

**TEHNICI DE OPTIMIZARE A REZISTENȚEI LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE A
UNOR ALIAJE Cu-Zn ȘI Cu-Sn**

Teză de doctorat – Rezumat
pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat Inginerie Mecanică

autor ing. Iosif LAZĂR

Conducători științifici: Prof.univ.dr.ing. **Ilare Bordeasu**
Prof.univ.dr.ing **Ion Mitelea**

Timișoara

CUPRINS

(extras)

- 1. Documentare privind utilizarea aliajelor pe bază de cupru în fabricarea pieselor solicitate la cavitație- 3**
- 2. Materialele, aparatura de laborator și metodele utilizate în cercetarea experimentală - 5**
- 3. Cercetarea rezistenței la cavitația vibratoare a alamei CuZn39Pb3 și a bronzului CuSn12-C în stări de semifabricat - 9**
 - 3.1 Cercetarea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3 - 9*
 - 3.2 Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C - 12*
 - 3.3 Compararea rezultatelor cercetării - 15*
 - 3.4 Concluzii - 16*
- 4. Cercetarea rezistenței la cavitație a unor aliaje cu baza de cupru supuse tratamentelor termice volumice - 17**
 - 4.1 Cercetarea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3 - 17**
 - 4.1.1 Tratamentele termice volumice - 17*
 - 4.1.2 Rezultatele cercetării la cavitație - 17*
 - 4.1.3 Compararea rezultatelor cercetării - 28*
 - 4.2 Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C - 28**
 - 4.2.1 Tratamentele termice volumice - 28*
 - 4.2.2 Rezultatele cercetării la cavitație - 29*
 - 4.2.3 Compararea rezultatelor cercetării - 38*
 - 4.3. Concluzii - 39**
- 5. Tehnici și materiale utilizate în acoperirea suprafețelor pentru protecție la solicitările cavitaționale - 40**
 - 5.I Amestecuri polimerice modificate - 40*
 - 5.II Straturi cu bază de cupru depuse prin pulverizare termica HVOF - 43*
- 6. Concluzii finale și contribuții originale. Perspective noi de cercetare - 45**
- Bibliografie (selectivă) - 46**

1. DOCUMENTARE PRIVIND UTILIZAREA ALIAJELOR PE BAZĂ DE CUPRU ÎN FABRICAREA PIESELOR SOLICITATE LA CAVITAȚIE

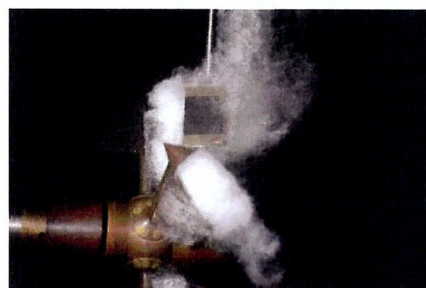
Aliajele pe bază de cupru (alamele și bronzurile) au o aplicabilitate foarte mare în industrie, datorită proprietăților tehnologice (obținere semifabricate prin turnare, laminare, forjare, adaptabilitate la prelucrările mecanice și la tratamentele termice, etc) și caracteristicilor fizico-mecanice care le conferă rezistențe la coroziunea chimică a mediului de exploatare, la solicitări termice și hidrodinamice, de tipul cavitației.

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, conductivitate electrică și termică, și rezistența la coroziune [66], [67], [83].

Bronzurile sunt aliaje ale cuprului cu staniu 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. 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 [67]. În cele ce urmează, vom face referire la tipurile de alame și bronzuri folosite în fabricarea elicelor navale, precum și o prezentare a componentelor de mașini hidraulice, realizate din aceste aliaje.



a) Elicea cu pala erodată (montată pe arbore)



a) Elice în vârtej cavitațional

Fig.1.5. Imagini ale elicelor de vapoare, realizate din aliaje de cupru [72], [73]



Înainte de exploatare



Distrus de cavitație



a) Rotor de pompă centrifugă din bronz
[71]

b) Rotor de pomă centrifugă cu ax comun
din bronz, [72], [94]

Fig.1.13 Componentele pompei centrifuge, erodate prin cavitație

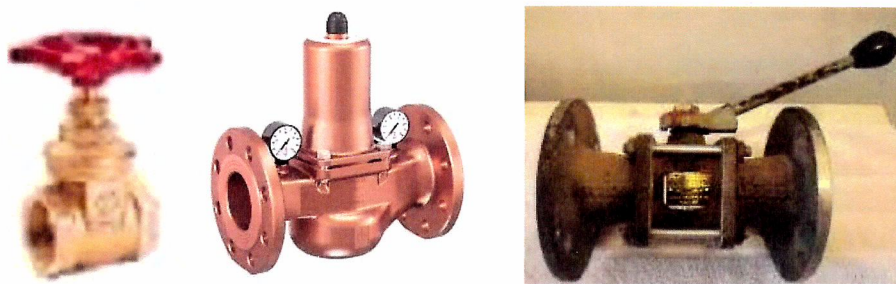


Fig.1.22 Robineți și vane cu corpuri din bronz și ventile din alamă sau bronz

Concluzie

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, robineți, 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.

Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- cercetarea comportamentului și rezistenței la cavitație vibratoare a unui bronz Cu-Sn 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, în aparatul vibrator standard, cu cristale piezoceramice, T2 (amplitudinea vibrațiilor = 50 μm , frecvența vibrațiilor = 20000 $\pm 1\%$ 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 [56], precum și imaginile microstructurii erodate, obținute prin microscopie optică și electronică.

Noutatea tezei de doctorat

Noutatea tezei de doctorat constă în identificarea procedeele de tratamente termice volumice pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziunea prin cavitație a bronzului CuSn12 și alamei CuZn39Pb3, destinate fabricării elicelor de vapoare, rotoarelor de pompe hidraulice, organelor vanelor și robineților, precum și a diverselor fittinguri, supuse atacurilor cavitației. De asemenea, se cercetează comportarea la cavitația vibratoare a unor noi tipuri de rășini polimerice, depuse pe suprafețele probelor de cavitație, realizate din bronz CuSn12.

În tabelul 1.1 sunt prezentate o parte din amenajările CHE din România, prevăzute cu vane fluture, marea parte fiind proiectate și montate de firma SC HydroEngineering SA.

2. MATERIALELE, APARATURA DE LABORATOR ȘI METODELE UTILIZATE ÎN CERCETAREA EXPERIMENTALĂ

I- 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, Duritatea Brinell = 115 daN/mm², alungirea la rupere $A_5 = 18$ %, modulul de elasticitate longitudinal $E = 97$ GPa, densitatea $\rho = 8.47$ g/cm³;
- structura bifazică formată din soluția solidă α și compusul electronic β' , fig.2.1, [1], [82].

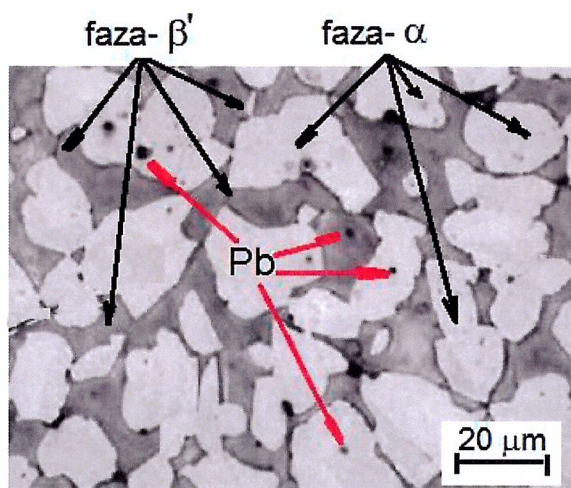


Fig.2.1 Structura alamei CuZn39Pb3 (imagine preluată din [82])

Alegerea acestei alame, cu o structură bifazică (α cu rețea c.f.c. și β' cu rețea c.v.c.), s-a făcut din considerentul că aceste categorii de alame au o largă utilizare în fabricarea scaunelor de închidere a ventilelor supapelor de presiune și robinetilor din sistemele hidraulice de acționare [66], [90] care, la anumite regimuri de exploatare, sunt supuse solicitărilor cavitationale, de o intensitate mai mică.

2- Bronzul, 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 [38], [83];

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;

- proprietatile mecanice: rezistenta la rupere $R_m = 312 \text{ MPa}$, limita de curgere $R_{p0.2} = 157 \text{ MPa}$, Duritatea Brinell = 97 daN/mm^2 , alungirea la rupere $A_5 = 9 \%$, modulul de elasticitate longitudinal $E = 97 \text{ GPa}$, densitatea $\rho = 8.77 \text{ g/cm}^3$;
structura bifazica formata din grăunți de soluție solidă α , iar la conținuturi mai mari de staniu, din grăunți de soluție α și grăunți de eutectoid ($\alpha + \delta$) [83], fig.2.2.

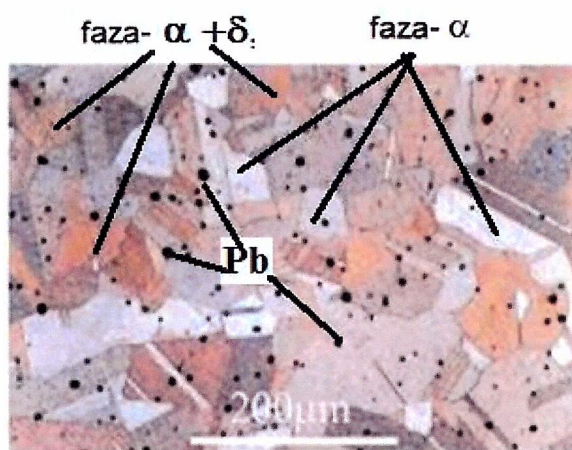


Fig.2.2 Structura bronzului CuSn12 (imagine preluata din [84])

Alegerea acestui tip de bronz este determinată de faptul că au o bună rezistență la acțiunea apei sărate, motiv pentru care, încă, se utilizează la turnarea elicelor de vapoare.

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.

Aparatul folosit în generarea cavitației este cel standard cu cristale piezoceramice, fig.2.3, din cadrul Laboratorului de Cavitație [8], [9], [14], [35], [36], [42], [45], [87], al Universității Politehnica Timișoara, ai cărui parametrii funcționali, sunt controlați și păstrați în limitele admisibile de normele ASTM G32-2010, sunt:

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

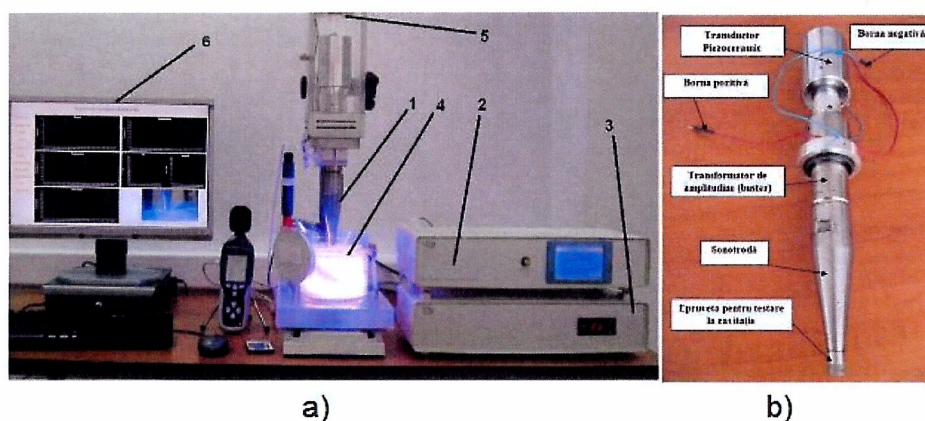


Fig.2.3 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice

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

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 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 constituienților structurali și de zona investigată.



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

Examinările macro și micrografice, după atacul metalografic, sunt realizate 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 investigării.

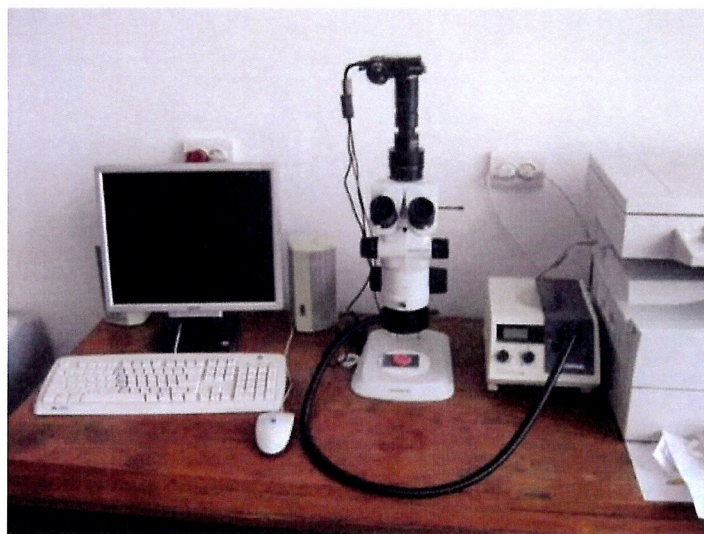


Fig. 2.13 Microscopul OPLIMPUS SYX7

Parametrii profilogramei suprafeței erodate de cavitație, exprimați prin parametrii rugozității Ra, Rz și Rt, au fost mășurați, pe trei direcții dispuse la 120°, cu aparatul Mitutoyo SJ 210, fig. 2.14, la sediul firmei Inteliform SRL din Timișoara.

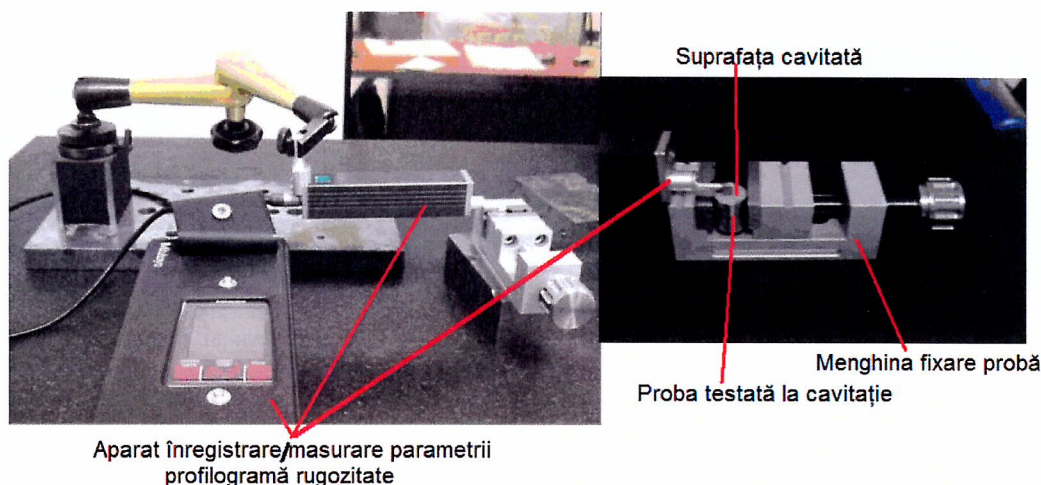


Fig.2.14. Mășurarea rugozității cu rugozimetru digital Mitutoyo SJ 210 pe trei direcții.

Curbele de mediere/aproximare a valorilor obținute prin experiment, la perioadele intermediare de atac, MDE(t) și MDER(t), au expresiile, stabilite de colectivul condus de Bordeasu [87], [93]:

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

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

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 Δm_i , înregistrate la finalul fiecărei perioade intermediare de testare, „i”, conform relațiilor de mai jos.

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

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

ρ - densitatea materialului, în grame/mm³,

Δt_i – durata cavitației corespunzătoare perioadei “i” (5 minute, 10 minute sau 15 minute)

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

Concluzii

1. Aliajele cu bază de cupru (bronzuri și alame), prin elementele chimice de înnobilare 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.

3. CERCETAREA REZISTENȚEI LA CAVITATIA VIBRATOARE A ALAMEI CuZn39Pb3 ȘI A BRONZULUI CuSn12-C, ÎN STĂRI DE SEMIFABRICAT

Testele privind comportarea și rezistența la eroziunea cavitatiei au fost derulate pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, prezentat în capitolul 2. Procedurile privind pregătirea probelor înainte de începerea testelor, durata totală și intermediară a perioadelor de atac al cavitatiei vibratoare, înregistrarea pierderilor masice aferente perioadelor de cavitație, precum și păstrarea probelor sunt în conformitate cu prevederile ASTM G32-2010 [3] și cutuma laboratorului.

3.1 Cercetarea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3

În figurile 3.2 și 3.3 sunt redate 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.

