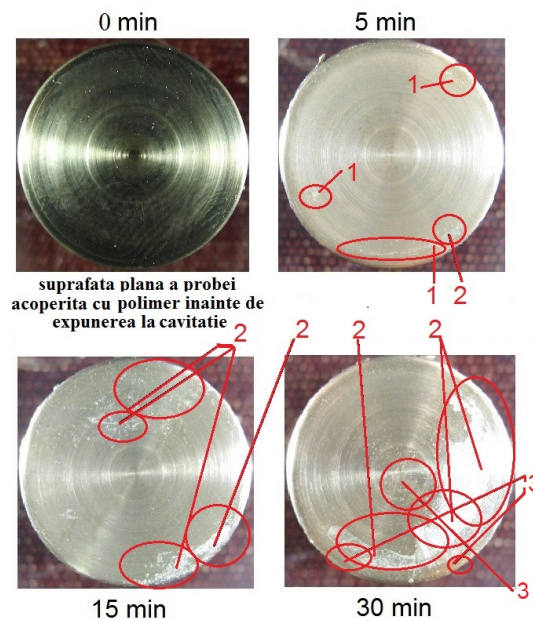


Fig. 5.24 Evoluția comportării la cavitația vibratoare a stratului de amestec de tip 5 de pe proba 5.1

1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

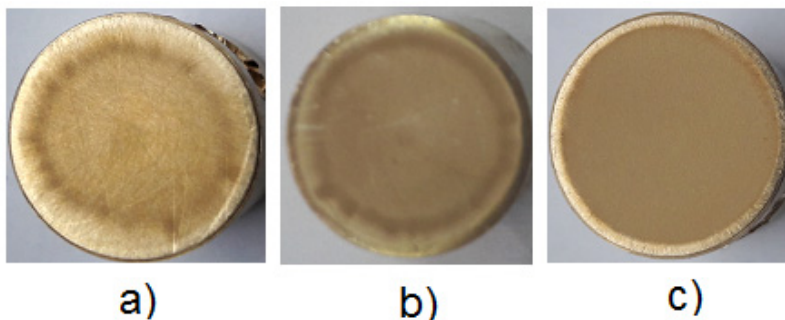


Fig. 5.25 Imagini ale suprafeței probei atacate de cavitație  
a) după îndepărtarea peliculei de polimer de tip 5, de pe suprafața plană a probei 5.1 și 45 minute de expunere la cavitație; b) după 15 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz; c), după 45 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz



Fig. 5.26 Evoluția comportării la cavitația vibratoare a stratului de amestec de tip 5 depus pe proba 5.2

1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație;  
2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

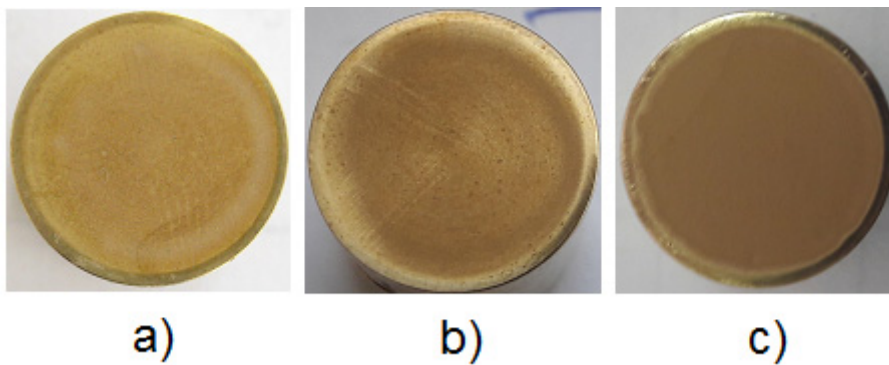


Fig.5.27 Imagini ale suprafeței probei atacate de cavitație  
a) după îndepărtarea peliculei de polimer de tip 5, depusă pe suprafața plană a probei 5.2 și 45 minute de expunere la cavitație; b) după 15 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz; c) după 45 minute de expunere la cavitație a suprafeței din bronz

Comparativ cu unele straturi de materiale compozite depuse HVOF pe suprafețe de oțel carbon 270-480 W Sr ISO 13755:1995 (pulbere formată din 47.08 %Cu, 28.83 % Zn, 16.2 % Ni, 6.64 % Cr, 0.32 % Ti, 0.27 % Pt, 0.27 % Co, 0.22 % Fe, 0.17 % Mo [10]) și oțel inoxidabil duplex X2CrNiMoN22-5-3 (pulbere ceramică Thermico WC-9Co-5Cr-1Ni [23]), fig. 5.28, cu importante eroziuni încă din primele 5 minute ale cavitației, putem afirma că straturile de rășină (polimer modificat) au o rezistență superioară. După cum se constată distrugerea este diferită: straturile de compozite sunt degradate după mecanismul generării cavernelor, în timp ce la straturile de polimer perforarea este întârziată, datorită elasticității, însă, în timp, aderența este slăbită și stratul se exfoliază. Aceste diferențe reprezintă premisele de continuare a cercetării în vederea îmbunătățirii aderenței la suprafața metalică.

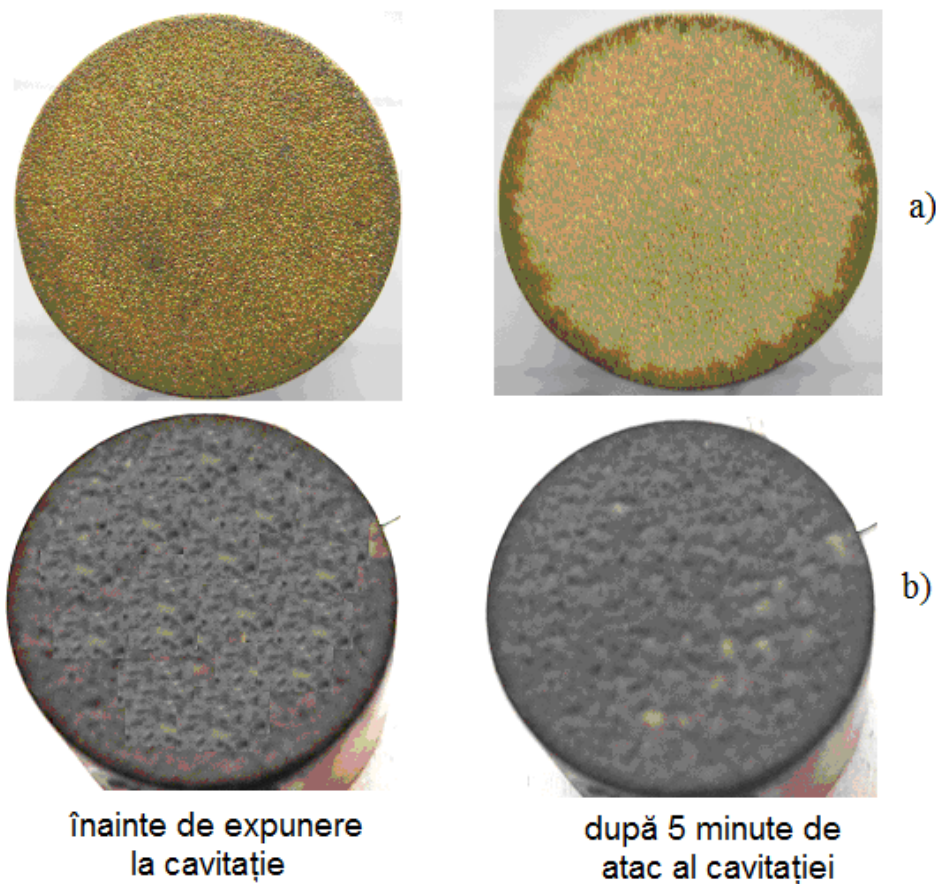


Fig. 5.28 Compararea comportării la cavitație vibratoare între straturile de polimer modificat și straturile de material compozit depuse HVOF pe suprafețe metalice  
 a) Compozit pe baza de cupru [10] ;  
 b) Pulbere ceramică Thermico WC-9Co-5Cr-1Ni [23]

#### 5.1.4 Concluzii

*Cu privire la comportarea straturilor din amestecuri de tip 1 și 2 se desprind următoarele concluzii:*

1. Desprinderea straturilor polimerice, sub forma de bucăți de folii, arată că acestea au elasticitate și rezistență la rupere, însă trebuie îmbunătățită tehnologia prin care sa se confere o aderență crescută la suprafața metalică, în cazul de față aliaj de cupru (bronz CuSn12-C), pentru a nu se desprinde și perfora la șocurile generate de impactul cu microjeturile cavitației.