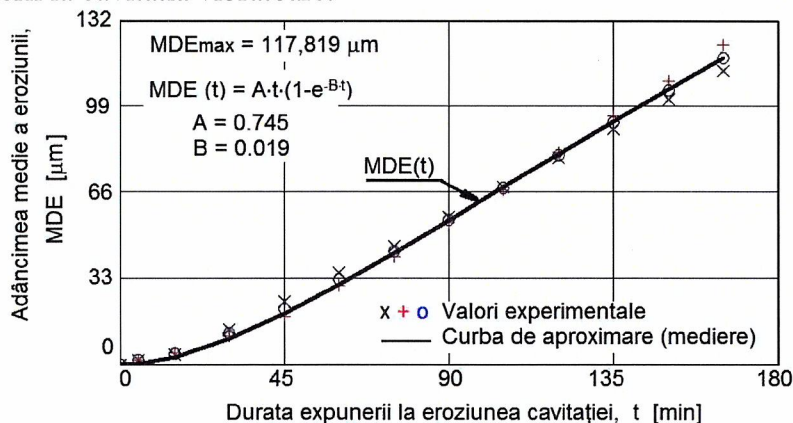
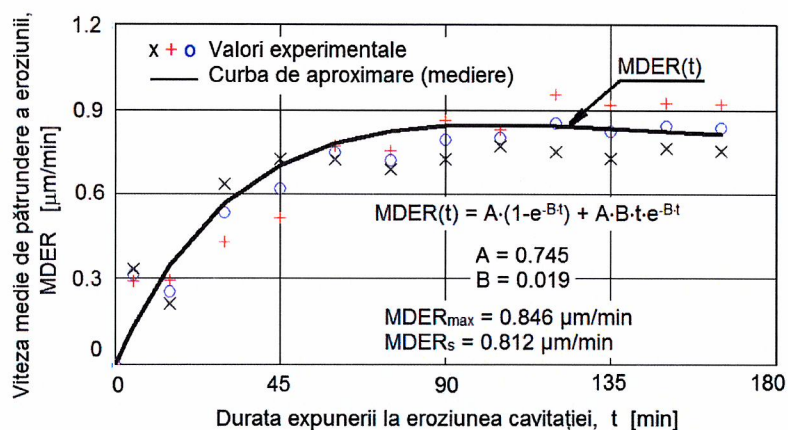


Fig.3.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavităției



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.

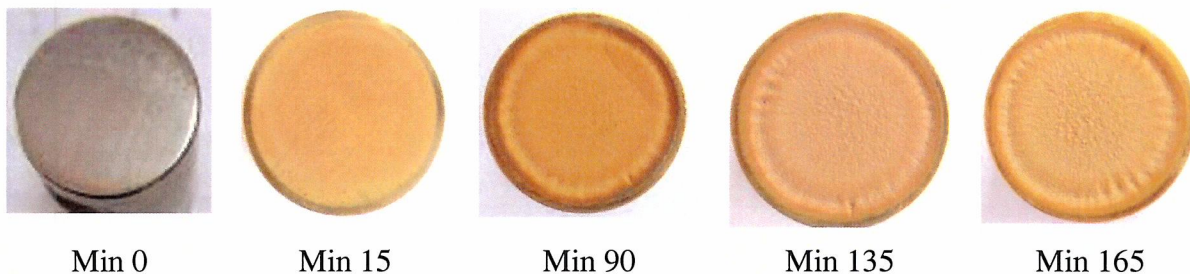


Fig.3.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)

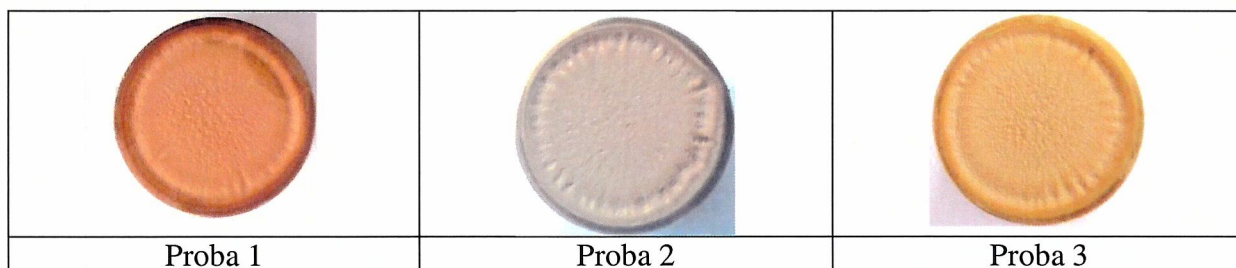
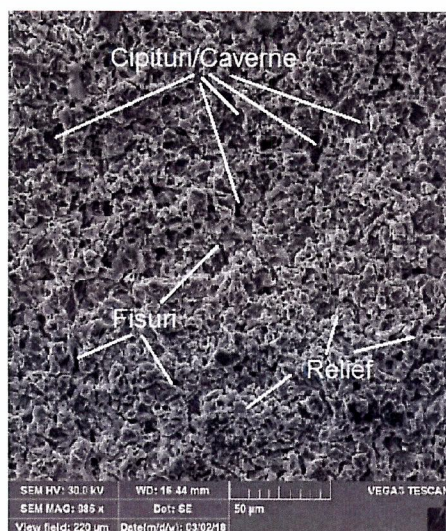
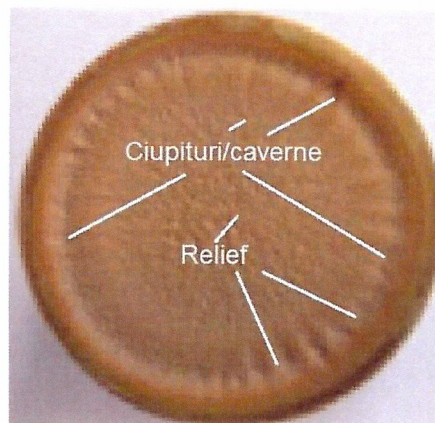


Fig.3.6 Imagini macro (înregistrări cu aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165

Dimensiunile cavernelor cresc, iar rețeaua de fisuri se extinde atât în aria suprafeței cât și în profunzime, cu expulzări de grăunți, așa cum se vede în imaginile micro, fig.3.7, obținute la microscopul electronic cu baleiaj, unde se vede cum sunt îndepărtați grăunții de fază β' și cum sunt propagate fisurile.



a) Imagine SEM (1000 x)

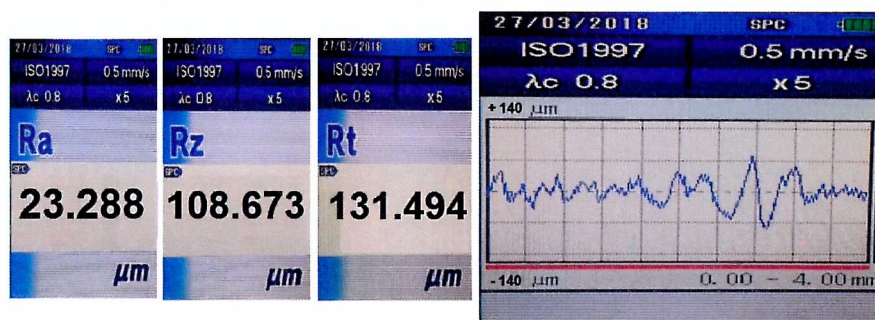


b) Imagine macro

Fig.3.7 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație

(imagini din zona interioară a suprafeței cavitate)

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.



Min 165

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

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.

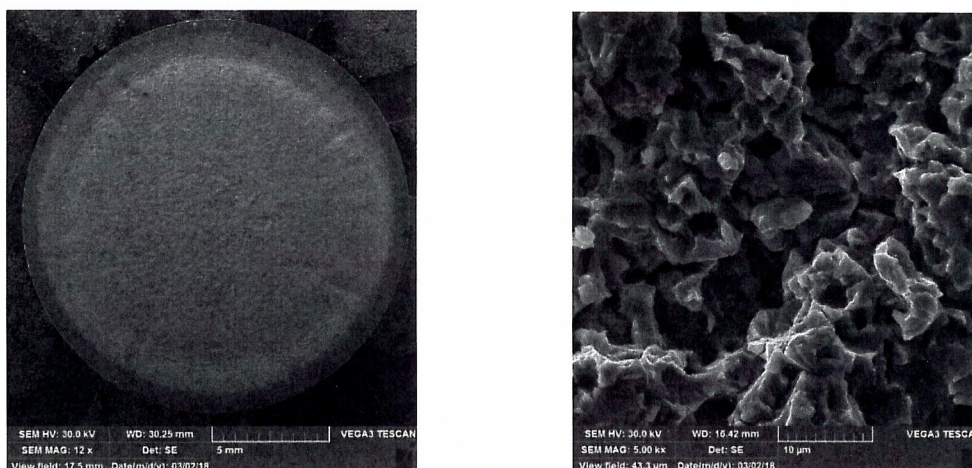


Fig. 3.13 Imagini SEM ale suprafeței probelor testate la cavitație timp de 165 min.

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 β') 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 α de substituție a Zn în Cu.

3.2 Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C

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 $MDER(t)$.

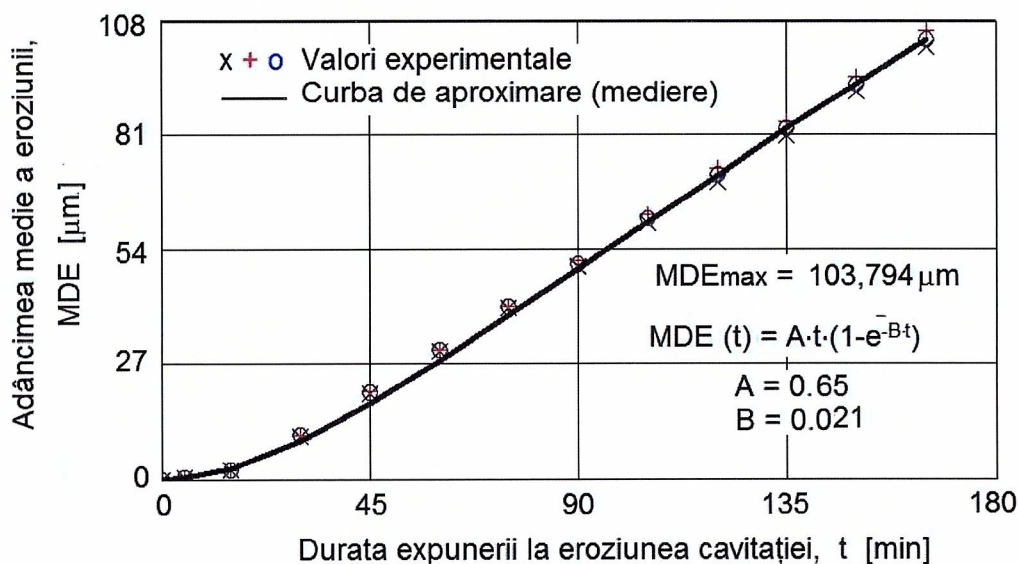


Fig.3.14 Evoluția adâncimii medii cumulate de eroziune cu durata cavitației

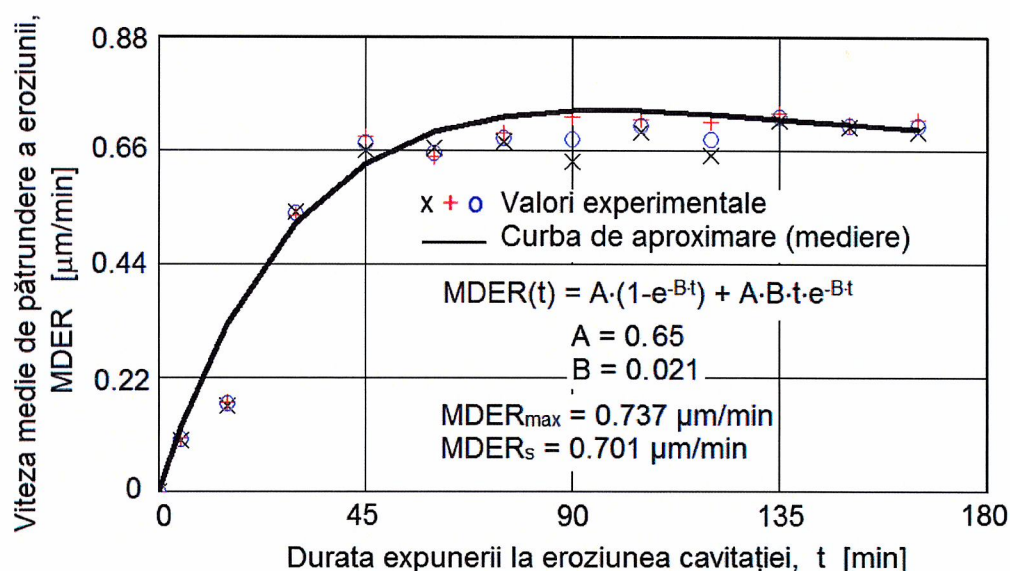


Fig.3.15 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Modul de degradare a structurii suprefețelor, 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)

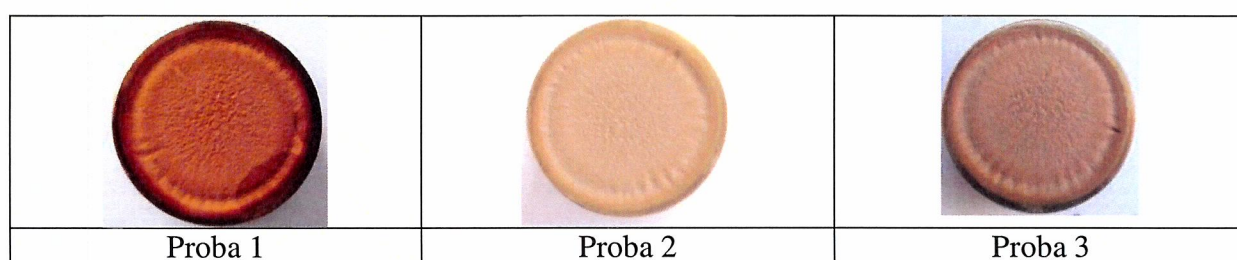


Fig.3.18 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165

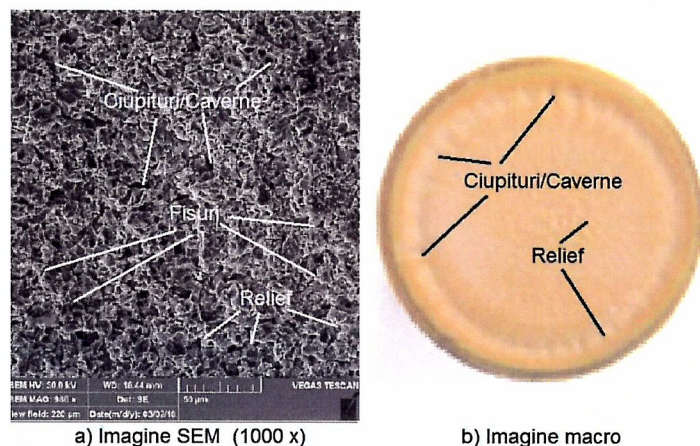
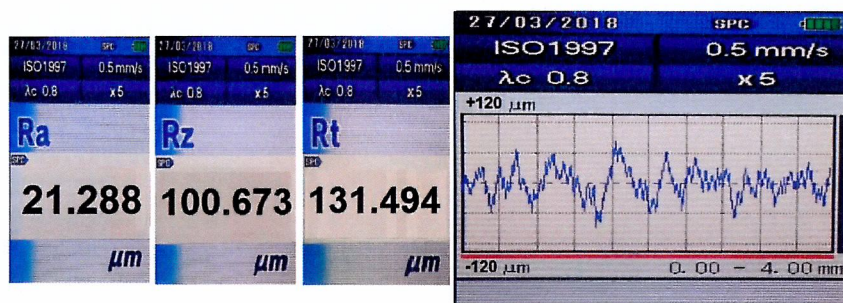


Fig.3.19 Imagini SEM și macro ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație

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 165

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

Investigarea la 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 α de substituție a Sn în Cu și de scobituri poligonale în fostele zone cu compus electronic δ care are fragilitate ridicată.

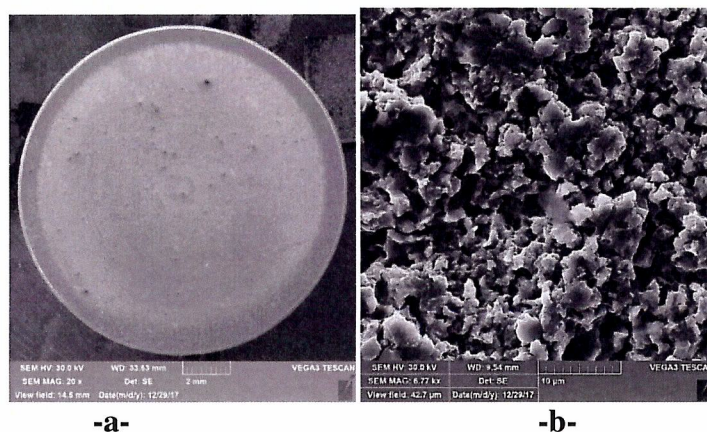


Fig.3.24 Imagini SEM, ale topografiei suprafeței cavitate a bronzului aflat în stare de livrare

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.

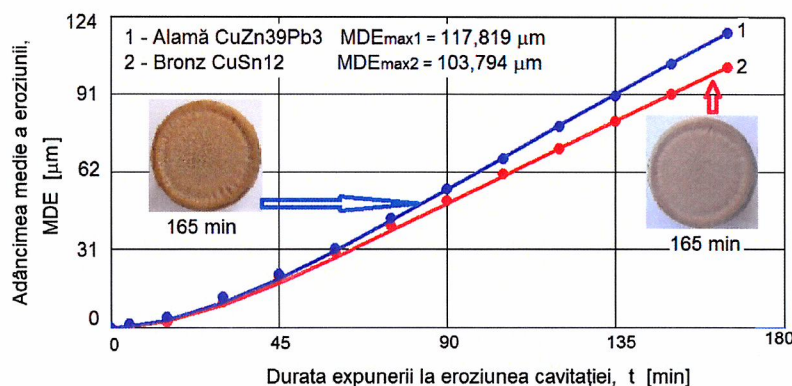


Fig.3.25 Variația adâncimilor medii de eroziune cu durata cavitației (comparații)

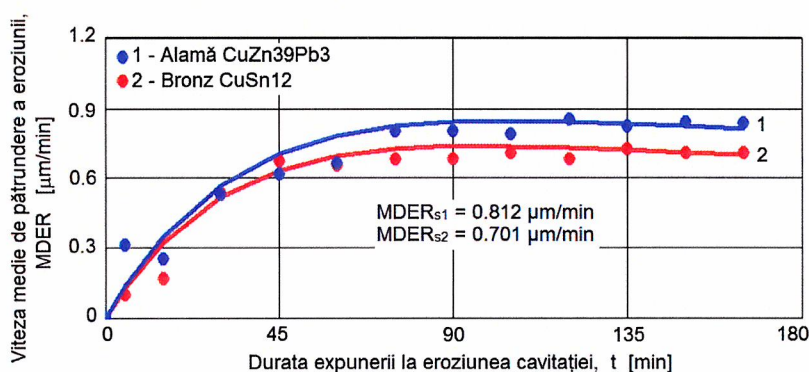


Fig.3.26 Variația vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației (comparații)

Asemănări:

- evoluții exponențiale similare ale curbelor $MDE(t)$, cu liniarizare începând cu minutul 45;
- evoluții similare ale curbelor $MDER(t)$, cu atingerea unor valori de maxim după 90 minute de atac al cavitației;
- 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, 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 .

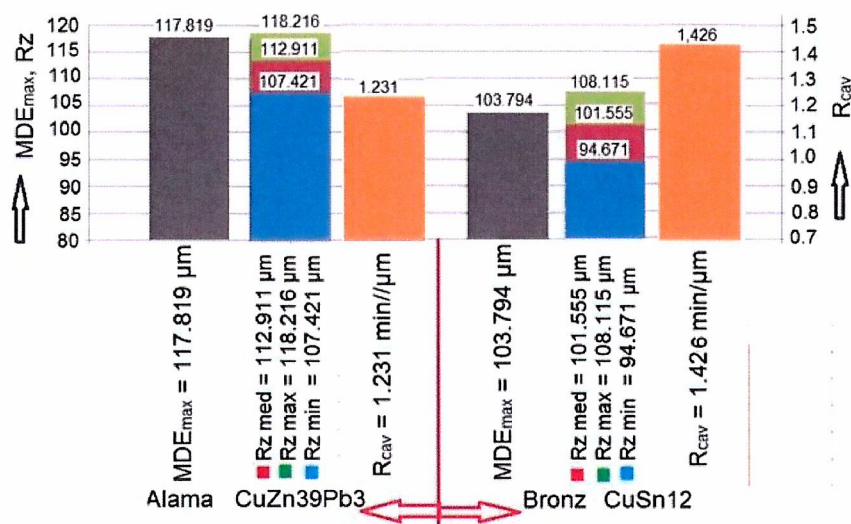


Fig.3.27 Histogramma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

3.4 Concluzii

1. Alama Cu Zn39Pb3 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, reglatoare 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 α și compusul electronic β' , cu distrugere rapidă a fazei β' .- la alama- respectiv la granița dintre solidă α și compusul electronic δ , cu extindere în soluția solidă α .
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.

4. CERCETAREA REZISTENȚEI LA CAVITATIE A UNOR ALIAJE CU BAZA DE CUPRU SUPUSE TRATAMENTELOR TERMICE VOLUMICE

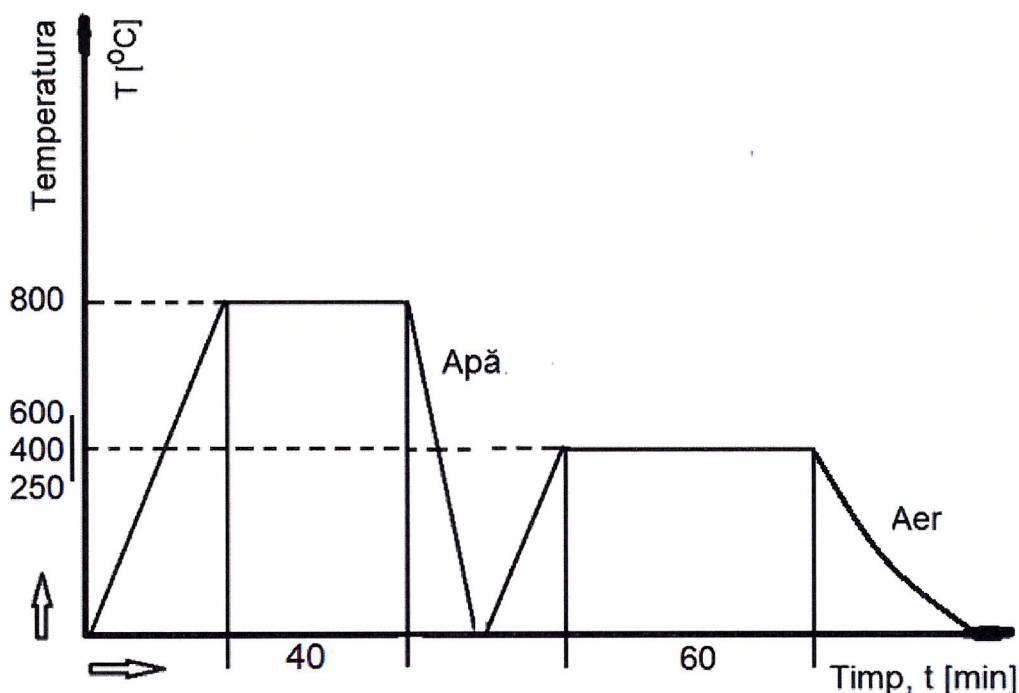
Folosirea tratamentelor termice volumice este determinată de obținerea unor proprietăți fizico-mecanice și de modificare a structurii, prin modificarea temperaturilor, a duratelor de menținere și a mediului/vitezei de răcire [23].

4.1 Cercetarea rezistenței la cavitație a alamei CuZn39Pb3

4.1.1. Tratamente 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**).



- Fig.4 Ciclograma tratamentelor termice

4.1.2 Rezultatele cercetării la cavitație

Calirea volumică de la 800 °C

Valorile experimentale ale testului de cavitație, înregistrate la testele de cavitație vibratoare, precum și curbele de mediere MDE(t) și MDER(t), sunt prezentate în fig. 4.2 și 4.3.

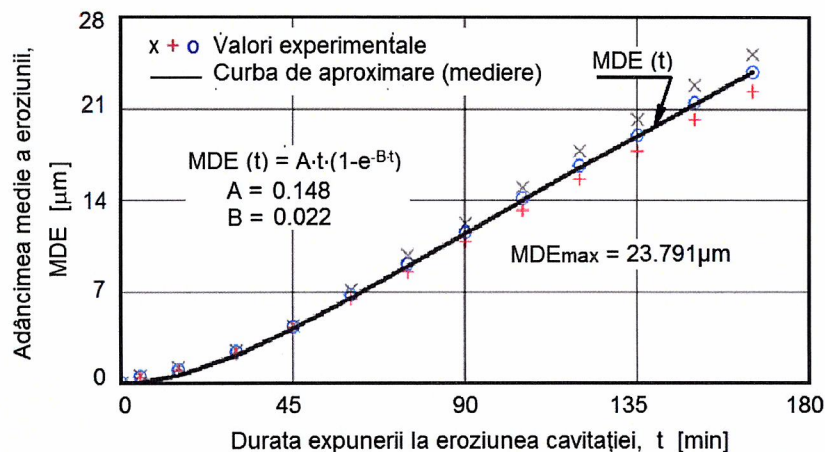


Fig. 4.2 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității

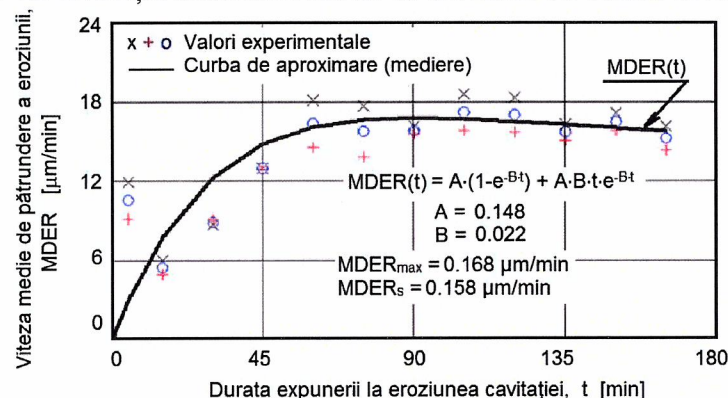


Fig. 4.3 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității

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

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

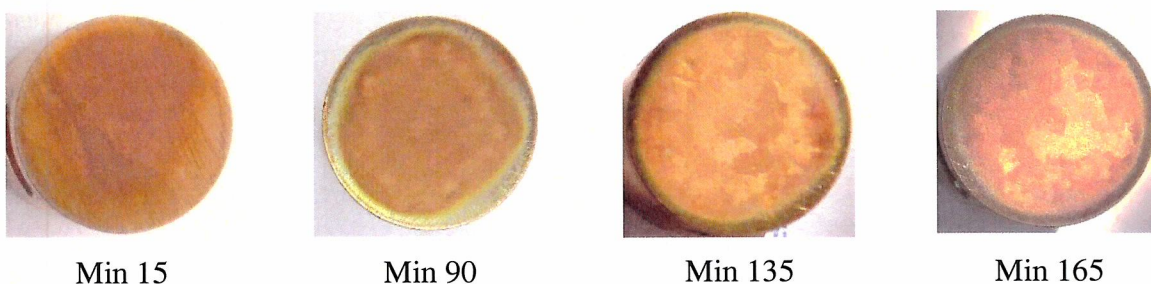


Fig. 4.5 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavității (Proba 1)

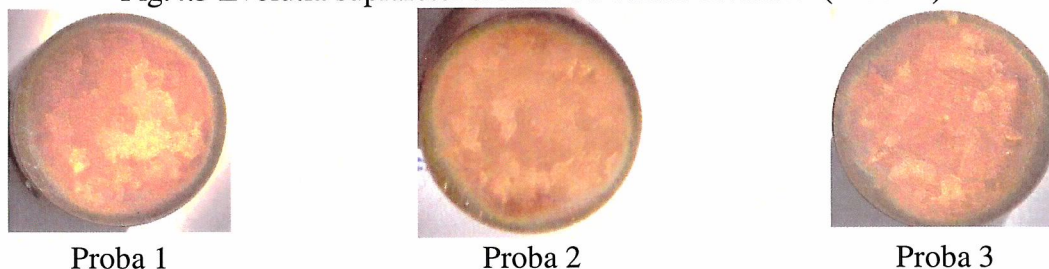


Fig. 4.6 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare, timp de 165

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.

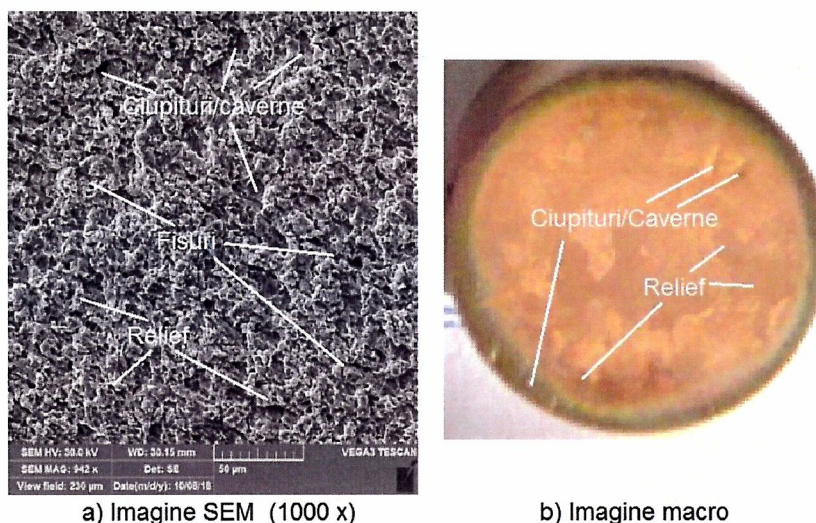


Fig.4.7 Imagini SEM și macroscopice ale microstructurii erodate, după 165 minute de expunere la cavitație (**Proba 2**)
(imagini din zona interioară a suprafeței cavități)

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.

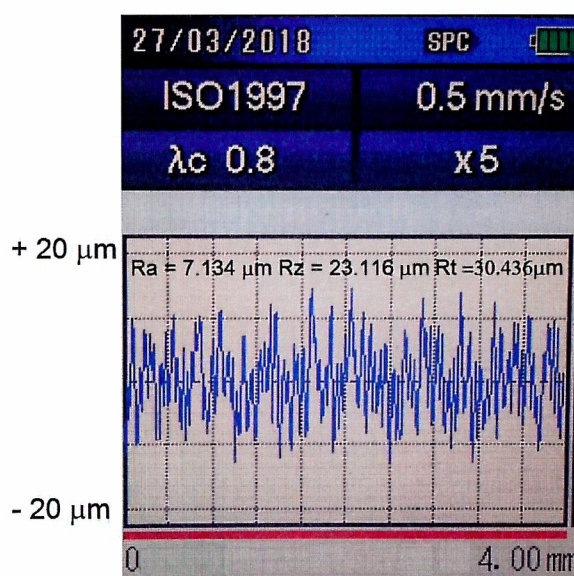


Fig.4.8 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație)
(exemplificare pentru o măsurătoare - **Proba 1**)

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

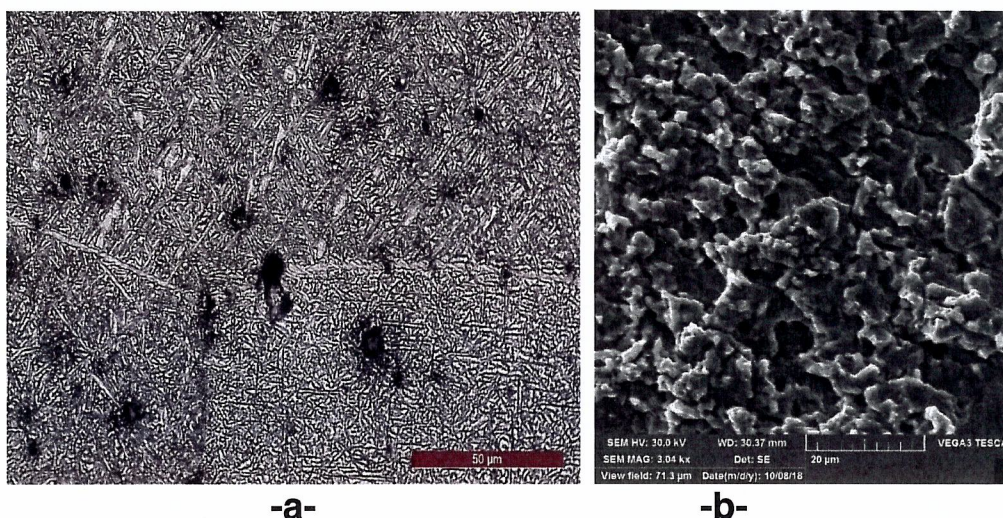


Fig.4.10 Imagini SEM şi macroscopice după 165 minute de expunere la cavitație

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

În fig. 4.11 şi 4.12 sunt afișate valorile experimentale ale celor trei probe testate, approximate prin curbele de mediere $MDE(t)$ şi $MDER(t)$, construite analitic cu relațiile (2.1), precum şi valorile parametrilor MDE_{max} , $MDER_{max}$ şi $MDER_s$.