2. Aderenta amestecurilor de tip 1 la suprafețele din aliaje de cupru, în particular bronzuri, trebuie îmbunătățită, deoarece prin propagarea undelor plane și a impactului repetitiv cu microjeturile cavitaționale pelicula se desprinde și se fisurează permițând pătrunderea apei între peliculă și suprafața metalică a probelor care, în timp, prin oscilații repetate, duce la ruperea peliculei și expulzarea de pe suprafață, lăsând metalul descoperit și expus la eroziune.

3. Faptul că amestecurile de tip 1 se comportă mai bine decât cele de tip 2, vizibil până la minutul 15, arată că tehnologia utilizată la realizarea amestecului și fixarea pe suprafața metalică, poate fi îmbunătățită.

4. Concluziile desprinse din analiza rezultatelor cercetării, sugerează continuarea investigațiilor în vederea găsirii soluției prin care amestecurile polimerice să aibă rezistență sporită la eroziunea prin cavitație, astfel încât să se poată utiliza la acoperirea suprafețelor paletelor de mașini hidraulice, a elicelor vapoarelor și ale altor piese intens solicitate la cavitație, a căror reparație costă timp și bani.

*Cu privire la comportarea straturilor din amestecurile de tip 3 și 4 se desprind următoarele concluzii*

1. Rezultatele din lucrare arată că straturile de amestecuri de tip 3 și 4 au o aderență scăzută la suprafața metalică din bronz și nu rezistă la impacturile repetate cu microjeturile și undele de șoc, generate prin cavitația vibratoare. Din acest motiv, după o anumită durată de solicitare, straturile se desprind sub formă de folii.

2. Pentru utilizarea amestecurilor polimerice de tip 3 și 4, la protejarea și repararea suprafețelor solicitate la eroziune prin cavitație, se impune dezvoltarea de noi proceduri prin care să se asigure o bună aderență la suprafața metalică.

3. Aparițiile unor perforări ale peliculelor, în timpul cavitației, arată că tehnologia utilizată la prepararea amestecurilor prezintă și alte deficiente de structură ce trebuiesc rezolvate.

*Cu privire la comportarea straturilor din rășina polimerică tip 5 desprind următoarele concluzii*

1. Comportarea la cavitație a straturilor de polimer modificat 5 este dependentă de aderența la suprafața metalică protejată.

2. Modul în care pelicula de polimer s-a comportat la cavitația vibratoare, prin desprindere de suprafața metalică, fără a se rupe, arată că tehnologia utilizată îi conferă caracteristici de rezistență mecanică și elasticitate capabile să mărească durata de exploatare a suprafeței din bronz, în condiții de cavitație dezvoltată.

3. Comparația cu straturile din materiale compozite depuse HVOF, fig.5.28 și cu modul de degradare a suprafeței metalice neprotejate, fig.5.24 și 5.26, sugerează continuarea cercetărilor în vederea creerii de noi polimeri modificați, care să conducă la creșterea duratei de solicitare la cavitație, astfel încât să poată fi utilizați, cu succes, la acoperirea suprafețelor ce lucrează în curenți de înaltă intensitate cavitațională.

**Observație**

Din rezultatele prezentate în acest capitol au fost publicate 3 lucrări în Revista de Materiale plastice, Clasificată ISI, **FI= 1.399, Q= 4**

**5. 2 Straturi cu bază de cupru depuse prin pulverizare termica HVOF****5.2.1 Introducere**

Procesul de pulverizare termică cunoaște, în ultima perioadă, o aplicabilitate crescută în industria aero-spațială, industria de autovehicule și industria navală, datorită numeroaselor avantaje pe care le prezintă [71], [79], față de alte procedee aplicate în scopuri similare (scufundare în metal topit, difuzie, placare, acoperiri galvanice) întrucât [23]:

- încălzirea substratului este moderată, astfel că probabilitatea de apariție a tensiunilor interne sau a fisurilor este scăzută;
- poate fi executat în afara unui atelier specializat și pe suprafețe oricât de mari;
- pot fi realizate acoperiri pe orice suport metalic.

Dezavantajul care creează rețineri în utilizarea microstraturilor pulverizate termic, îl reprezintă neomogenitatea și porozitatea acestora.

Pentru piesele aflate în curenți cavitaționali, cum sunt butucii rotoarelor de mașini hidraulice, respectiv pana cârmei și zona din corpul navelor maritime și fluviale limitrofe elicelor, compoziția chimică a pulberii este un element de bază care dictează legătura strat-substrat, cu influență asupra aderenței la materialul de bază și asupra rezistenței suprafeței acestor organe de mașini la șocurile create de vârtejurile cavitaționale [36], [98]. Deoarece experimentul de față este derulat pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, solicitarea vârtejurilor cavitaționale este caracterizată și mult amplificată de cea a microjeturilor rezultate din implozia norului de bule cavitaționale, aderent pe stratul de pe suprafața probei vibratoare. De aceea, rezultatele obținute sunt acoperitoare față de situația reală din exploatare. Totodată, rezultatele, prezentate în lucrare, arată și diferențele de comportare la solicitările cavitaționale ale straturilor obținute prin pulverizarea termică cu flacără de mare viteză, HVOF, a patru tipuri de pulberi, diferențiate prin compoziția chimică.

**Precizare:** Rezultatele din acest subcapitol sunt valorificate prin publicarea lor în revista de chimie (revistă ISI), din anul 2017, vol.68, no. 12.

**5.2.2 Tipuri de materiale utilizate**

Pentru cercetarea experimentală au fost utilizate 4 tipuri de pulberi cu bază de cupru, ale căror compoziții chimice și densități sunt prezentate în tabelul 5.1. Dimensiunile granulelor de pulberi, conform certificatului de calitate emis de furnizor, sunt cuprinse între 20 și 35 μm.

Acestea au fost depuse pe suprafețele circulare ale specimenelor de cavitație.

Tabelul 5.1. Compoziția chimică a pulberilor utilizate

Specimen	Elemente componente [% masă]										ρ [g/cm <sup>3</sup> ]
	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Pt	Sn	Ti	Zn	
1	-	-	95.96	-	0.02	-	-	4.02	-	-	8.85
2	-	-	96	-	-	-	-	4.0	-	-	8.85
3	0.34	7.6	44.7	0.25	0.17	18.63	0.24	-	0.37	27.7	8.30
4	0.27	6.64	47.08	0.22	0.17	16.2	0.27	-	0.32	28.83	8.31

Din acest tabel se poate observa că primele două tipuri de materiale pulverulente aparțin bronzurilor Cu-Sn, iar ultimele două, alamelor Cu-Zn. Deși există diferențe de concentrații ale elementelor chimice componente, prin molibden, primele două (1 și 2) au densități identice și respectiv prin Cu, Cr, Fe, Ni, Pt Ti și Zn, ultimele două (3 și 4), au densități cu diferență nesemnificativă.

### 5.2.3 Metoda de realizare a straturilor

Este cunoscut faptul că un microstrat depus prin pulverizare termică este caracterizat de [23], [71], [79]: aderență, structură și densitate sau porozitate.

Pentru realizarea acestor condiții, în special cea de aderență, densitate și porozitate, suprafețele epruvetelor din oțel carbon 270-480 W Sr ISO 13755:1995 au fost strunjite și apoi sablate cu particule de electrocorindon, antrenate de aer comprimat, astfel încât rugozitatea obținută, recomandată de normele specifice [10], a fost  $Ra = 18 \mu\text{m}$ , fig.5.29. De asemenea, în strictă conformitate cu normele specifice de pulverizare [79], în vederea creșterii aderenței și realizării compactității stratului depus, suprafețele au fost curățite și degresate, primul strat a fost pulverizat de la o distanță de 80 mm, iar următoarele de la o distanță de 210 mm.

Injectarea și accelerarea pulberilor în flacără către substrat, s-a realizat cu viteze supersonice, ceea ce a condus la straturi dense cu o porozitate măsurată mai mică de 2 %, foarte puțin oxidată și cu aspect fin, fig.5. 30.

Programul experimental de pulverizare termică HVOF, descris în [10], [23], [79], s-a realizat în laboratoarele Universității Tehnice Gheorghe Asachi din Iași pe o instalație de pulverizare METCO SULZER robotizată, a cărei imagine și schemă de principiu, este arătată în fig.5.31.

Principalii parametri ai procesului de pulverizare termică, după parcurgerea unor etape de optimizare, au fost:

- temperatura la suprafața piesei  $\cong 150^\circ\text{C}$ ;
- debit pulbere, 63 g./min.;
- grosimea stratului depus, de circa 0,8 mm.
- gaz plasmagen, Ar+6%H<sub>2</sub> – presiune 9 bari;
- gaz transport, Ar, presiune 4 bari ;
- aer comprimat, presiune 2 bari;

Suprafata pe care  
compozitul s-a  
pulverizat termic



Fig. 5.29 Imaginea probei în plan vertical și indicarea suprafeței de acoperire

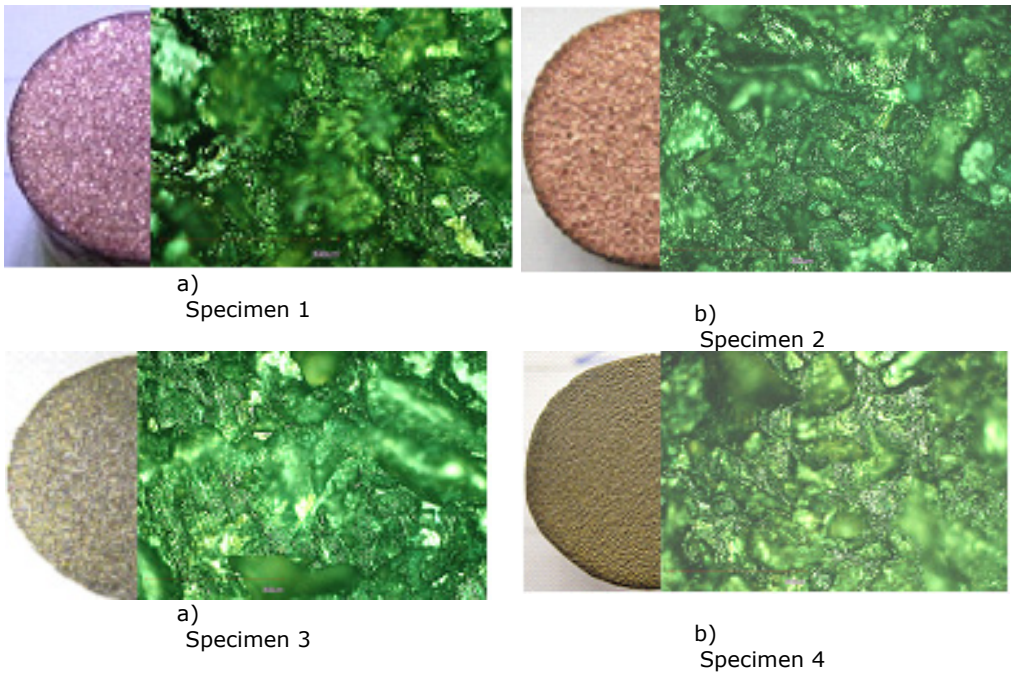


Fig. 5.30 Aspecte ale suprafețelor probelor cu stratul depus prin pulverizare termică  
a) imagini macro; b) imagini microscopice (350x)



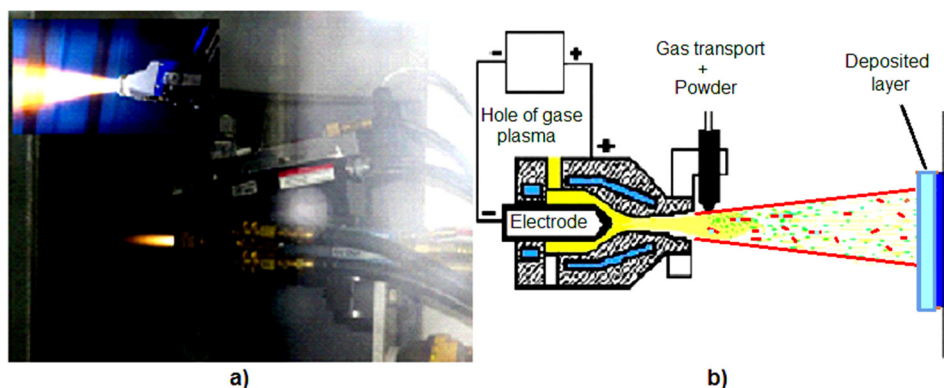


Fig. 5.31 Instalația robotizată de pulverizare termică, METCO SULZER (a) și schema de principiu a unei instalații de pulverizare cu plasmă (Principiul metodei HVOF de pulverizare termică) [23]) (b)

#### 5.2.4 Cercetarea experimentală. Rezultate și discuții

Cercetarea comportării straturilor depuse prin pulverizare termică, la șocurile create prin mecanismul hidrodinamic al cavitației, a fost derulată pe aparatul vibrator standard, în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [24]. Studiarea pe acest aparat este justificată de faptul că solicitările generate de desprinderea curentului cavitațional creat de elice sau rotorul de mașină hidraulică, fig.5.32, au corespondența în hidrodinamica cavitațională din aparatul vibrator, fig.5.33. Astfel, apariția microjeturilor dezvoltate la implozia bulelor cavitaționale, în curentul hidrodinamic din elicea navală, respectiv din rotorul mașinii hidraulice și impactul acestora cu suprafețele solide aflate pe direcția lor de curgere, au la bază aceleași mecanisme (hidrodinamice și mecanice, [1], [13], [39], [40], [55], [56]), diferențiate, dar cu efecte similare din punct de vedere al distrugerii eroziunii.

Deși există o procedură specifică laboratorului, [9], [55], [56], cu privire la durata solicitărilor periodice ale cavitației vibratoare, conformă cu prevederile ASTM G32-2010, datorită scopului lucrării, aceasta nu a fost respectată întocmai, deoarece s-a dorit evidențierea efectului compoziției chimice a stratului depus, respectiv a modului de degradare, dictat de forma poroasă și a gradului de aderență la materialul de bază. De asemenea, inspectarea microscopică, cu realizarea de imagini fotografice, la diverși timpi de expunere la cavitație, precum și cele macroscopice, își găsesc rațiunea în evidențierea diferențelor de evoluție a degradării, simultan cu durata de rezistență până la apariția pittingurilor în materialul de bază al probelor cavitaționale.

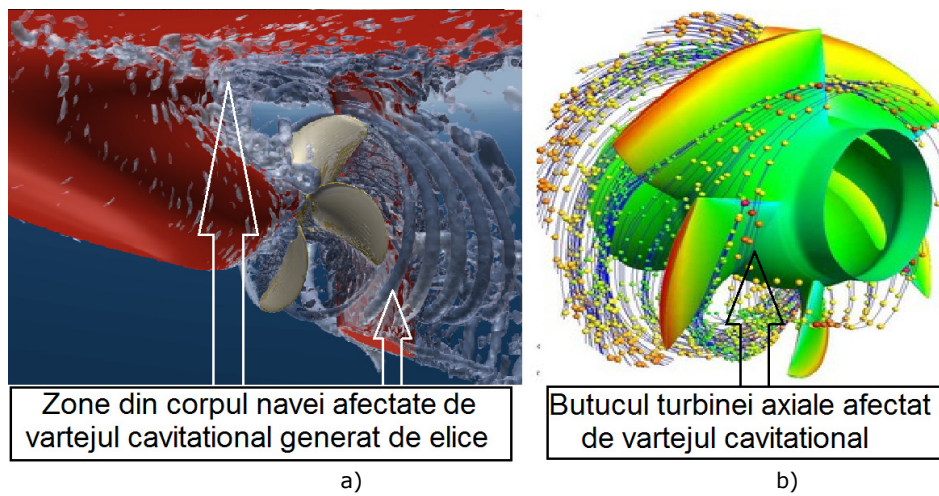


Fig. 5.32 Imagini ale curentului cavitațional  
a)- în elicea navală [132]; b)- în rotorul de turbină hidraulică radial axială [133]

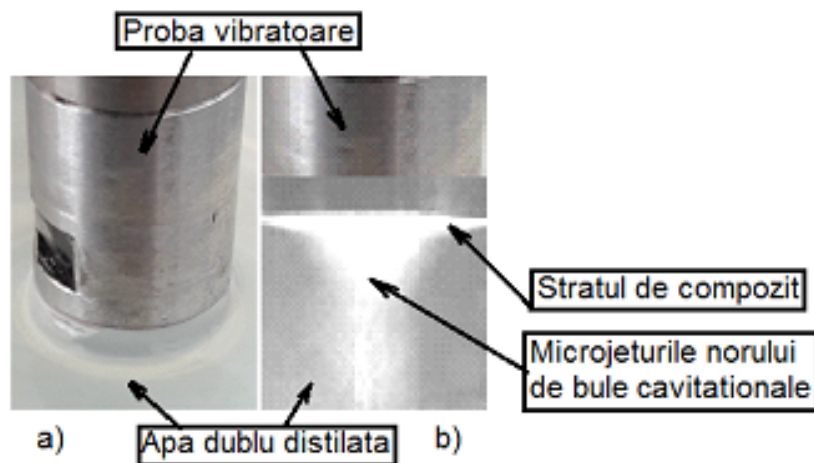

















Fig. 5.33 Proba vibratoare (înregistrări realizate în Laboratorul de Cavitație al UPT [59])  
a) imersată în apa fără vibrație; b) în timpul vibrației

În tabelul 5.2 sunt prezentate imagini cu modul de degradare a suprafeței acoperite la diverse durate de cavitație. Conform acestora, s-a considerat că stratul depus prin pulverizare termică, își are rezistența dată de aderența la materialul de bază al probei, până în momentul în care sunt observate pittinguri în materialul de bază al suprafeței, pittinguri care, funcție de durata testului, au putut fi observate la microscopul electronic Celstrone Mikroskoplar-Micro Fi (specimenele 3 și 4) și chiar cu ochiul liber (specimenele 1 și 2).