Prelucrarea statistică a datelor experimentale obținute pe cele trei probe, exprimată prin valoarea erorii standard de 0.253 şi 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 şi cu acuratețe.

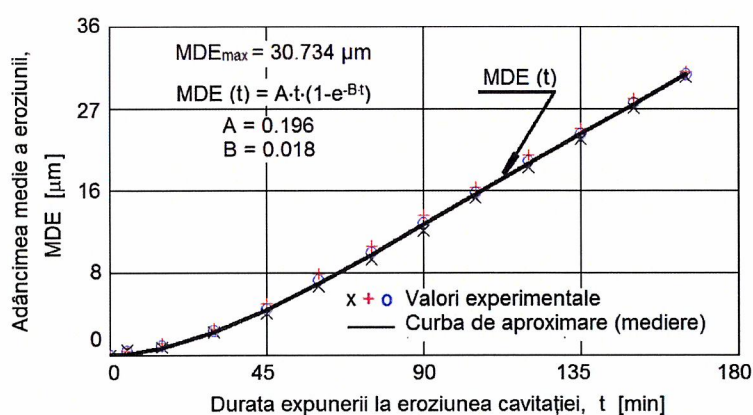


Fig. 4.11 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității

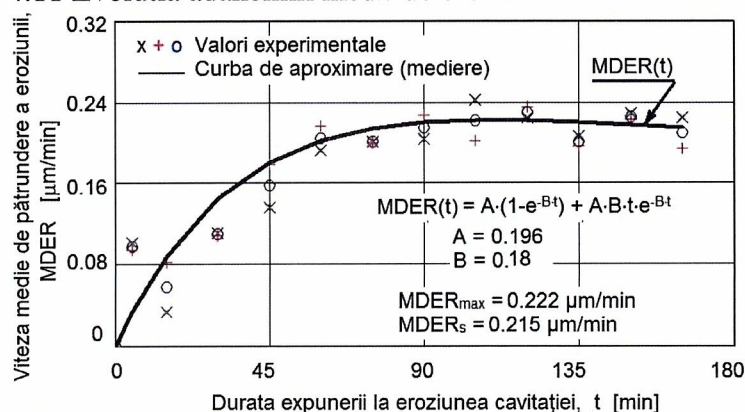


Fig. 4.12 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavității

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



Min 15

Min 105

Min 135

Min 165

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



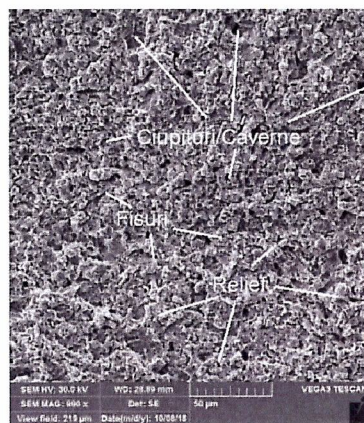
Proba 1

Proba 2

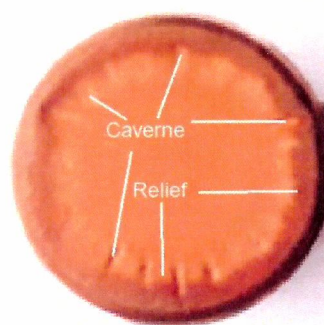
Proba 3

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

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.



a) Imagine SEM (1000 x)



b) Imagine macro

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 cavități)

În fig. 4.17 se prezintă profilograma unui segment din suprafața erodată, cu valorile celor trei parametri ai rugozității.

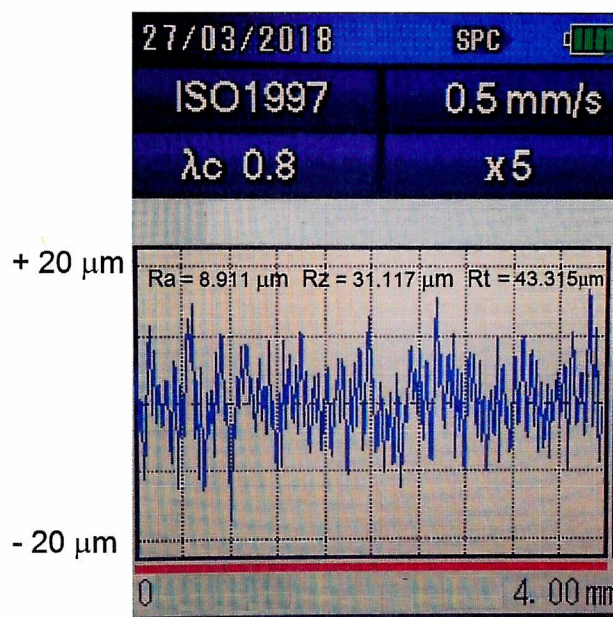


Fig.4.17 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație)
(exemplificare pentru o măsurătoare-**Proba 3**)

Aplicarea tratamentului termic de revenire la 250 °C se manifestă prin precipitarea din faza β suprasaturată a unor particule de fază α , cu formă aciculară, atât în interiorul grăunților cât și pe limitele dintre grăunți (fig.4.19 a), tensiunile interne se reduc, iar ciupiturile apărute în urma atacului cavitațional sunt ceva mai pregnante în zona limitelor dintre grăunți.(fig. 4.19 b).

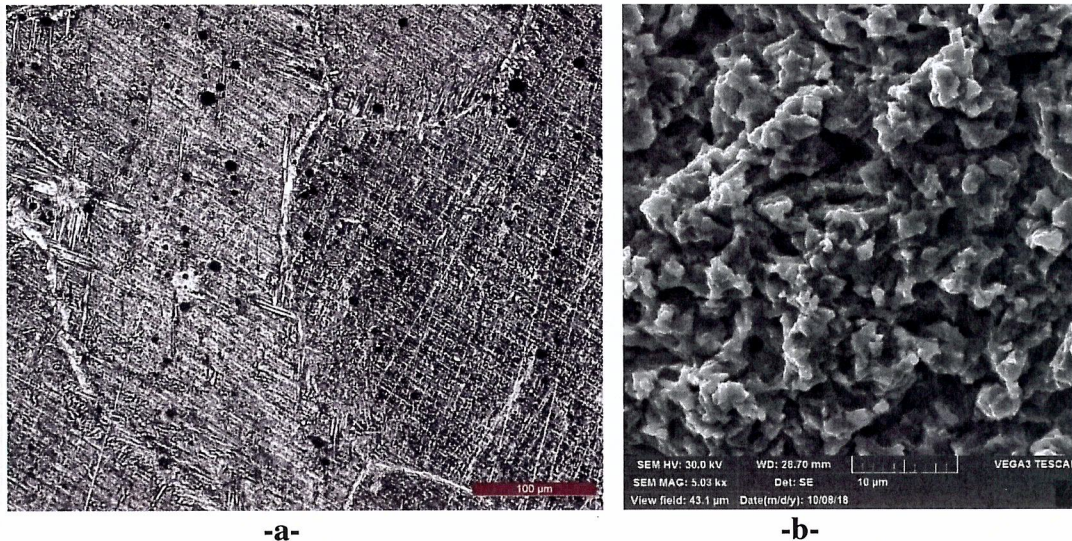


Fig.4.19 Imaginea microscopică (a) și imagini SEM (b), după 165 minute de expunere la cavitație

Calirea volumică de la 800 °C cu revenire la 400 °C

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), precum și prin valorile parametrilor MDE_{max} , $MDER_{max}$ și $MDER_s$.

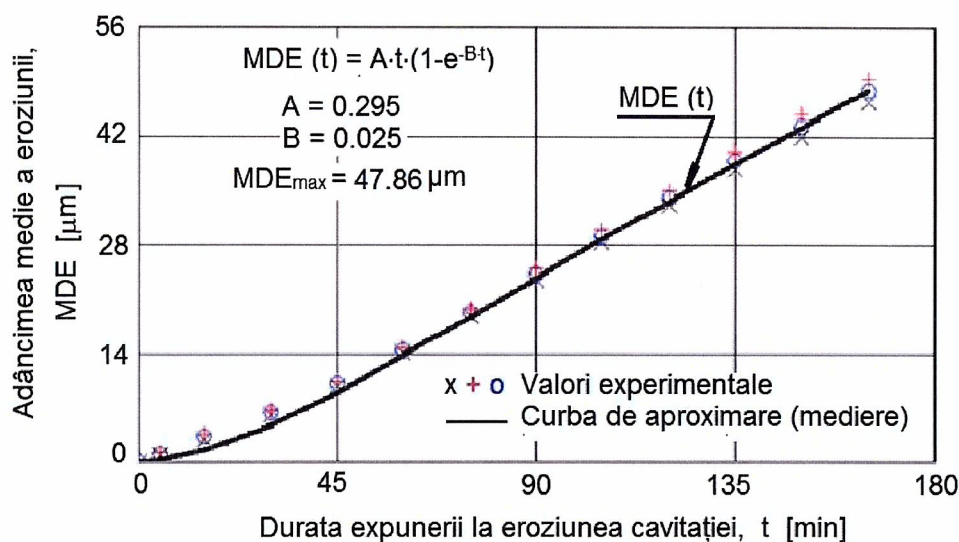


Fig.4.20 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitatiei

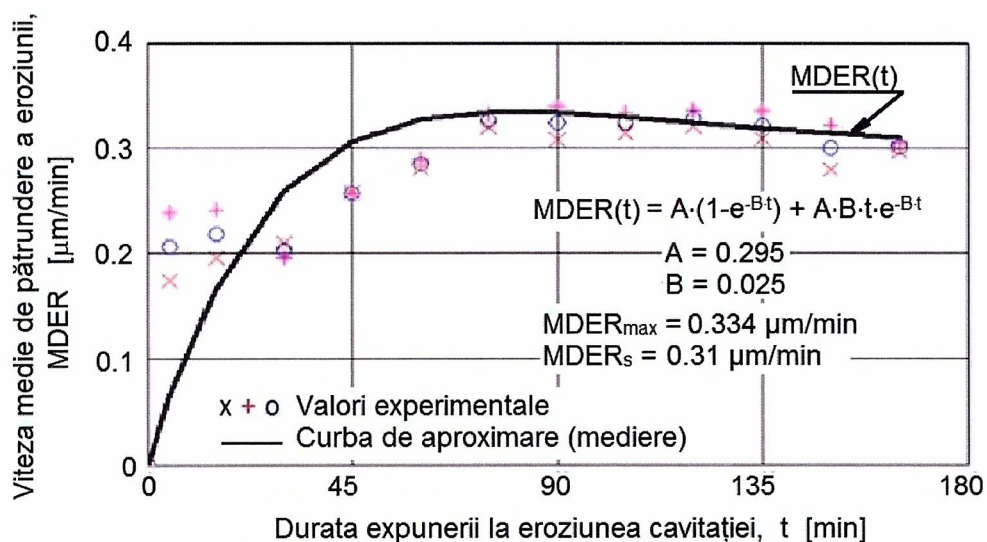


Fig.4.21 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitatiei

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

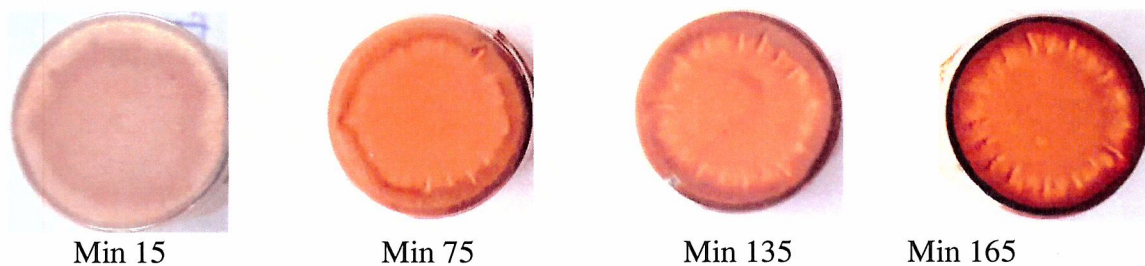


Fig.4.23 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitatiei (Proba 2)



Proba 1

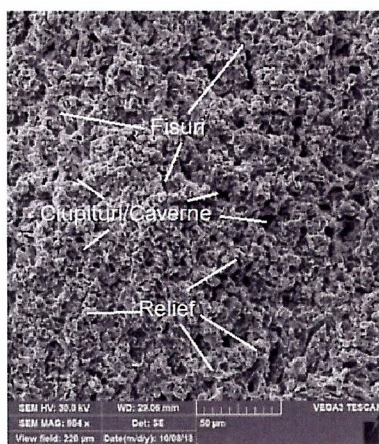


Proba 2

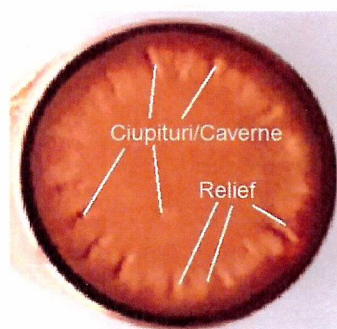


Proba 3

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



a) Imagine SEM (1000 x)



b) Imagine macro

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)

Profilograma din fig.4.26, cu salturi semnificative, 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.

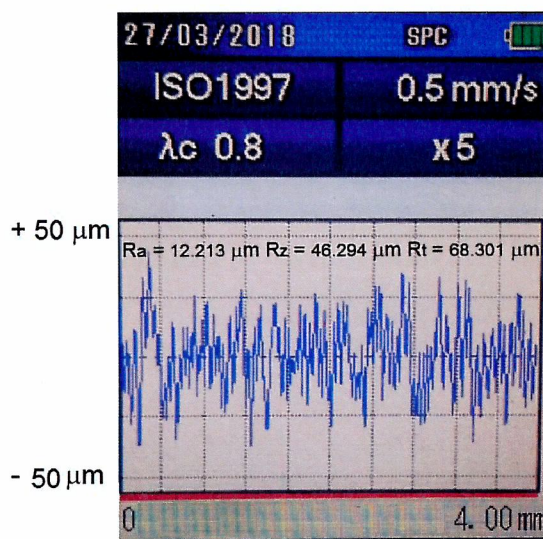


Fig.4.26 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație) (exemplificare pentru o măsurătoare –**Proba 3**)

Ridicarea temperaturii de revenire la 400 °C conduce la o accelerare a procesului de precipitare a fazei α din faza β și de coalescență a acestor particule îndeosebi în zona limitelor dintre grăunți (fig.4.28 a) cu consecințe asupra creșterii numărului de caverne care afectează suprafața materialului testat la eroziune prin cavitație (fig.4.28 b).

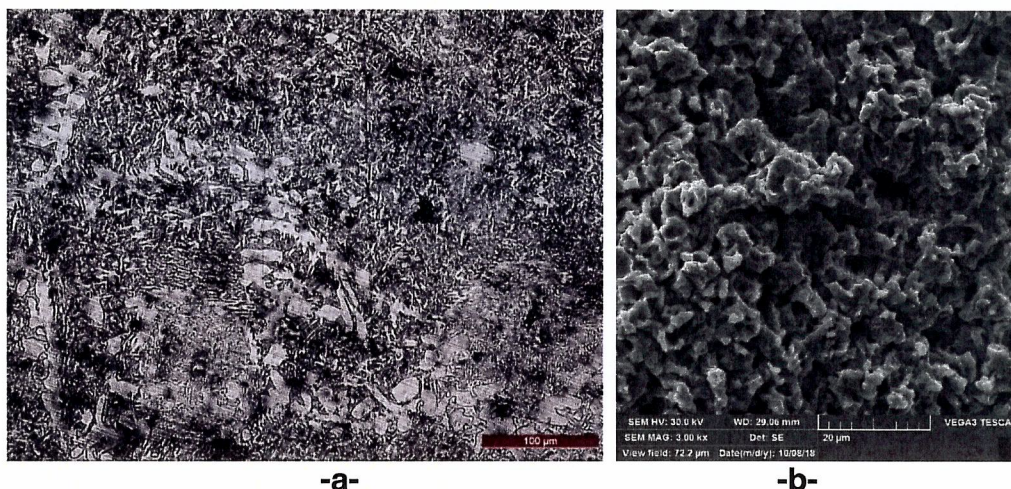


Fig.4.28 Imagini SEM și macroscopice obținute la microscopul electronic cu baleiaj, după 165 minute de expunere la cavitație

Calirea volumică de la 800 °C cu revenire la 600 °C

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).