Tabelul 5.2 Imagini macro ale degradării stratului depus

Specimen	Durata cavităției vibratoare [min]				
	1	5	30	60	90
1					
2					
3					
4					

În fig.5.34 este dată evoluția pierderilor volumice, care, datorită grosimilor aproximativ identice ( $\cong 0.8$  mm), sunt o indicație procentuală a expulzării stratului din suprafața expusă cavităției, al cărei diametru este de 15.8 mm. Ca o imagine a rezistenței conferite de aceste straturi, în figură este redată și pierderea volumică a oțelului de bază 270-480 W.

Liniile întrerupte sunt folosite ca indicatoare, că de la acea perioadă de solicitare cavitațională degradarea se manifestă puternic și în materialul de bază și, începând de la aceste durate (30 min pentru proba 1 și 3, 60 minute pentru proba 2 și 75 minute pentru proba 4), comportarea straturilor la solicitările cavitaționale nu mai poate fi evaluată, ea fiind mult dependentă de rezistența oțelului.

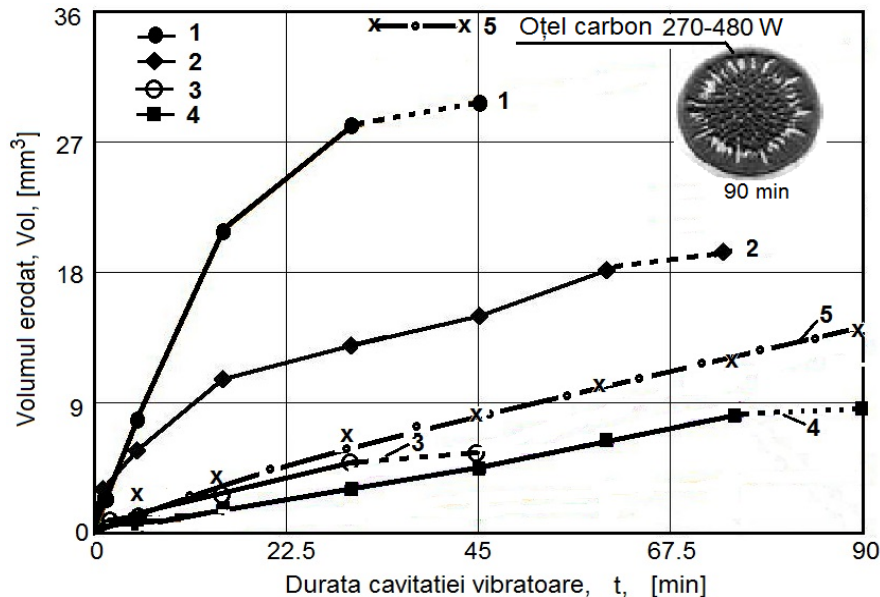


Fig. 5.34 Evoluția pierderilor volumice și a degradării prin cavitația vibratoare a straturilor depuse prin pulverizare termică

Analiza realizată simultan, pe baza imaginilor din tabelul 5.2 cu evoluțiile curbelor  $Vol(t)$ , fig.5.34, a dus la următoarele constatări:

- după 1 minut de expunere la cavitația vibratoare niciunul dintre straturi nu arată că materialul a fost expulzat, astfel încât să se ajungă la materialul de bază al suprafeței probei. Pentru această durată scurtă de atac, comportarea este practic legată de valoarea densității. Probele 3 și 4 (cu  $\rho = 8,3$ , respectiv  $8,31 \text{ g/cm}^3$ ) se comportă identic, la fel și probele 1 și 2 (cu  $\rho = 8,85 \text{ g/cm}^3$ );
- după cel puțin 5 min. de solicitare cavitațională, comportarea straturilor începe să se diferențieze. Practic din acest moment comportarea este dictată de compoziția chimică, care a influențat gradul de aderență, deoarece, examinările microscopice (vezi fig.5.30), efectuate înainte începerii testului, au arătat că între porozități nu sunt diferențe semnificative;
- comportarea mai bună a straturilor depuse pe probele notate cu 4 este dată de prezența molibdenului (în procent de 0.17 %), care crește aderența la materialul de bază prin creșterea capacității de difuzie [23] și a platinei (în procent de 27 %) care reduce gradul de oxidare al particulelor din jetul de plasmă și implicit pericolul de scădere a rezistenței stratului depus prin pulverizare termică la solicitarea cavitațională a microjeturilor;
- comparativ cu oțelul de bază 270-480 W, doar straturile probelor 3 și 4 conferă o rezistență mai mare la solicitările cavitaționale, și aceea pe durate reduse, datorită porozității și grosimii mici (circa 0.8 mm). Faptul că aceste straturi au o rezistență mai mare decât a oțelului de bază al probelor, arată că prin depunerea lor, folosind metoda HVOF, s-a conferit o aderență bună și o duritate care au condus la această comportare;
- slaba rezistență a straturilor depuse pe probele 1 și 2, în raport cu oțelul 270-480 W.

### **5.2.5 Concluzii**

Rezistența la solicitarea microjeturilor produse prin implozia norului cavitațional, atașat la stratul depus prin pulverizare termică, creat prin vibrațiile plane generate de aparatul vibrator este puternic dependentă de natura materialului utilizat (compoziția chimică și densitate).

La parametri constanți și similari ai regimului de pulverizare termică, straturile rezultate au avut grosimi aproximativ egale, iar degradarea suprafețelor este complet diferită, aceasta fiind dependentă de compoziția chimică a pulberii utilizate și de aderența la stratul de bază.

Prezența elementelor chimice, precum molibdenul și platina, favorizează îmbunătățirea rezistenței la solicitările cavitaționale prin creșterea aderenței stratului la substrat și reducerea oxizilor din plasmă, care diminuează rezistența la șocul rezultat din impactul cu microjeturile cavitaționale.

Compararea rezistenței celor 4 straturi, cu a oțelului 270-480 W Sr ISO 13755:1995, este dovada că, prin utilizarea unor parametri adecvați ai procesului de realizare, se pot obține straturi care, depuse pe suprafețe solicitate la cavitație, cu realizarea unei aderențe ridicate, pot aduce sporuri importante de rezistență la solicitările cavitaționale, cu efect pozitiv asupra duratei de viață a suprafețelor.

## **CAP. 6**

# **CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. PERSPECTIVE NOI DE CERCETARE**

### **6.1 Concluzii generale**

Documentarea bibliografică, cercetările experimentale și analizele realizate în cadrul programului doctoral, prezentate în teză, conduc la următoarele concluzii, cu **caracter general**, specifice testelor de cavitație realizate pe aparatele vibratoare:

- cercetarea eroziunii prin cavitație rămâne o problemă de actualitate și amplificată în ultimii ani, ca urmare a problemelor create în exploatarea echipamentelor ce lucrează în condiții de cavitație, prin afectarea performanțelor și reducerea duratei de exploatarea continuă;
- nu s-a reușit elucidarea mecanismelor ce generează eroziunea prin cavitație datorită multitudinii factorilor ce definesc hidrodinamica curgerii și pentru că nici nu au fost elaborate materiale și tehnologii de tratament care să creeze suprafețe și structuri perfect rezistente la impactul cu microjeturile rezultate din implozia bulelor cavitaționale;
- investigarea eroziunii prin cavitație în laborator este cea mai indicată, ca urmare a duratei scurte de testare și asemănării mecanismul mecanic de degradare (specific propagării fisurilor de oboseală, la scară microscopică, în toată suprafața) cu cel din mașina industrială, chiar dacă parametrii ce definesc hidrodinamica cavitației sunt total diferiți;
- pentru reproducerea rezultatelor este foarte important să se asigure un control riguros al parametrilor funcționali (temperatura mediului lichid, puterea generatorului electronic, amplitudinea și frecvența vibrațiilor, adâncimea de imersare a probei), pe cât posibil prin sistem electronic automatizat, așa cum este în cazul aparatului din Laboratorul de cavitație din Universitatea Politehnica Timișoara;
- pentru asigurarea unui grad ridicat de încredere, în prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale este necesar să se utilizeze benzile de dispersie, intervalele de toleranță și abaterea standard;
- pentru evaluarea comportării materialelor la eroziunea cavitației este indicat să se folosească curbele specifice, parametrii caracteristici și microfotografiile suprafețelor degradate, realizate la durate intermediare și de final ale atacului cavitației;
- forma curbelor dă informații importante despre comportarea medie a materialului, iar dispersia valorilor experimentale dă indicații despre răspunsul microstructurii la solicitările microjeturilor cavitaționale;
- cele mai bune informații, despre comportarea și rezistența la eroziunea cavitației, respectiv despre mecanismul degradării, se obțin pe baza valorilor parametrilor ( $MDE_{max}$ ,  $R_z$ ,  $R_{cav}$ ,  $MDER$ ) cu folosirea simultană a imaginilor fotografice și de la microscop (macro, micro și SEM);
- cercetările realizate în cadrul acestei teze confirmă că erodarea se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere izolate și dispersate pe toată suprafața;
- se reconfirmă că rezistența și comportarea metalelor, în timpul atacului cavitației, sunt dependente de constituția structurală, proprietățile mecanice și compoziția chimică;
- pentru probele tratate termic, indiferent de tipul aliajului (alamă sau bronz), se remarcă diferențieri de comportare și rezistență după primele 30 minute de atac al

cavitație, determinate de microstructură și duritate, efecte ale parametrilor tehnologici ai regimurilor tratamentului termic volumic;

- există situații în care tratamente termice cu valori diferite ale parametrilor tehnologici ai regimului de tratament termic conferă comportări și rezistențe apropiate; cazul tratamentelor de călire la 800 °C și călire la 800 °C +revenire la 250 °C, la alama CuZn39Pb3, respectiv cazul tratamentelor de călire la 700 °C și călire la 700 °C +revenire la 250 °C, la bronzul CuSn12-C;
- printr-o bună corelare a valorilor parametrilor regimului de tratament termic volumic (temperatură și durată menținere) se pot realiza sporuri însemnate de rezistență la eroziunea cavitației. Exemplul este al alamei CuZn39Pb3, tratată termic (călire de la 800 °C și călire de la 800 °C +revenire la 250 °C), care a dobândit rezistență superioară bronzului CuSn12-C, tratat termic (indiferent de tratamentul aplicat), deși, în stări de livrare bronzul a avut o rezistență ușor superioară alamei;
- alama CuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C, în stări de livrare, se pot utiliza doar la piese slab solicitate la cavitație de tip fittinguri, teuri, coturi și corpuri de robinete și vane sau la corpurile altor aparate de distribuție și reglare a curgerii;
- prin călire de la 800 °C, respectiv călire de la 800 °C +revenire la 250 °C, alama CuZn39Pb3 dobândește rezistența necesară pentru a fi utilizată la piese ce lucrează în condiții de cavitație industrială (intensitate medie), cazul elicelor vapoarelor și rotoarelor de mașini hidraulice;
- prin călire de la 700 °C și călire de la 700 °C +revenire la 250 °C bronzul CuSn12-C, dobândește rezistența necesară pentru a fi utilizat la piese ce lucrează în condiții de cavitație moderată, elicele vapoarelor de apă dulce, folosite pentru transporturi cu bacul, sertare supape presiune și distribuitoare, rotoare de pompe volumice;
- investigațiile realizate la nivel macro- și microstructural permit realizarea unor corelații între constituția fizică a materialelor investigate și comportarea cavitațională în condiții de laborator;
- amestecurile polimerice și pulberile compozite constituie soluții de protejare a suprafețelor pieselor cu geometrii simple, ce lucrează în curenți cavitaționali de slabă intensitate;
- pentru realizarea unei teze cu un conținut științific corespunzător cerințelor impuse tezelor de doctorat este obligatoriu parcurgerea literaturii din domeniul de studiu și utilizarea ei în fundamentarea temei de doctorat, precum și în analizele și evaluarea rezultatelor obținute.

## 6.2 Contribuții personale și originale

Apreciez că cele mai semnificative contribuții, cu elemente de noutate și originalitate, aduse prin această teză, dincolo de cele arătate în cadrul fiecărui capitol, sunt:

- ampla documentare, care a permis cunoașterea modului de manifestare a mecanismului mecanic al eroziunii prin cavitație și crearea bagajului de cunoștințe necesar explicării, prin comparație cu rezultatele din literatură, a comportării și rezistenței la eroziunea cavitației a celor două aliaje cu bază de cupru, în stări de livrare și tratate termic;
- justificarea continuării utilizării tratamentelor termice volumice ca soluții de creștere a rezistenței la cavitație, prin modificările structurale și de proprietăți create;
- evidențierea dependenței rezistenței și comportării alamei și bronzului, de parametrii tehnologici ai regimului de tratament termic, de microstructură, de compoziția chimică și de proprietățile mecanice, în special de microduritate;
- investigarea comportării și rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3 pentru 5 stări: una livrată și patru date de tratamente termice volumice, care au condus la sporuri, față de starea de livrare, între 2.5 și 5 ori (călită de la 800 °C, călită de la 800

- $^{\circ}\text{C}$  + revenită la  $250^{\circ}\text{C}$ , călită de la  $800^{\circ}\text{C}$  + revenită la  $400^{\circ}\text{C}$ , călită de la  $800^{\circ}\text{C}$  + revenită la  $600^{\circ}\text{C}$ );
- analiza comportării și rezistenței conferite de fiecare dintre cele 5 stări ale alamei CuZn39Pb3 pe baza curbilor și parametrilor caracteristici eroziunii prin cavitația vibratoare, precum și analiza morfologică a microstructurii pe baza imaginilor obținute cu aparatul fotografic și la microscopul optic și electronic;
  - investigarea comportării și rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C pentru 4 stări: una de livrare și trei date de tratamente termice volumice, care au condus la sporuri, față de starea de livrare, de peste 42 % și până la 164 % (călit de la  $700^{\circ}\text{C}$ , călit de la  $700^{\circ}\text{C}$  + revenit la  $250^{\circ}\text{C}$ , călit de la  $700^{\circ}\text{C}$  + revenit la  $500^{\circ}\text{C}$ );
  - analiza comportării și rezistenței conferite de fiecare dintre cele 4 stări ale bronzului CuSn12-C pe baza curbilor și parametrilor caracteristici eroziunii prin cavitația vibratoare, precum și analiza morfologică a microstructurii pe baza imaginilor obținute cu aparatul fotografic și la microscopul optic și electronic;
  - pe baza valorilor parametrilor  $MDE_{\max}$ ,  $R_{z\text{med}}$  și  $R_{\text{cav}}$ , prin comparație cu materialele etalon (alama navală, bronzul naval CuNiAl I-RNR și oțelul inoxidabil OH12NDL) am evidențiat modul în care tratamentele termice volumice conduc la îmbunătățirea comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație ale celor două aliaje pe bază de cupru (alama CuZn39Pb3 și bronzul CuSn12-C);
  - evidențierea și justificarea diferenței dintre comportamentele date de regimurile de tratament termic, pe baza valorilor  $R_z$ ,  $MDE_{\max}$  și  $R_{\text{cav}}$ , pe formele de evoluție a curbilor  $MDE(t)$ ,  $MDER(t)$  și prin dispersia valorilor experimentale față de curbele de mediere/aproximare;
  - realizarea a 5 tipuri de amestecuri polimerice și 4 straturi de pulberi cu bază de cupru, depuse pe suprafețele probelor testate la cavitația vibratoare. Concluziile arată că peliculele de polimeri și straturile de pulberi depuse HVOF nu rezistă la atacurile cavitației. Motivele sunt legate de slaba aderență la suprafața metalică și a porozității (doar cazul straturilor de pulberi pe bază de cupru).