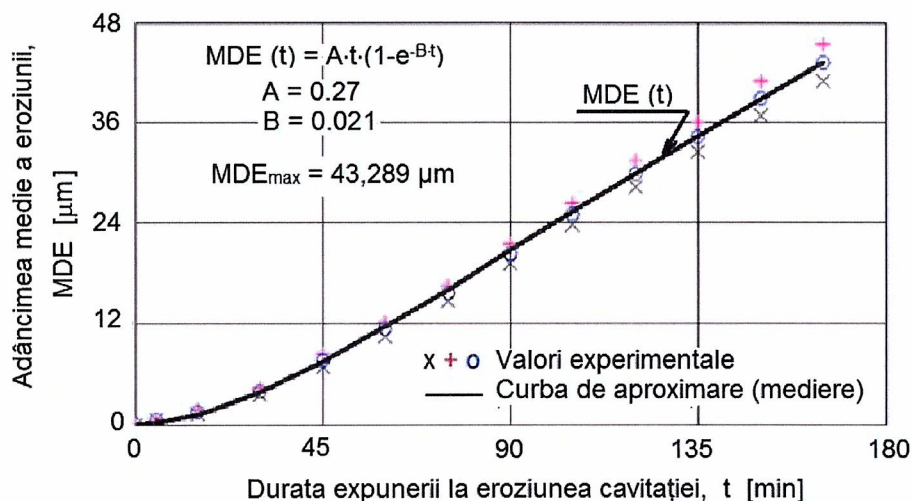


Fig.4.29 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

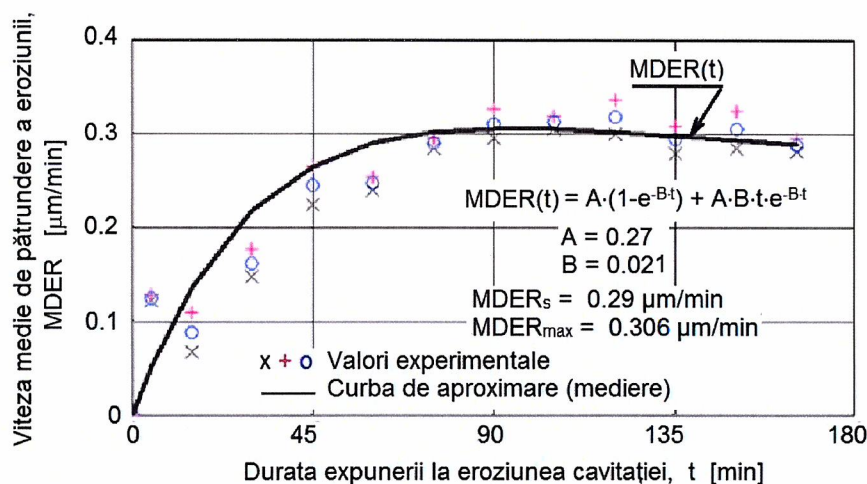


Fig.4.30 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

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.

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.

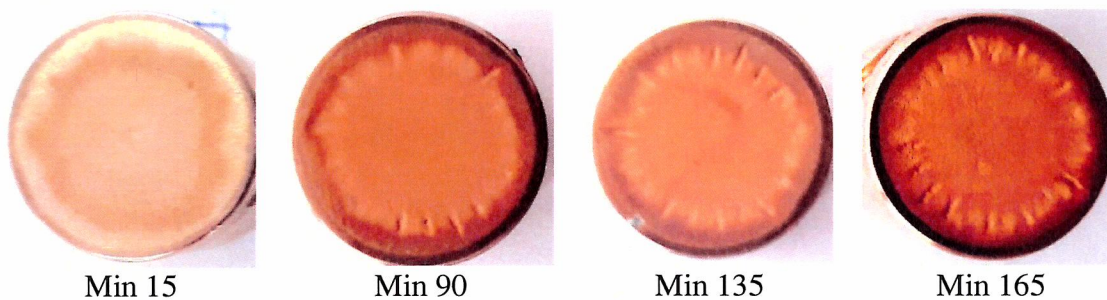
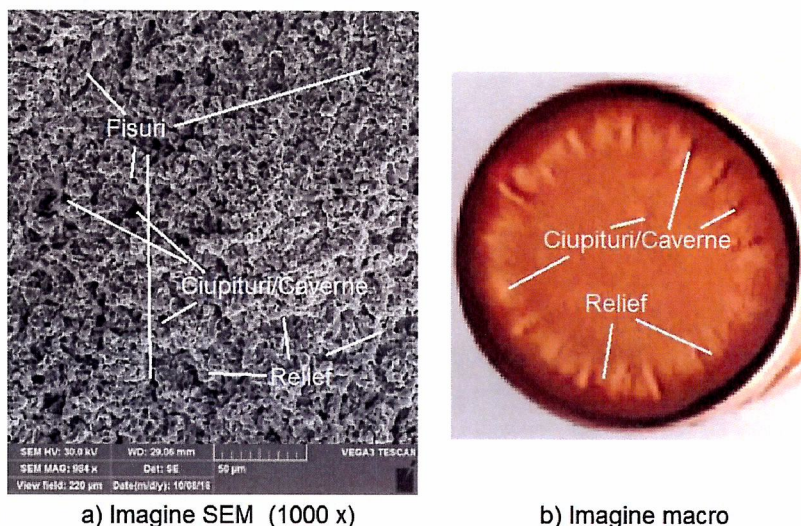


Fig.4.32 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 1)



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)

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

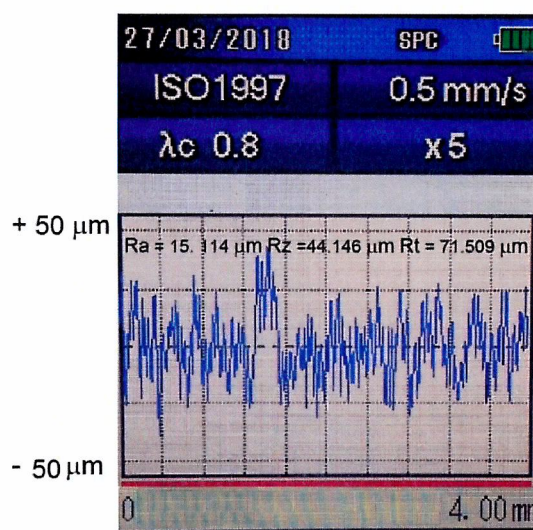


Fig.4.35 Valorile parametrilor rugozității (165 minute de expunere la cavitație)
(exemplificare pentru o măsurătoare-**Proba 1**)

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 α în faza β care provoacă o scădere ușoară a cantității de cristale de fază α , iar pe de altă parte, la o coalescență mai intensă a cristalelor mici, aciculare de α cu formare în principal de grăunți mai mari, poligonali Fig. 4.37 a). Imaginile topografiei suprafeței cavitate (fig. 4.37 b) concordă pe deplin cu rezultatele anterioare.



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

4.1.3 Compararea rezultatelor cercetării

În histograma din fig.4.42 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 (OH12NDL și CuNiAl I-RNR), din Laboratorul de cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

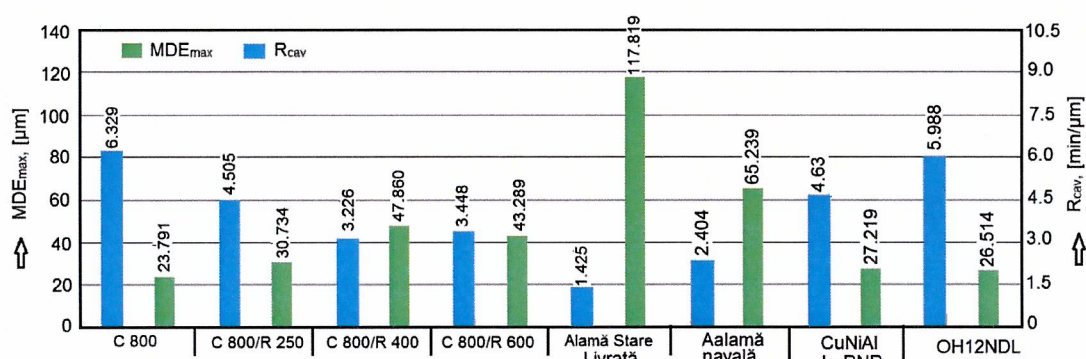


Fig.4.42 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

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.

4.2 Cercetarea rezistenței la cavitație a bronzului CuSn12-C

4.2.1 Tratamente termice volumice

În diagrama din fig. 4.43 este prezentat 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 800/R 500**.

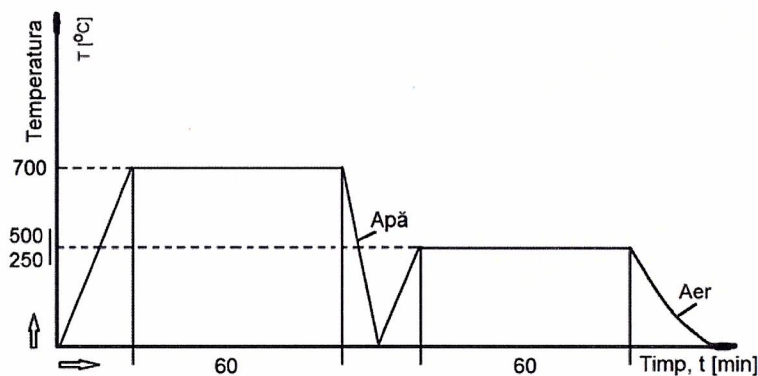


Fig.4.43 Ciclograma tratamentelor termice

4.2.1 Rezultatele cercetării la cavitație

Calirea volumică de la 700 °C

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.

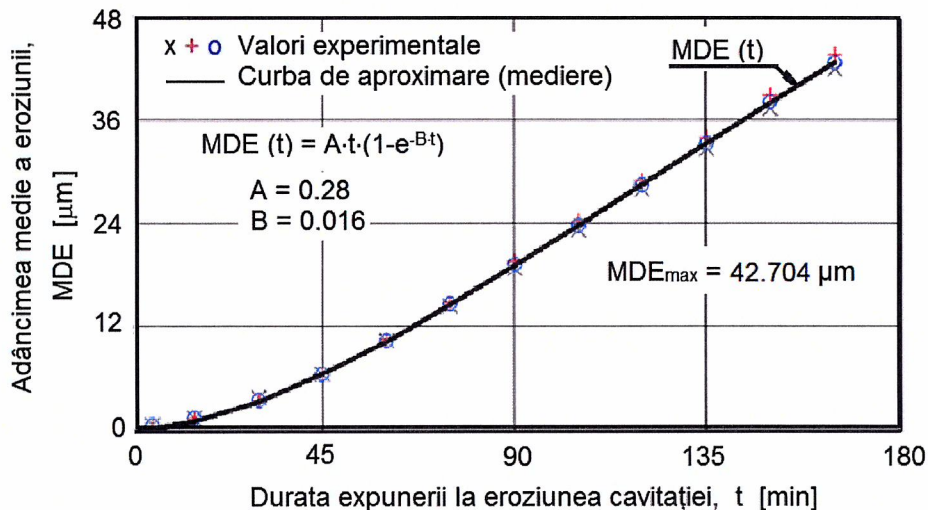


Fig.4.44 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitatiei

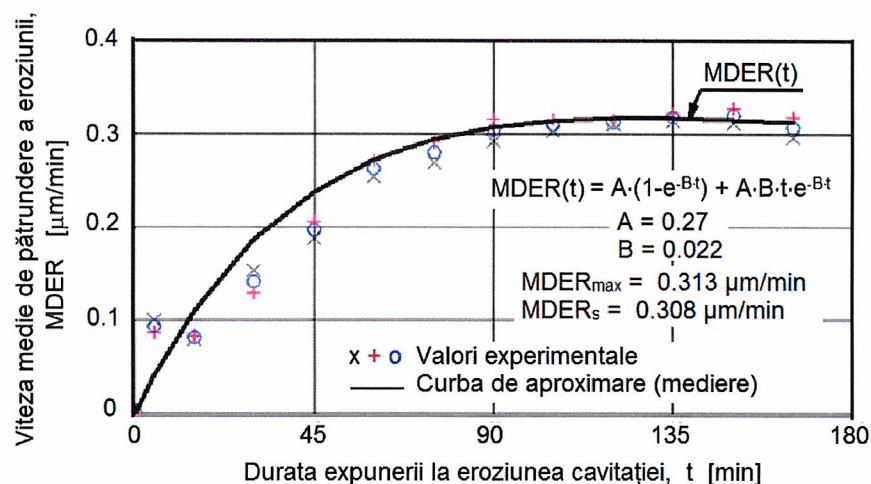


Fig.4.45 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

În fig. 4.47 și 4.48 sunt prezentate imagini fotografice ale extinderii eroziunii în aria suprafeței expuse.

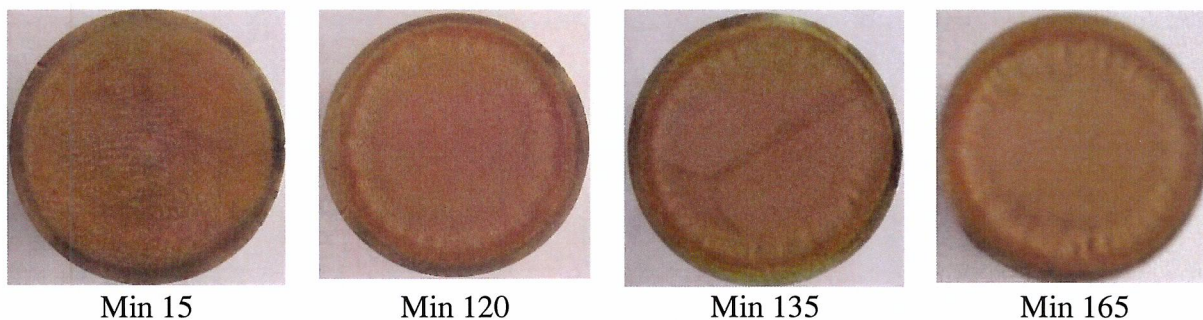


Fig.4.47 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (Proba 3)



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

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, la presiunile de impact cu microjeturile cavitaționale.

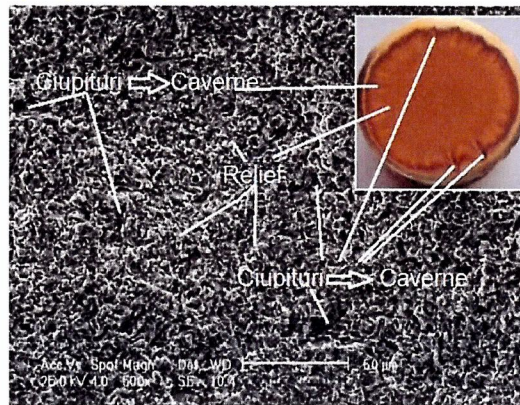


Fig.4.49 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) din suprafața expusă după 65 minute (macro) – **Proba 1**

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).

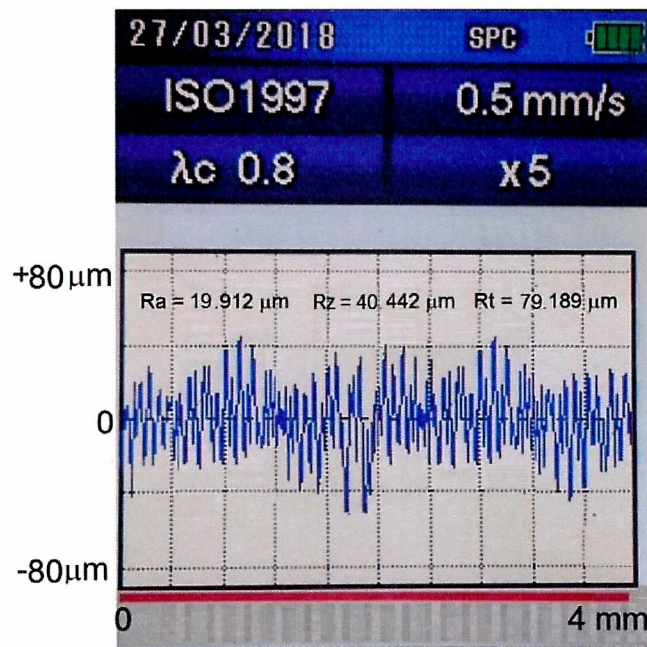


Fig. 4.50 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare - **Proba 3**)

Prin călire în apă până la temperatura camerei, fenomenele de difuzie fiind estompate, faza β devine suprasaturată, cu aspect apropiat de cel al martensitei din oțeluri, iar faza α nu suferă transformări (fig. 4.52 a).. Investigarea la microscopul electronic a suprafeței erodate prin cavitație (fig.4.52 b) arată că ruperea are un caracter ductil, iar limitele dintre grăunții de soluție solidă α (fază mai moale și plastică) reprezintă microzonele de inițiere și dezvoltare ulterioară a cavernelor de cavitație.