### 6.3 Perspective noi de cercetare

- Pe baza studiilor bibliografice și a rezultatelor cercetărilor obținute în cadrul tezei consider că pentru cercetările viitoare este necesară abordarea următoarelor direcții:
- cercetarea altor variante de aliaje ale cuprului, cu compoziții și proprietăți fizico-mecanice diferite, care pot avea un preț de cost mai mic și care, prin diverse tehnici și procedee de tratament sau acoperire, pot dobândi caracteristici superioare de comportare și rezistență la eroziunea prin cavitație;
  - studierea variației microdurității suprafeței atacate cu durata cavitației generată prin vibrație;
  - utilizarea programelor profesionale și a metodelor numerice în evaluarea distrugerilor produse prin cavitație;
  - oportunități de îmbunătățire a rezistenței la cavitație a aliajelor de cupru prin procedee de sudare și acoperiri cu diverse pulberi;
  - cercetarea altor tipuri de bronzuri și alame folosite la elicele vapoarelor de apă dulce;
  - utilizarea tehnologiei cu laser pentru durificarea a stratului suprafeței expuse cavitației;
  - continuarea studiului altor tipuri de amestecuri polimerice și altor tehnologii care să asigure creșterea gradului de aderență la suprafața expusă cavitației.



## BIBLIOGRAFIE

1. Anton I.: "Cavitatia", Vol I, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1984.
2. Anton I.: "Cavitatia", Vol II, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1985.
3. Anton I.: "Turbine hidraulice", Ed. Facla Timisoara, 1979.
4. Baran G.: "Contributii la studiul cavitatiei si eroziunii cavitationale", Facultatea Energetica, Teza de doctorat, I.P.B.,1978.
5. Baran, G., Ciocănea, A, "Curgeri cavitationale si abrazive", Ed. Printech, ISBN 973-718-267-7, 175 pag., 2005.
6. Bej, A., Bordeasu, I., Milos, T., Badarau, R.: "Considerations Concerning the Mechanical Strength of Wind Turbine Blades made of Fiberglass Reinforced Polyester", *Mat. Plast.*, Vol. 49 Nr. 3 pp: 212-218, 2012.
7. Bodor, M., Graur, I., Bria, V., Cantargiu, A., Circiumaru, A.: "Obtaining and analysis of different powders to be used as modiffyng agents in formation of polymers with special properties", *Mat. Plast.* 53 (3), pp. 495-500, 2016.
8. Bordeasu, I., Bădărău, R., Oancă O.: "Considerații privind criteriile de evaluare a rezistenței materialelor la eroziunea prin cavitație", A XII-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, *Știința și inginerie*, Vol.22/2012, Sebeș, 3-5 iunie 2012, ISSN 2067-7138, pp.127-134, 2012.
9. Bordeasu, I.: "Eroziunea cavitațională a materialelor", Editura Politehnica, Timișoara, 2006.
10. Bordeasu, I., Mitelea, I., **Lazăr, I.**, Micu, L. M., Karancsi, O.: "Cavitation Erosion Behaviour of Cooper Base Layers Deposited by HVOF Thermal Spraying", *Rev. Chim. (Bucharest)*, 68, no. 12, p. 2914-2918, 2017.
11. Bordeasu, I., Circiumaru, A., Popoviciu, M. O., **Lazăr, I.**, Bădărău, R., Groza, I.: "Cavitation Erosion Behavior on Thin Films of Polymer Blends Deposited Over Bronze Surfaces", *Rev.Mat.Plast*, vol. 55, nr.3, pp. 286-290, 2018.
12. Bordeasu, I., Mitelea, I., Sălcianu, L., Crăciunescu. C. M.: "Cavitation Erosion Mechanisms of Solution Treated X5CrNi18-10 Stainless Steels", *Journal of Tribology-Transactions of the ASME*, 138(3), Article Number: 031102, DOI: 10.1115/1.4032489, 2016.
13. Bordeasu, I.: "Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară", Timișoara, Teză de doctorat, 1997.
14. Bordeasu, I., Oancă, O.: "Considerations Regarding the Cavitation Damage Process on Bronze and Brass Used in the Marine Screw Manufacture", *Machine Design*, Vol.3, No.4, ISSN 1821-1259 pp. 277-280, 2011.
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 Phisico-mechanical Properties of the Material”, *Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, 7-10 April, France, p. 199-202, 1998.

17. Bordeaşu, I., Oancă, O.: „Cercetarea eroziunii prin cavitație în laboratorul de mașini hidraulice din Timișoara”, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știința și inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.581-588, 2011.
18. Bordeaşu, I., Popoviciu, M.: “Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening”, Machine Design, vol. 4, Nr. 3, 2012, pp.171-176, 2012.
19. Bordeaşu, I., Popoviciu, M. O., Balasoiu, 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, 2010.
20. Bordeaşu I.: “Eroziunea cavitațională a materialelor folosite în realizarea elicelor navale”, analele Universitatii din Oradea, fascicula Mecanica, Oradea, pp.54-59, 1992.
21. Bordeaşu I., Popoviciu M., Karabenciov A., Jurchela A.D., Chirita 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.
22. Bordeaşu I., Popoviciu M.O., Patrascoiu C., Bălăsoiu V.: „An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves”, Scientific Buletin Politehnica University of Timisoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), Timișoara, pp. 253-258, 2004.
23. Bordeaşu, I., Micu, L., Mitelea, I., Uțu, I.D., Pîrvulescu, L.D., Sîrbu, N.A.: “Cavitation Erosion of HVOF Metal-ceramic Composite Coatings Deposited onto Duplex Stainless Steel Substrate”, Mat. Plast., Volume: 53, Issue: 4, pp. 781-786, 2016.
24. Bordeaşu, I., Mitelea, I., Sălcianu, L., Crăciunescu, C. M.: “Cavitation Erosion Mechanisms of Solution Treated X5CrNi18-10 Stainless Steels”, Journal of Tribology-Transactions of the ASME, Volume: 138, Issue: 3, Article Number: 031102, DOI: 10.1115/1.4032489, 2016.
25. Bordeaşu, I., Popoviciu, M. O., Ghera, C., Micu, L. M., Pîrvulescu, L. D., Bena, T.: “The use of Rz roughness parameter for evaluation of materials behavior to cavitation erosion”, International Conference on Applied Sciences (ICAS2017), IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 294 doi:10.1088/1757-899X/294/1/012020, Hunedoara, 2017
26. Bordeaşu, I., Popoviciu, M.O., Mitelea, I., Bălăsoiu, V., Ghiban, B., Jucu, D.: „Chemical and mechanical aspects of the cavitation phenomena”, Revista de Chimie, Volume: 58, Issue: 12, pp. 1300-1304, 2007.
27. Brandstädter, A., Goretta, K. C., Routbort, J. L., Groppi, D. P., Karasek, K. R.: “Solid-particle erosion of bismaleimide polymers”, Wear, vol. 147, pp.155-164, 1991.
28. Breslin, J.P., Andersen P.: “Hydrodynamics of ship propellers”, 3, Editor Cambridge University Press: United Kingdom, 2003.
29. Brooks J. W. : “Thèse de doctorat (Ph. D.)”. Université de Birmingham, 1987.
30. Brujan, E.A., Al-Hussany, A.F.H., Williams, R.L., Williams, P.R.: “Cavitation erosion in polymer aqueous solutions”, Wear, Vol. 264, Issues 11–12, pp. 1035-1042, 2008.
31. Bunea, M., Bosoancă, I., Bosoancă, R., Bodor, M., Cîrciumaru, A.: „Bending and Compressive properties of Fabric reinforced Composites”, Mat. Plast., Volume: 52, Issue: 3, pp: 368-372, 2015.