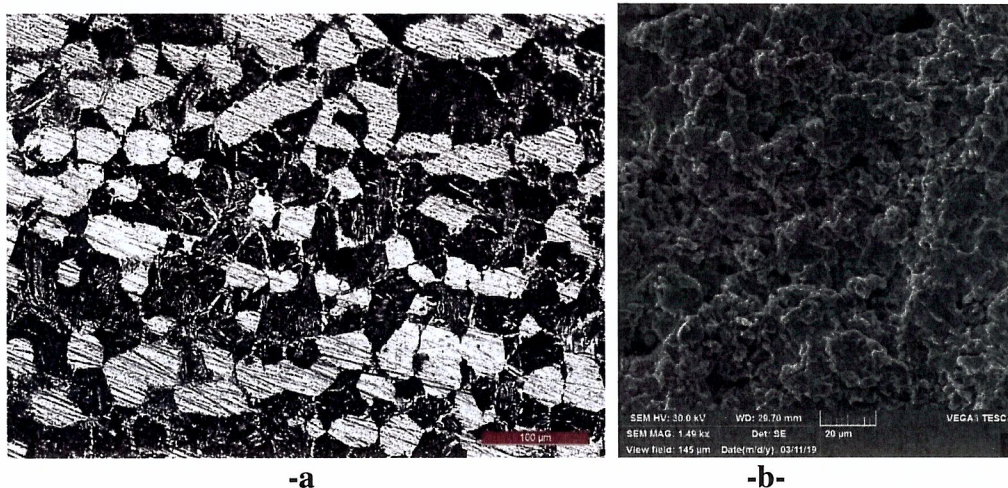


Fig.4.52 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b), după 165 minute de expunere la cavitație

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

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 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).

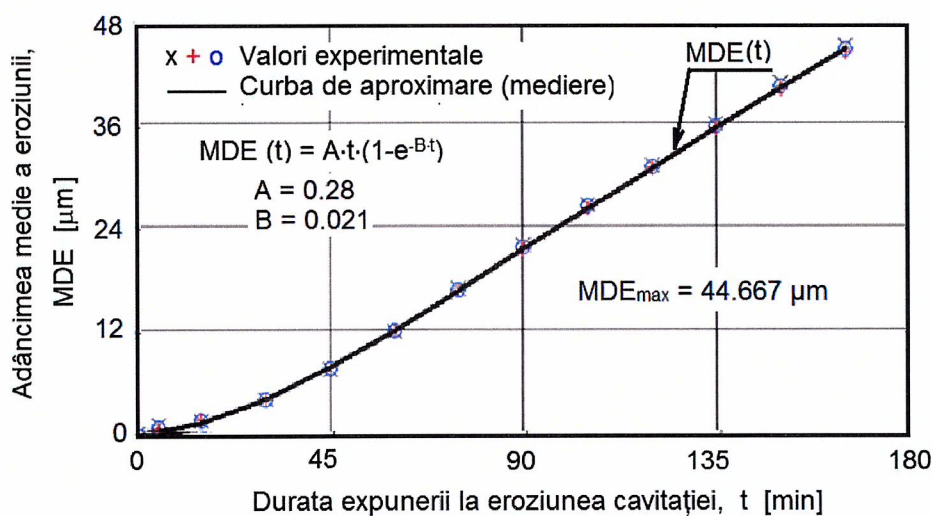


Fig.4.53 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației

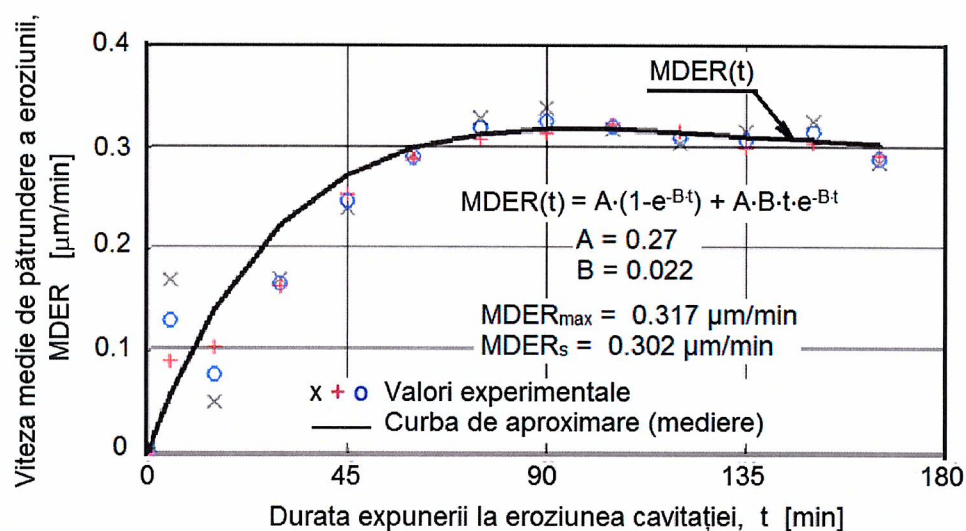


Fig.4.54 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

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.

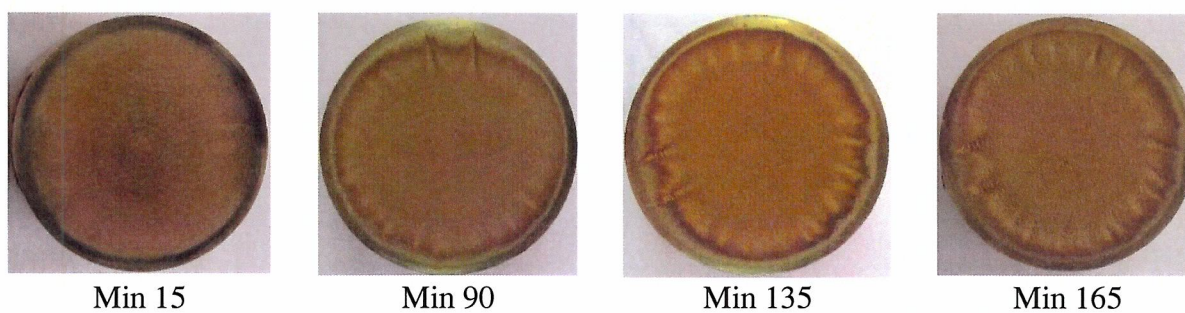


Fig.4.56 Evoluția suprafeței erodate cu durata cavitației (**Proba 2**)

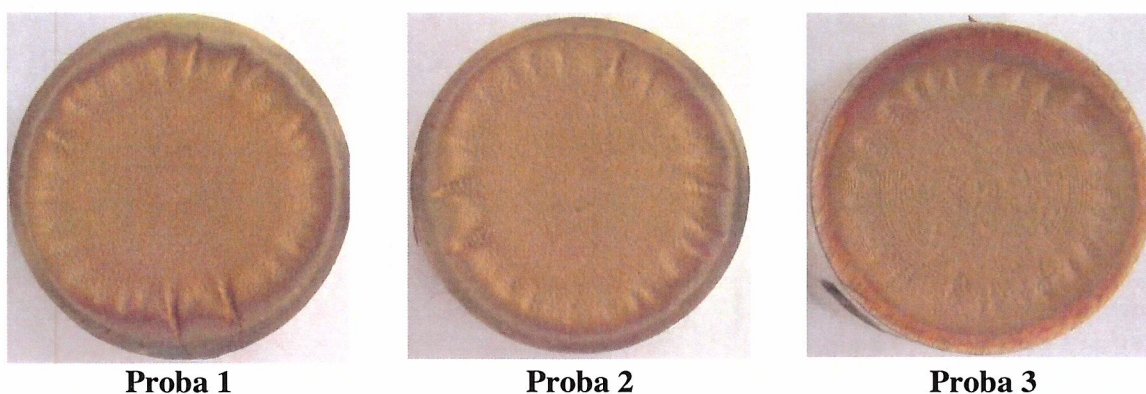


Fig.4.57 Imagini macro (înregistrări aparat Canon A 480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165

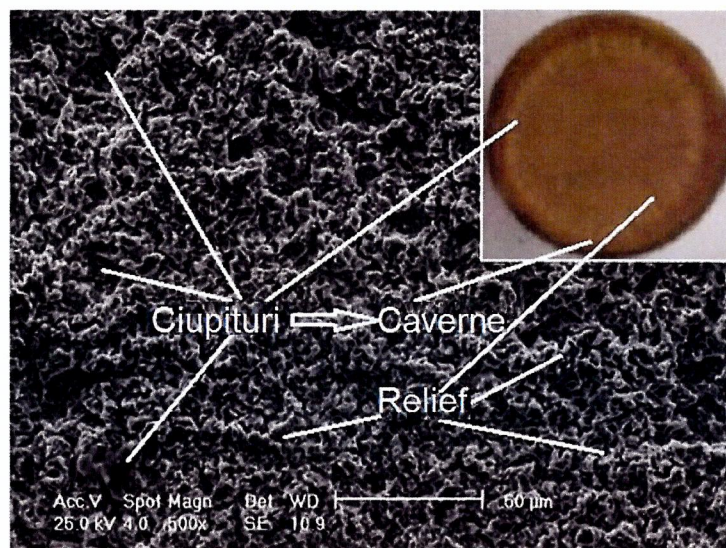


Fig.4.58 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 65 minute (macro) – **Proba 2**

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.

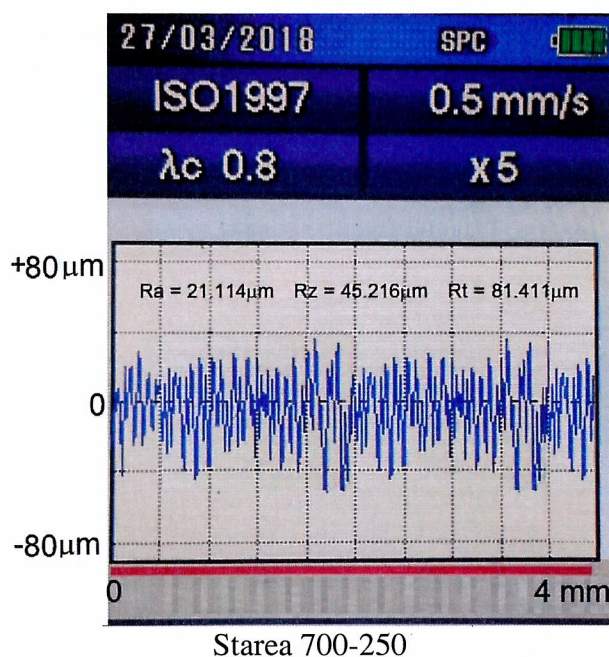


Fig. 4.59 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare – **Proba 2**)

Efectuarea tratamentului termic de revenire la 250°C, cu răcire lentă în aer, provoacă o ușoară detensionare termică a materialului și o declanșare a fenomenelor de precipitare a fazelor secundare (fig.4.61a). 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 °C (fig.4.61 bc).

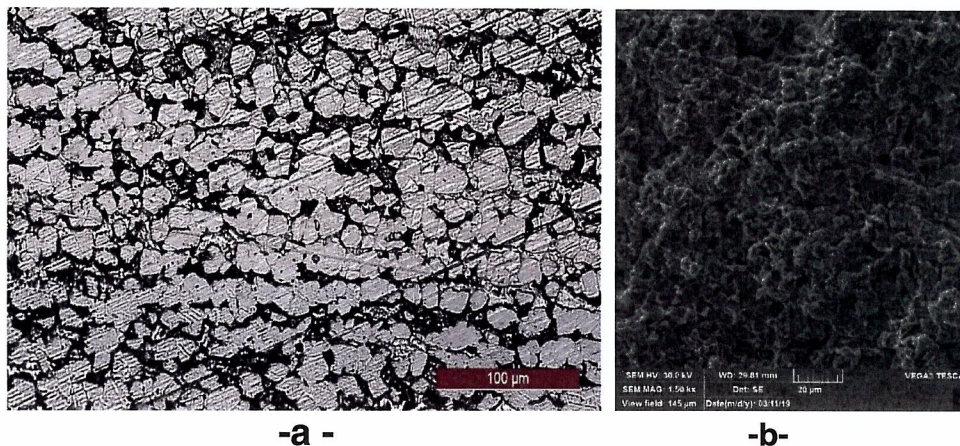


Fig.4.61 Imagine microscopică (a) şi imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație

Calirea volumică de la 700 °C cu revenire la 500 °C

În fig. 4.62 şi fig.4.63 sunt afişate valorile experimentale ale celor trei probe testate, precum şi curbele de mediere a acestora, construite analitic

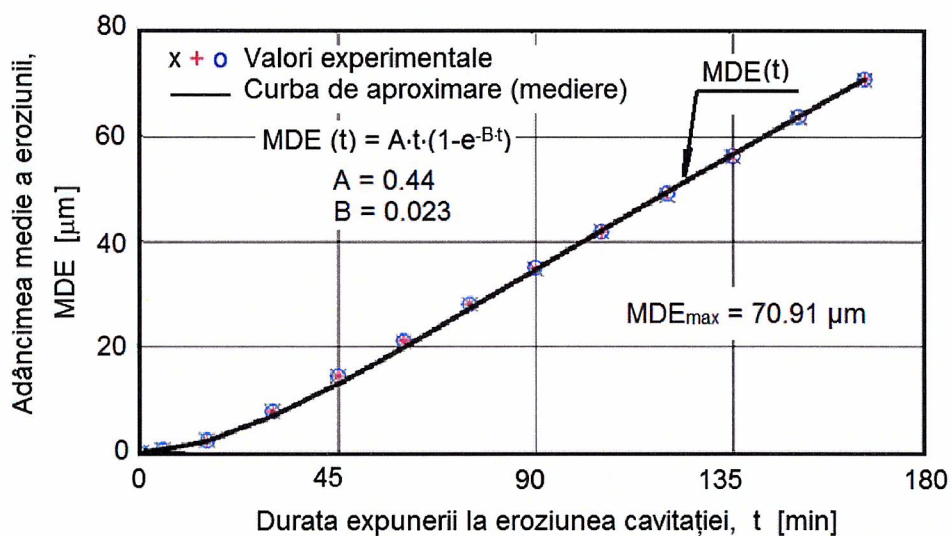


Fig.4.62 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata cavității

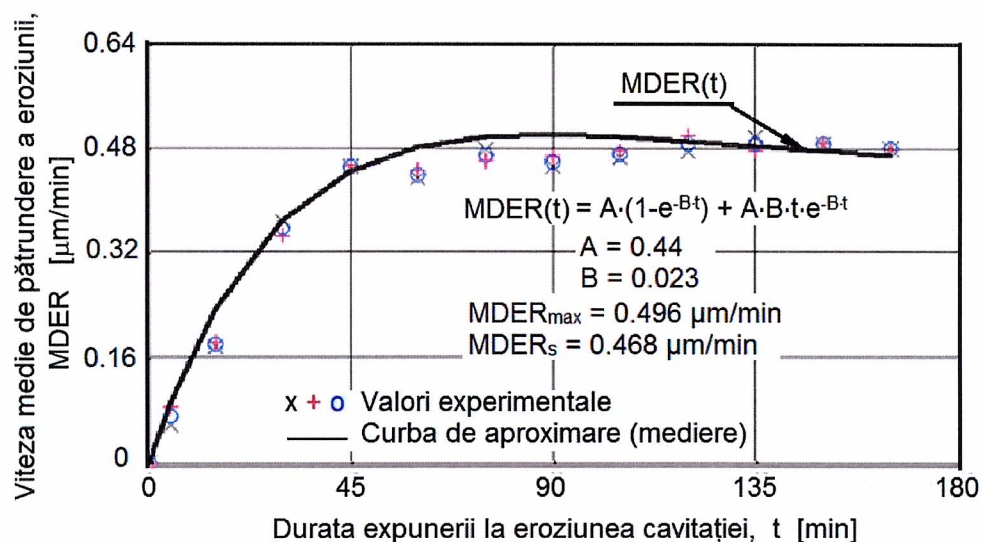


Fig.4.63 Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durată cavitației

Extinderea eroziunii cavitației în suprafața expusă, cu durată 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.

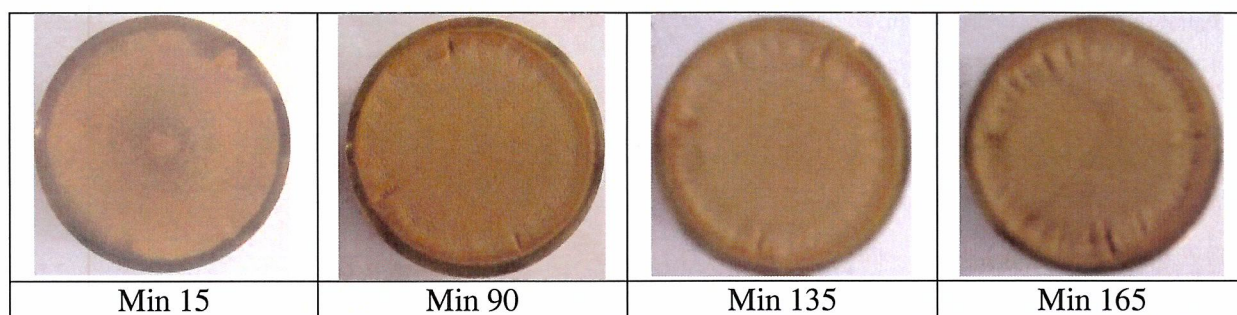


Fig.4.65 Evoluția suprafeței erodate cu durată cavitației (**Proba 2**)

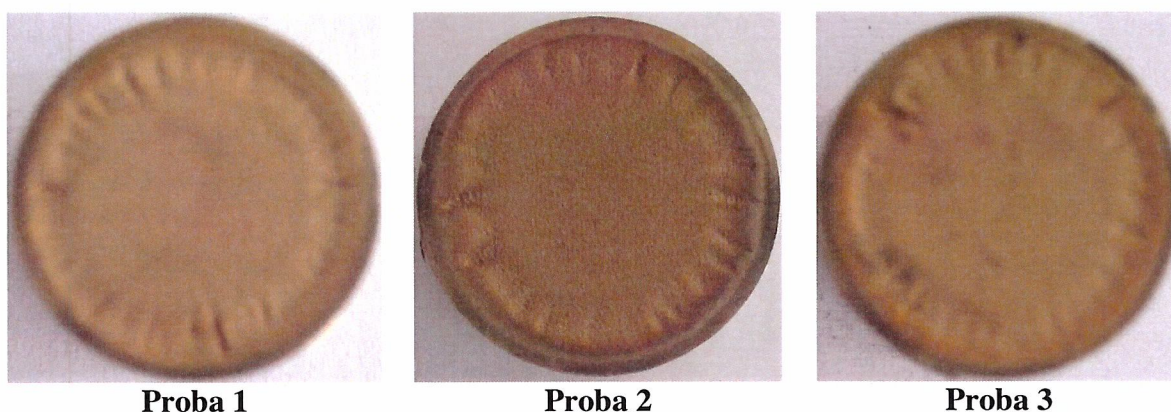


Fig.4.66 Imagini macroscopice (înregistrări aparat Canon A480) ale suprafețelor erodate prin cavitație vibratoare timp de 165

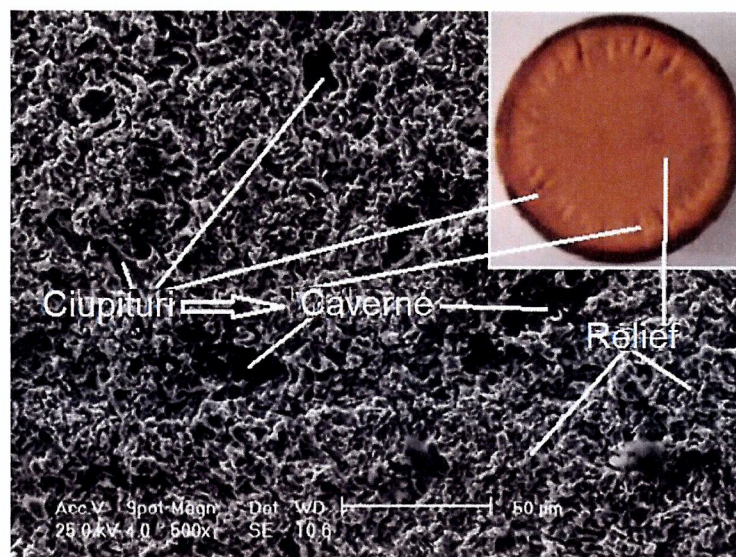


Fig.4.67 Imagine a structurii erodate (Micro-500x) și a suprafeței expuse după 165 minute (macro) – **Proba 1**

În fig.4.68 este prezentată 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.

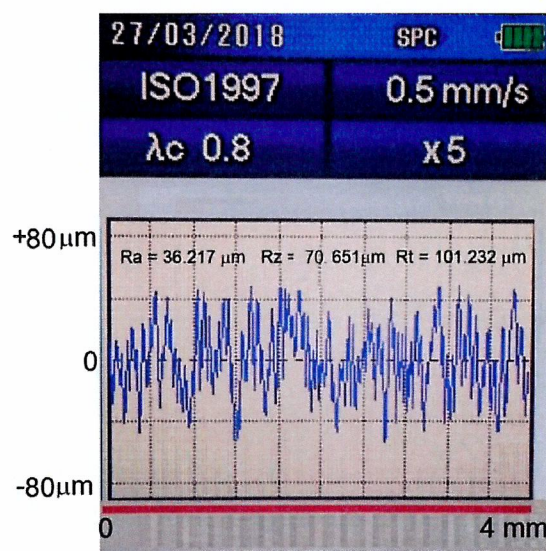


Fig.4.68 Valorile parametrilor rugozității (exemplificare pentru o măsurătoare – **Proba 2**)

Creșterea temperaturii de revenire la 500°C conduce la o mărire ușoară a dimensiunilor fazelor precipitate (fig. 4.70 a) și implicit la o scădere relativ mică a durității și rezistenței la cavitație. Cercetarea la 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 β și a coalescenței rețelei de fisuri dezvoltate cu precădere în zona limitelor dintre grăunți (fig.4.70 b).

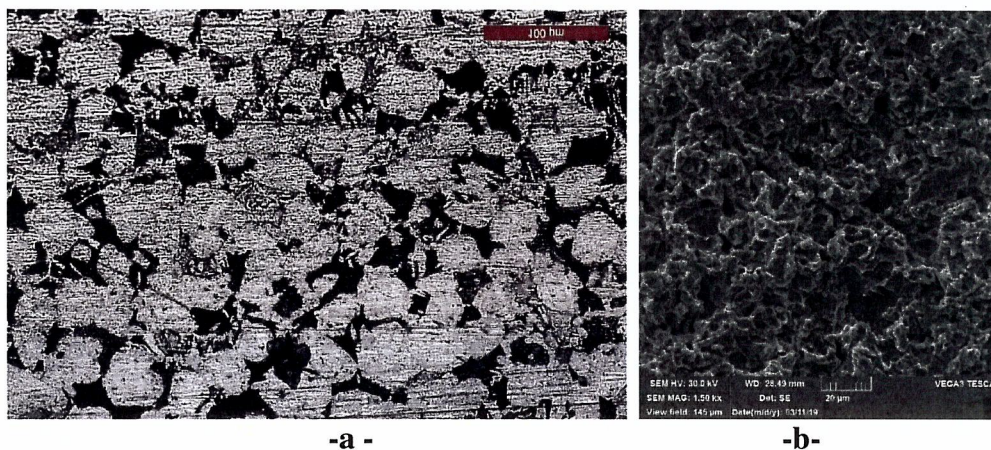


Fig.4.70 Imagine microscopică (a) și imagini SEM (b,c), după 165 minute de expunere la cavitație

4.2.3. Compararea rezultatelor cercetării

Evaluarea cantitativă a rezistenței conferite de cele trei regimuri, comparativ cu starea de livrare, este realizată în histrograma din fig.4.75.

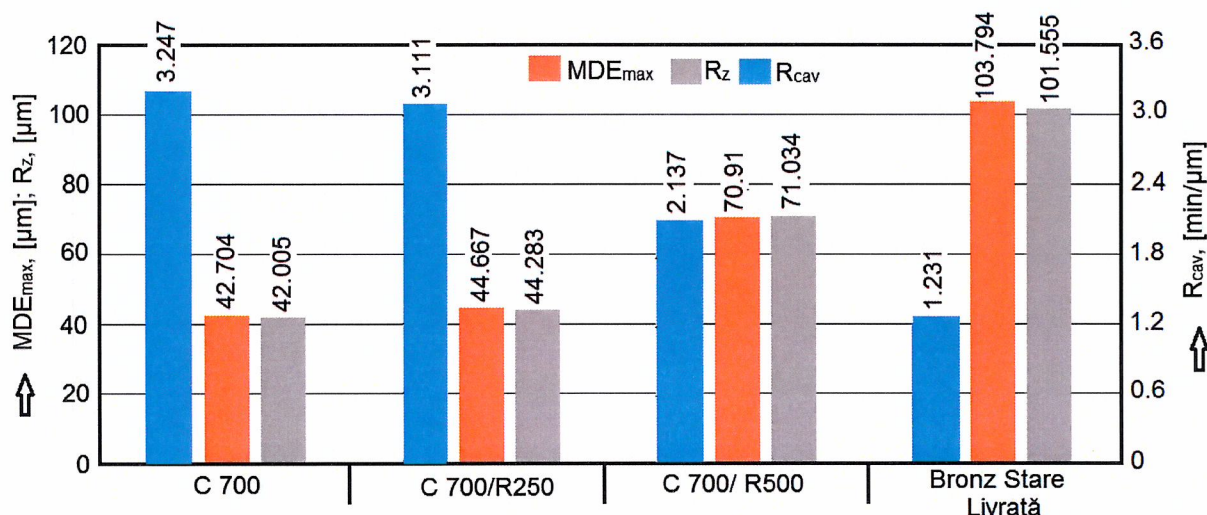


Fig.4.75 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

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.

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.

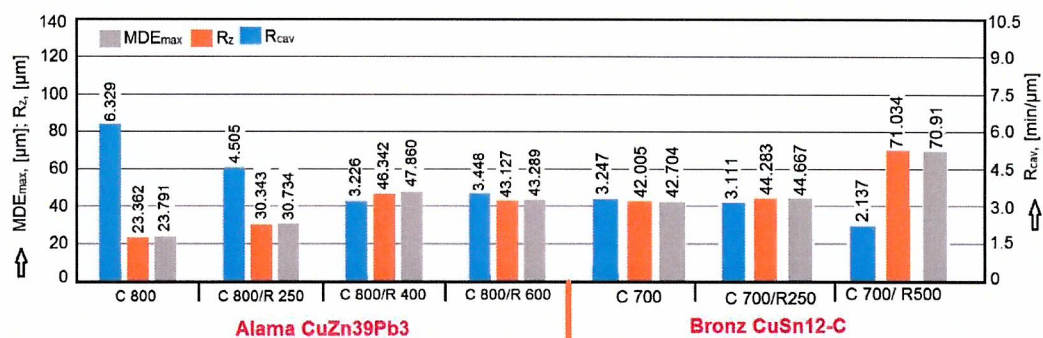


Fig.4.76 Comparații între parametrii specifici rezistenței alamei CuZn39Pb3, tratate termic și cei ai bronzului CuSn12-C trata termic

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.

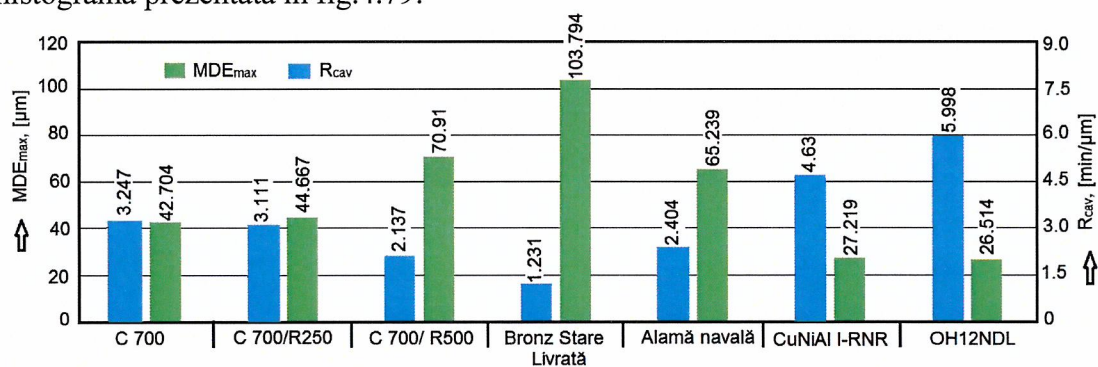


Fig.4.79 Histograma estimării rezistenței la eroziunea cavitației prin compararea valorilor parametrilor specifici

Din histogramă se observă valorile superioare ale adâncimii maxime de eroziune MDE_{max} și inferioare ale rezistenței la cavitație R_{cav}, față de ale bronzului naval CuNiAl I-RNR (MDE_{max} = 21.219 μm, R_{cav} = 4.63 min/μm) și ale oțelului inoxidabil OH12NDL (MDE_{max} = 26.514 μm, R_{cav} = 2.404 min/μm).

4.3 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.

- 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.
- Compararea cu starea de livrare confirmă că tratamentele termice volumice, rămân soluții de creștere a rezistenței la eroziunea prin cavitație.
- Analizele realizate prin comparație cu materialele etalon (oțelul inoxidabil OH12NDL, bronzul naval CuNiAl I-RNR și alama navală confirmă că bronzul CuSn-C, cu tratamente termice de călire sau călire + revenire, se poate folosi la piese ce lucrează în curenți cavitaționali cum sunt fittingurile, corpurile robinetilor și vanelor de pe conductele forțate, rotorii pompelor volumice și chiar la elicele vapoarelor de apă.

5. TEHNICI ȘI MATERIALE UTILIZATE ÎN ACOPERIREA SUPRAFEȚELOR PENTRU PROTECȚIE LA SOLICITĂRILE CAVITAȚIONALE

În ultima perioadă, amestecurile pe baza de polimeri încep să fie tot mai utilizate ca materiale, straturi de protecție și material 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 robinetilor, suprafețele interioare ale conductelor care produc distrugeri prin eroziune, etc) [1-4, 7]. 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 (cunoscute ca rășini polimerice sau polimeri modificați) depuse pe suprafața metalică a probelor cavitaționale realizate din bronz destinat pieselor solicitate la cavitație ca precum [9, 11, 7]: organe de închidere ale vanelor și robinetilor, elici de vapoare și inele de fixare din cadrul vanelor fluture.

5.1. Amestecuri polimerice modificate

Pentru cercetarea comportării polimerilor modificați la cavitația vibratoare s-au utilizat epruvete, fig.5.1, prelevate din bronzul studiat anterior (CuSn12).

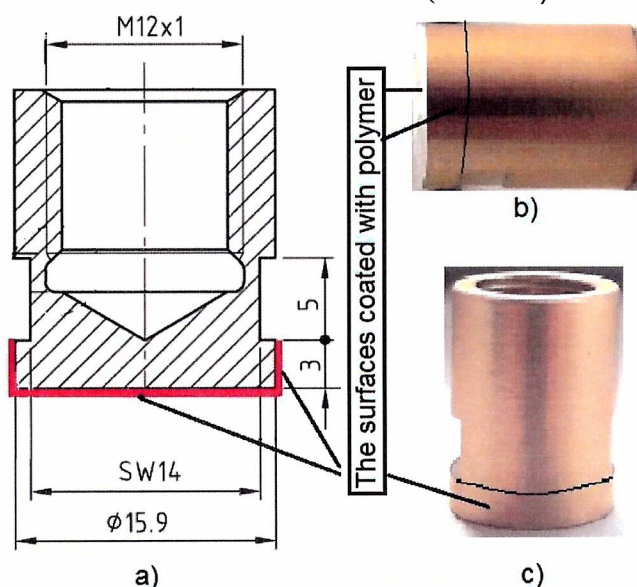


Fig. 5.1 Imaginea probei cavitaționale, în secțiune, cu indicarea suprafețelor acoperite cu pelicule de polimeri

a) - secțiune prin probă; b) și c) - proba reală

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

Rezultatele testului de comportare la cavitația vibratoare a amestecurilor

În imaginile de mai jos sunt prezentate modurile de comportare la solicitările generate de cavitația vibratoare.