32. Carlton, J.: "Marine propellers and Propulsion", Elsevier Ltd: Oxford, 2007.
33. Carlton, J.: "Propeller service experience", The 7<sup>th</sup> Lips Symposium, 1989.
34. Choi, J-K., Chahine, G.L.: "Experimental and Numerical Study of Cavitation Erosion Resistance of a Polyurea Coating Layer", Fourth International Symposium on Marine Propulsors SMP'15, Austin, Texas, USA, 2015.
35. Dimofte, M., Bunea, M., Capatana, A., Cojan, A., Bosoanca, R., Circiumaru, A.: "Tensile and bending analysis of fabric reinforced graded epoxy composites", *Mat. Plast.* 54 (2), 2017, pp. 362-367.
36. Du, J., Zhang, J., Zhang, C.: "Effect of Heat Treatment on the Cavitation Erosion Performance of WC-12Co Coatings", *Coatings*, 9(10), 690, 2019.
37. Dumitrescu S., ș. a. "Calculul elicei". București: Editura Academiei Române. 1990.
38. Edwin L., Frances A., Margaret W.: „Statistics Manual, Dover Publications”, Inc. New York, 2010.
39. Frank J.P., Michel J.M.: "Fundamentals of cavitation". Kluwer Academic Publishers-Dordrecht/Boston/London, 2004.
40. Franc. J.P, Kueny. J.L, Karimi A., Fruman, D.H., Fréchou, D, Briançon-Marjollet. L, Yves Billard, J.Y, Belahadji, B., Avellan, F., Michel, J.M.: "La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels" , Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995.
41. 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.
42. 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.
43. Geru N., ș.a.: "Analiza structurii materialelor metalice", Editura Tehnică, București, 1991.
44. Geru, N.: "Metalurgie fizică", Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
45. Ghera, C.: „Rolul tratamentelor duplex în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor pentru aparatura sistemelor hidraulice”, Teza de doctorat, Timisoara, 2017.
46. Gopi, K.R., Nagarajan, R.: „Application of power ultrasound in cavitation erosion testing of nano-ceramic particle/polymer composites”, *Solid State Phenomena*, Vol. 136, pp 191-204, 2008.
47. Hammitt F.G., Bhatt N.R.: „Cavitation damage resistance of hardened steels”, Univ. Michigan, pp. 1-36, 1970.
48. Hattori, S., Kitagawa T.: „Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data”, *Wear*, volume 269, Issues 5-6, pp. 443-448, 2010.
49. Hobbs, J.M.: „Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, *Erosion by Cavitations or Impingement*”, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
50. Hobbs, J.M.: „Vibratory cavitation erosion testing at nel”, *Confrence Machynery Groop*, Edinburgh, 1974.
51. Hong S., Wu Y.P., Zheng Y.G., Wang B., Gao W.W., Lin J.R.: „Microstructure and electrochemical properties of nanostructured WC-10Co-4Cr coating prepared by HVOF spraying”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 235, pp. 582-588, 2013.
52. Hong S., Wu Y.P., Zhang J.F., Zheng Y.G., Qin Y.J., Lin J.R.: „Ultrasonic cavitation erosion of high-velocity oxygen-fuel (HVOF) sprayed near-nanostructured WC-10Co-4Cr coating in NaCl solution”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 25, pp. 87-92, 2015.
53. Horwath.J., F.: „Why nickel aluminium bronze for sea water pumps, *Applications series, Information on centrifugal pumps*”, Ampco Pumps company, 2002.

54. Ito, T.: "An experimental investigation into the unsteady cavitation of marine propellers". IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai. 1962.
55. Jurchela, A.D.: „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel”, Teza de doctorat, Timișoara, 2012.
56. Karabenciov A.: „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom”, Teza de doctorat, Timișoara, 2013.
57. 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.
58. Kūčkōmeroğlu, T., Kara, L., "The friction and wear properties of CuZn39Pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions", Wear, 309, pp 21–28, 2014.
59. **Lazăr, I.**, Bordeasu, I., Popoviciu, M. O., Mitelea, I., Bena, T., Micu, L. M.: "Considerations regarding the erosion mechanism of vibratory cavitation", KOD 2018, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 393,012040 doi:10.1088/1757-899X/393/1/012040, 2019.
60. **Lazăr, I.**, Bordeasu, I., Popoviciu, M. O., Mitelea, I., Craciunescu, C. M., Pirvulescu, L. D., Sava M., Micu L. M.: "Evaluation of the brass CuZn39Pb3 resistance at vibratory cavitation erosion", International conference on applied sciences ICAS 2018, Banja Luka, Bosnia Hertegovina, 2018.
61. **Lazar, I.**, Bordeasu, I., Circiumaru, A., Mitelea, I., Bocii, L.: "Behavior of Polymer Thin Films Deposited on Bronze Surfaces at Cavitation Erosion", Rev.Chim (Bucharest), vol.69, no.10, pp. 2921-2927, 2018.
62. **Lazăr, I.**, Bordeasu, I., Popoviciu, M.O., Micu, L.M.: "Researches regarding the Behavior of CuAl10.5Ni5Fe4.8Mn1.5 at Erosion Generated by Vibratory Cavitation", HIDRAULICA, Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, No. 4, ISSN 1453 – 7303, pp. 25-33, 2017.
63. **Lazăr, I.**, Bordeasu, I., Sirbu, N.A.: "Estimation of the resistance at the cavitation erosion of the CuSn12 bronze based on mean durability", Welding and Material Testing, XXVII, no.3, p.1-5, 2018.
64. Lie, I., Beschiu, C., Nanu, S.: "FPGA Based Signal Processing Structures", SACI 2011 - 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Proceedings, DOI: 10.1109/SACI.2011.5873043, , pp. 439-444, 2011.
65. Lin, C., Zhao, Q., Zhao, X., Yang, Y.: "Cavitation Erosion of Metallic Materials", International Journal of Geohazards and Environment, DOI: 10.15273/ijge.2018.01.001, 2018.
66. Ma, L, Meng, L., Wu, G., Yang, Y., Zhao, M., Zhang, M., Huang, Y.: "Improving, the interfacial properties of carbon fibre-reinforced epoxy composites by grafting of branched polyethyleneimine on carbon fiber surface in supercritical methanol", Compos. Sci. Technol., vol.114, pp.64-71, 2015.
67. Mathiazhagan A.,, a.o.: "Corrosion behaviour of brass in the vembanad estuary, India". Journal of Marine Science and Technology, Vol.18: p. 719-722, 2010.
68. Mânzână M.E.: "Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice", Teza de doctorat, București, 2012.
69. Meigh, H.J.: "Cast and wrought aluminum bronzes properties, processes and structure", Cambridge: IOM Communications Ltd, University Press, 2000.

70. Micu, L.M., Bordeasu, I., Popoviciu, M.O.: "A New Model for the Equation Describing the Cavitation Mean Depth Erosion Rate Curve", *Rev. Chim. (Bucharest)*, 68, no. 4, pp. 894-898, 2017.
71. Micu, L.M., **Lazăr, I.**, Circiumaru, A., Bordeasu, I., Pîrvulescu, L.D., Hlușcu, M.: "New Results Regarding Cavitation Behavior of Polymers Modified with Anorganic Substances Coated on Bronze Surfaces", *Rev.Mat.Plast*, vol. 55, nr.3, pp. 460-463, 2018.
72. Micu, L.M., **Lazăr, I.**, Bordeasu I., Bădăraș, R., Podoleanu, C.E., Duma, S.T., Pîrvulescu, L.D., Hlușcu, M.: "Evaluation of the Cavitation Resistance of Some Materials Based on Mean Durability", *Welding and Material Testing*, XXVII, no.1, p.14-17, 2018.
73. Mitelea I.: "Studiul metalelor", Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1983.
74. Mitelea, I., Ghera, C., Bordeasu, I., Crăciunescu, C.M.: "Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel", *International Journal of Materials Research*, 106 (4), April, pp 391-397, 2015
75. Mitelea, I.: "Materiale ingineresti", Editura Politehnica, Timișoara, Romania, 2009
76. Muntenita, C., Bria, V., Eni, C., Circiumaru, A., Graur, I.: "Physical Carcatresization nano-ferities modified Epoxy Resines", *Mat. Plast.* 53 (3), pp. 509-511, 2016
77. Murray-Ramos, N.A.: "Examining aspects of copper and brass corrosion in drinking water", Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University: Virginia USA, 2006
78. Nanu, S., Belgiu, G., Silea, I.: "Tolerance Design in the PLM Environment - An Expert System Approach", SOFA 2010 - 4<sup>th</sup> International Workshop on Soft Computing Applications, Proceedings, pp. 255-258, 2010
79. Oancă O.: "Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale", Teza de doctorat, Timișoara, 2014
80. Oancă, O., Bordeasu, I., Mitelea, I., Crăciunescu, C.: "Phenomenology of Degradation by Cavitation for Heat Treated CuNiAlFe Bronzes", 22<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17, 2013, pp., 2013.
81. Okada, T., Iwai, Z., Hattori, s., Tanimura, N.: "Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse", *Wear*, vol. 184, p.231-239, 1995.
82. Pawlak, A., Cavitation during deformation of polymers on the example of polypropylene. *Journal of Applied Polymer Science*. 2012;125:4177-4187. DOI: 10.1002/app.36565.
83. Pawlak, A., Gałęski, A.: "Cavitation during tensile drawing of semicrystalline polymers", *Polimery*, vol.56, nr 9, pp. 625, 2011.
84. Pantazopoulos, G. A., Toulfatzis, A. I.: "Fracture Modes and Mechanical Characteristics of Machinable Brass Rod", *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 1(2) pp 106-114, 2012.
85. 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.
86. Popoviciu M., Bordeasu I.: "A standard material for cavitation erosion tests", *Hydraulic Machinery and Hydrodynamics*, Vol II, Timișoara, 1994.
87. Popoviciu M, Bordeasu I.: "Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationelle", *Bulletin Științific și Tehnic, Universitatea Tehnică, Timișoara*, Vol 40(51), 1993.

88. Popoviciu O.M., Bordeasu I.: "Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice", Editura Politehnica, Timișoara, 1998.
89. Sălciuanu, L.: "Curgerea în vanele fluture și eroziunea prin cavitație a componentelor din oțeluriinoxidabile austenitice", Teza de doctorat, Timișoara, 2017.
90. Steller, J. K.: "International cavitation erosion test – test facilities and experimental results", 2 – emes Journees Cavitation, Paris, March, 1992.
91. Steller, K., Bugola R., Steller J.: „Cavitation Roads and their erosive effects”, 2 – emes, Journees Cavitation, Paris, 1992.
92. Suciu, V., Suciu, M-V.: „Studiul materialelor”, București: Fair Partners, 2008.
93. Thiruvengadam A., Preiser H. S.: "On testing materials for cavitation damage resistance", Report. 233 – 3, 1963.
94. Ting, R. Y.: „Polymer effects on microjet impact and cavitation erosion”, Nature, Volume 262, Issue 5569, pp. 572-573, 1976.
95. Vasilescu, M.D., Fleser, T.: „Influence of technological parameters on the dimension of GEAR parts generated with PLA material by FDM 3D printing”, Mat. Plast., Volume: 55, Issue: 2, pp. 247-251, 2018.
96. Veerabhadra Rao, P.: "Evaluation of epoxy resins in flow cavitation erosion", Wear, Vol. 122, Issue 1, pp. 77-96, 1988.
97. Xiao-ya Li, Y.-g.Y., Zhen-min Xu, Hian-guo Li,: "Cavitation erosion behavior of nickel-aluminum bronze weldment". Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.13: p. 1317-1324, 2003.
98. Zhang, H., Gong, Y., Chen, X., McDonald, A., Li, H.: "A Comparative Study of Cavitation Erosion Resistance of Several HVOF-Sprayed Coatings in Deionized Water and Artificial Seawater", Journal of Thermal Spray Technology, vol.28, pp.1060–1071, 2019.
99. \*\*\*Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32, 2010.
100. \*\*\*[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).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.
101. \*\*\*[www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com): Cuppari M.G. Di V., Souza R.M., Sinatora A., Effect of hard second phase on cavitation erosion of Fe–Cr–Ni–C alloys.
102. \*\*\* <http://www.uni-duisburg.de/FB7/IST/links/Klassif.html>], Uni-Duisburg FB IST: Liste der Klassifikationsgesellschaften und Organisationen.
103. \*\*\*[www.rs.ugal.ro/Elnav/raport2.pdf](http://www.rs.ugal.ro/Elnav/raport2.pdf), CONTRACT CEEX 322/06.10.2006, Cercetări fundamentale și aplicative privind realizarea bronzurilor CuNiAl destinate recondiționării elicelor navale – ELNAV, Etapa I/ 2006 - Fază unică. Cercetări fundamentale privind caracterizarea și obținerea materialelor pentru recondiționarea elicelor navale.
104. \*\*\* [www.rs.ugal.ro/Elnav/raport2.pdf](http://www.rs.ugal.ro/Elnav/raport2.pdf), CONTRACT CEEX 322/06.10.2006, Cercetări fundamentale și aplicative privind realizarea bronzurilor CuNiAl destinate recondiționării elicelor navale – ELNAV, ETAPA II / 2007 - Cercetări fundamentale privind obținerea semifabricatelor deformabile și a electrozilor înveliți de tip CuNiAl.
105. \*\*\* Registrul naval roman, Reguli pentru clasificarea și construcția navelor maritime, Vol V, Bucuresti, 1986.
106. \*\*\*  
[http://www.ampcometal.com/common/datasheets/us/A45\\_EX\\_E\\_US.pdf](http://www.ampcometal.com/common/datasheets/us/A45_EX_E_US.pdf).
107. \*\*\* [http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/AM4\\_EX\\_E.pdf](http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/AM4_EX_E.pdf).
108. \*\*\*[www.sulzer.com/as/-/media/.../TS\\_MaterialGuide\\_EN\\_052012.pdf](http://www.sulzer.com/as/-/media/.../TS_MaterialGuide_EN_052012.pdf), Thermal Spray Materials Guide

109. \*\*\* <https://copperalliance.ro/despre-cupru/cupru-si-aliaje-de-cupru/aliaje/>.
110. \*\*\*<http://www.scribub.com/stiinta/chimie/Utilizarea-metalelor-si-alia1621615721.php>.
111. \*\*\* Germanischer Lloyd, Rules for Classification and Construction II Materials and Welding, Materials for Propeller Fabrication, .Edition 2019, , Hamburg Printed by: Gebrüder Braasch GmbH, Hamburg, [http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/marimerules/gl\\_ii-1-5\\_e.pdf](http://rules.dnvgl.com/docs/pdf/gl/marimerules/gl_ii-1-5_e.pdf)].
112. \*\*\*<https://www.inspection-for-industry.com/pump-net-positive-suction-head-test.html>.
113. \*\*\*<https://jacpump.wordpress.com/2011/04/17/solving-a-cavitation-problem>.
114. \*\*\*<https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=xSvoW7jRkSx9kwW3p6WIAg&q=cavitation+empeller&oq=cavitation+empeller>
115. \*\*\*<https://www.ogorul.ro/p/pompa-de-transvazare-din-bronz-debit-33-litriminut-tp200>.
116. \*\*\*<https://www.tehnocenter.ro/cm-40-200-b-pentax-pompa-de-suprafata-putere-5-5-kw-inaltime-de-refulare-44-9-27-9-m-debit-maxim-150-700-l>.
117. \*\*\*<https://www.emag.ro/pompa-de-apa-pentax-csb-150-pentru-irigatii-prin-inundare-si-picurare-230-v-inaltime-max-de-refulare-21-5-m-debit-max-400-l-min-2-pentaxcsb150/pd/DMXBW2BBM/>].
118. \*\*\*<https://ispshop.ro/collections/pompe/products/pompa-n20-tellarini?variant=37523734607>].
119. \*\*\*<https://www.inspection-for-industry.com/pump-net-positive-suction-head-test.html>.
120. \*\*\*<http://www.Int-hydraulics.com/hydraulic-products/radial-piston-pumps/>
121. \*\*\*<http://www.directindustry.com/prod/spitznas/product-190535-1872759.html>.
122. \*\*\*[https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=cS3oW\\_zHIsekwXzorQY&q=vane+bronz&oq=vane+bronz&gs\\_l](https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=cS3oW_zHIsekwXzorQY&q=vane+bronz&oq=vane+bronz&gs_l)].
123. \*\*\*[<http://www.sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/Carcea-Aliaje-Neferoase-de-turnatorie1.pdf>,-Carcea, I, Gherghe, M, Aliaje Neferoase De Turnătorie].
124. \*\*\*[https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=864&tbm=isch&sa=1&ei=G7f6W\\_qtF5CakwWHiqXADQ&q=tin+bronz+microstructure&oq=bronz](https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=864&tbm=isch&sa=1&ei=G7f6W_qtF5CakwWHiqXADQ&q=tin+bronz+microstructure&oq=bronz).
125. \*\*\* <http://www.kleinmetals.ch/shop/Datenblatt/E/631.pdf>.
126. \*\*\*<https://www.rna.ro/Legislatie/SCTN/Norme%20ANR%20scanate/2-1Inspectarea%20si%20repararea%20eliceilor.pdf>.
127. \*\*\*<https://www.animavision.ro/pompa-hidrofor-el-pumps-jpv-1300b-rotor-bronz-p-4564.html>.
128. \*\*\*<http://www.crumantech.ro/protectii-industriale/belzona-1341-supermetalgilde>.
129. \*\*\*<http://shop.polydis.ro/index.php/en/epoxy-resin/epiphen-re-4020-catalizator-de-4020.html>.
130. \*\*\*<http://www.sirindustriale.com/EN/CustomDocuments/SIRESTER%20VE%2064%20M%20140%20tds%20uk.pdf>.
131. \*\*\* <https://www.belzona.com/en/products/2000/2141.aspx>.
132. \*\*\* <https://www.google.ro/search?q=cavitation+vortex&tbm=isch&source>.
133. \*\*\*<https://www.google.ro/search?ei=z5MdWoPVL8fL6ATD6riIDg&q=cavitation+in+the+Kaplan+Rotor+Turbines>.