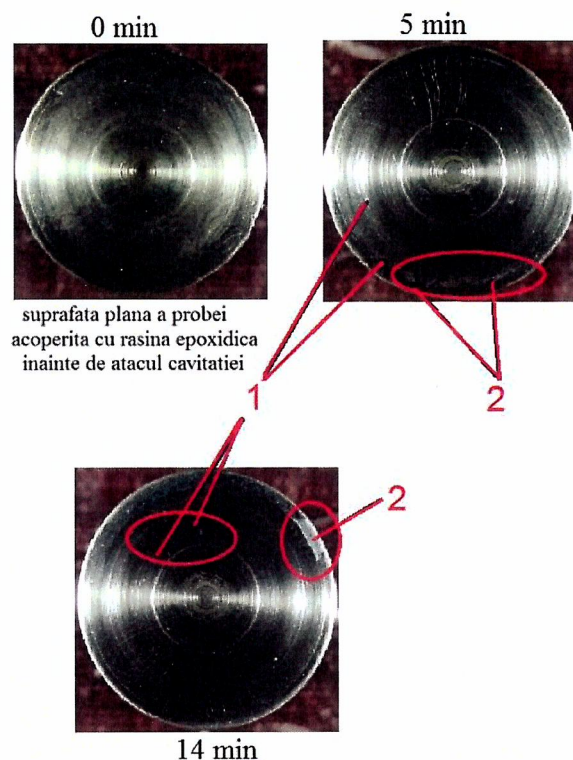


Fig.5.17 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 1 depuse pe suprafața plană a probei 1.1
1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în pelicula de polimer

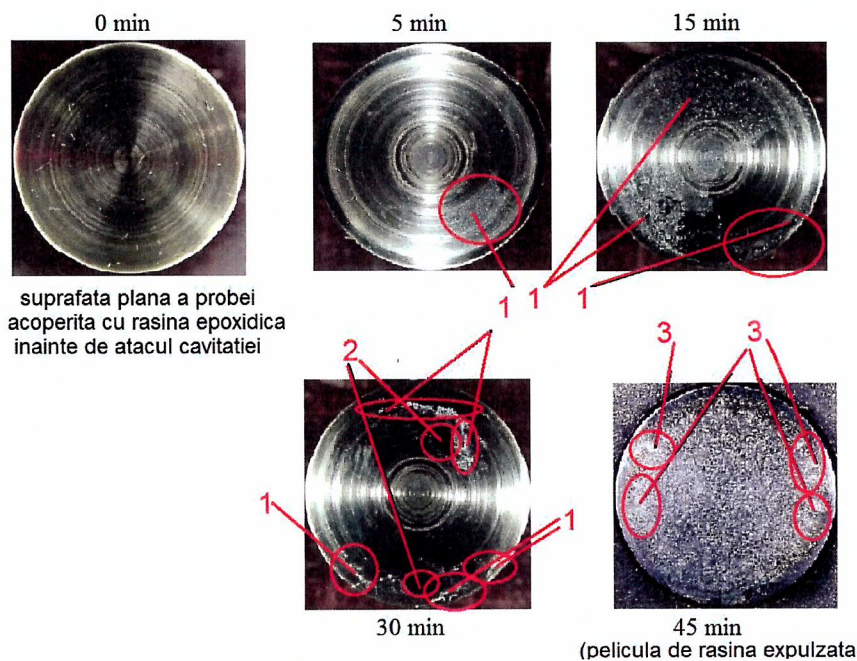


Fig.5.20 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 2 depuse pe suprafața plană a probelor 2.2
1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

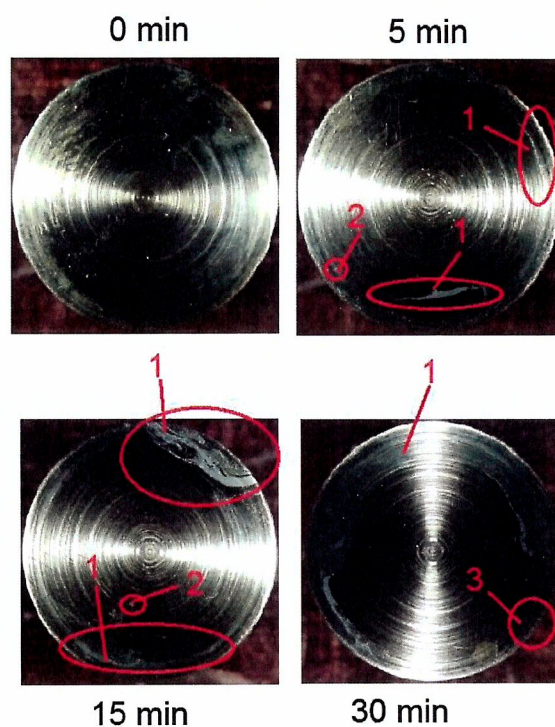


Fig.5.21 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 3
 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

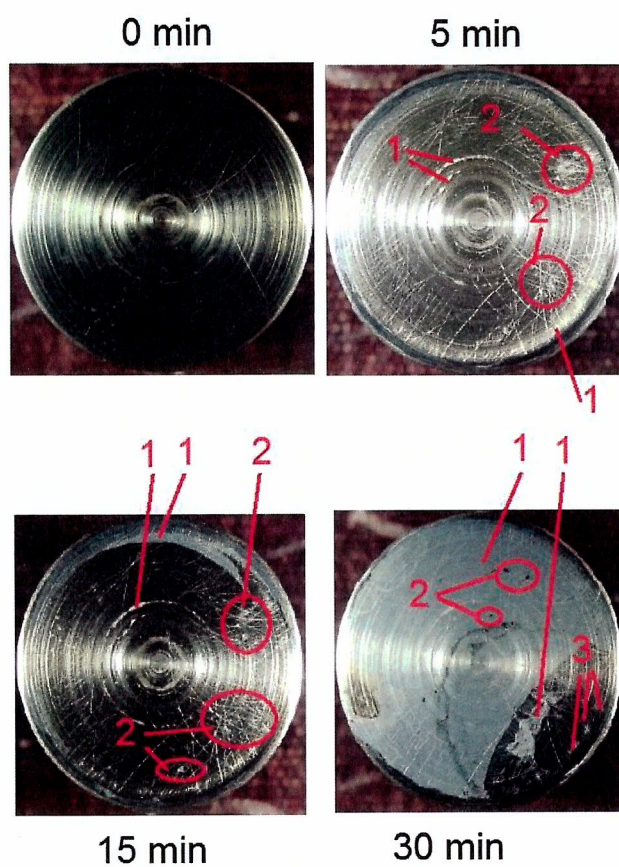


Fig.5.22 Evoluțiile comportării la cavitația vibratoare a straturilor de amestec de tip 4
 1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

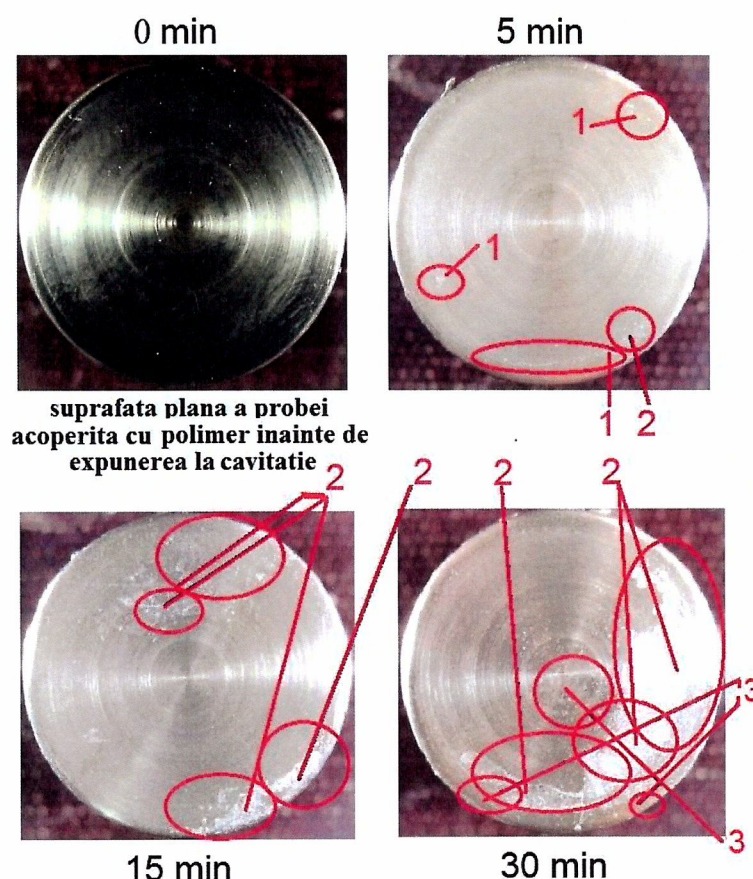


Fig.5.24 Evoluția comportării la cavitația vibratoare a stratului de amestec de tip 5 depus pe proba 5.1
1- apă și bule între pelicula polimerică și suprafața metalică a probei de cavitație; 2-perforări în peliculă; 3- eroziuni (caverne și pittinguri) în suprafața metalică

Concluzii

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

4. Analiza rezultatelor cercetării, sugerează continuarea investigațiilor în vederea găsirii soluției prin care rășinile 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 solicate la cavitație, a căror reparație costă timp și bani.

5. II. Straturi cu bază de cupru depuse prin pulverizare termică HVOF

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 [25], față de alte procedee aplicate în scopuri similare (scufundare în metal topit, difuzie, placare, acoperiri galvanice)

Pentru cercetarea experimentală au fost utilizate 4 tipuri de pulberi cu bază de cupru, ale caror compoziții chimice și densități sunt prezentate în tabelul 5.1.

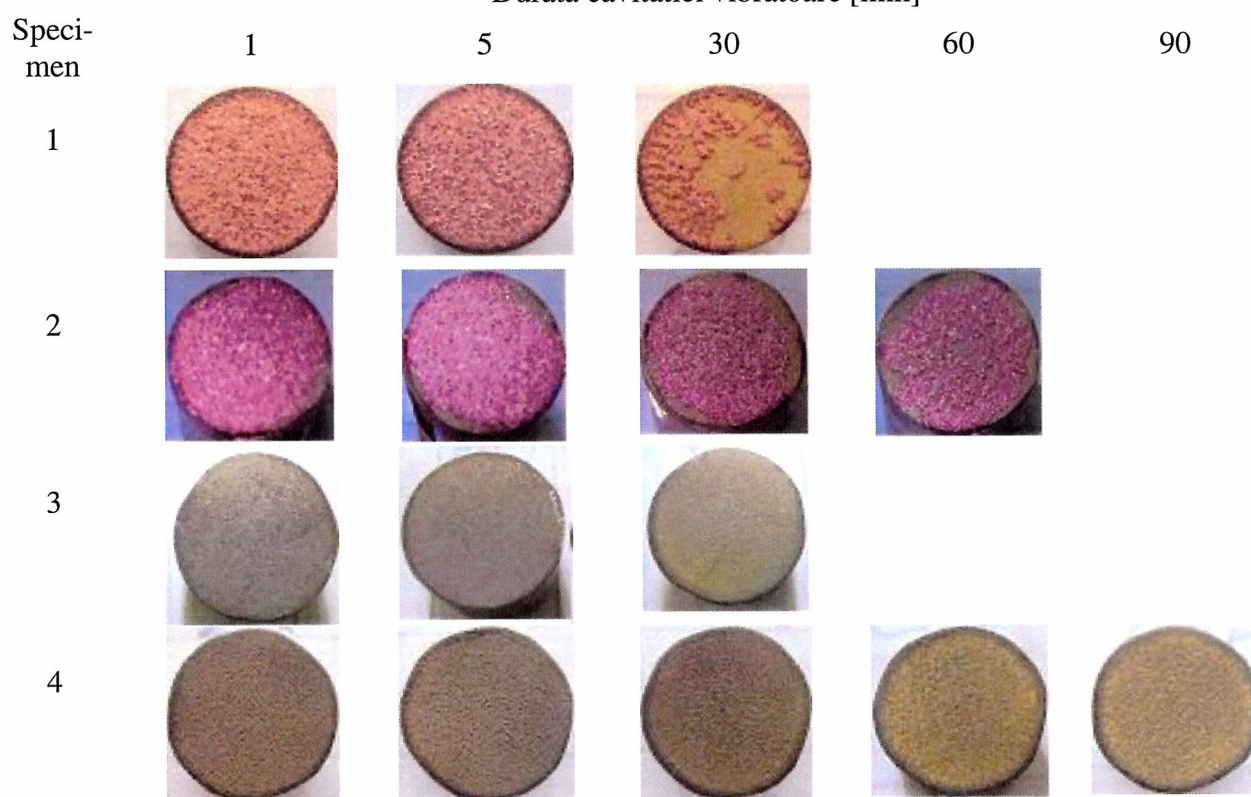
Acestea au fost depuse pe suprafețele circulare ale specimenelor de cavitație, realizate din oțel carbon 270-480 W Sr ISO 13755:1995.

Tabelul 5.1. Compozitia chimica a pulberilor utilizate

Specimen	Elemente componente [% masă]										ρ [g/cm ³]
	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

In tabelul 5.2 sunt prezentate imagini cu modul de degradare a suprafeței acoperite la diverse durate de cavitație.

Tabel 5.2 Imagini macro ale degradării stratului depus
Durata cavitatiei vibratoare [min]



In fig.5.34 este data evolutia pierderilor volumice, care, datorita grosimilor aproximativ identice ($\cong 0.8$ mm), sunt o indicatie procentuala a expulzarii stratului din suprafata expusa cavitatiei, al carei diametru este de 15.8 mm. Ca o imagine a rezistentei conferite de aceste straturi, in figura este redată si pierderea volumică a oțelului de bază 270-480 W.

In fig.5.34 este data evolutia pierderilor volumice, care, datorita grosimilor aproximativ identice ($\cong 0.8$ mm), sunt o indicatie procentuala a expulzarii stratului din suprafata expusa cavitatiei.

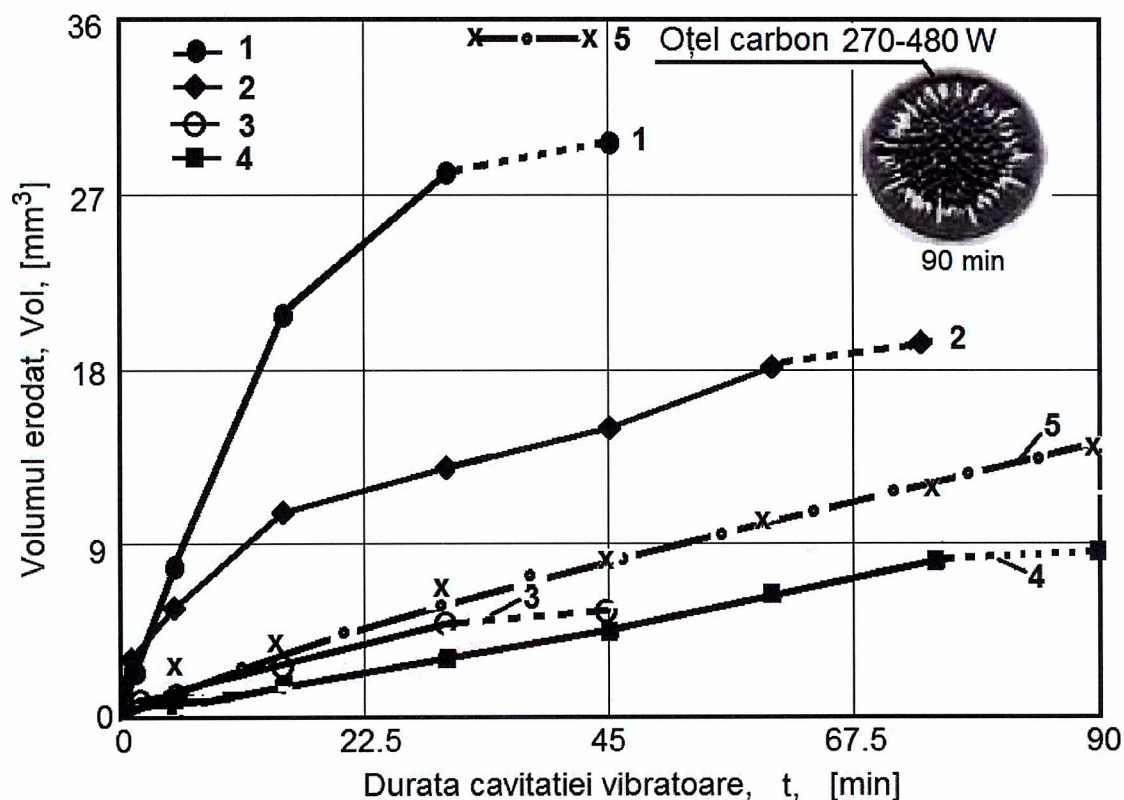


Fig.5.34 Evoluția pierderilor volumice și a degradării prin cavitația vibratoare a straturilor depuse prin pulverizare termică

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).

Compararea rezistenței celor 4 straturi, cu a oțelului 270-480 W Sr ISO 13755:1995, este dovada că, prin utilizarea unor parametrii adecvați ai procesului de realizare a rășinilor polimerice, 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.

6. Concluzii finale și contribuții originale. Perspective noi de cercetare (selecție)

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 mecanismului 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 cavității sunt total diferiți;

– pentru evaluarea comportării materialelor la eroziunea cavității este indicat să se folosească curbele specifice, parametrii caracteristici și microfotografiilor suprafețelor degradate, realizate la durate intermediare și de final ale atacului cavității;

Contribuții personale și originale

- ampla documentare, care a permis cunoașterea modului de manifestare a mecanismului mecanic al eroziunii prin cavitație și crearea bagajului de cunoaștere necesar explicării, prin comparație cu rezultatele din literatură, a comportării și rezistenței la eroziunea cavității a celor două aliaje cu bază de cupru, în stări liovrate 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;

Perspectivă noi de cercetare

– 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 cavității generată prin vibrație;

- oportunități de îmbunătățire a rezistenței la cavitație a aliajelor de cupru prin procedee de sudare și acoperiri cu diverse pulberi;

- cercetarea tipurilor de bronzuri și alame folosite la elicele vapoarelor de apă dulce;

- continuarea studiului altor tipuri de rasini polimerice și altor tehnologii care să asigure creșterea gradului de aderare la suprafața atacată expusă cavității.

Concluzia finală este că lucrarea de doctorat este una interdisciplinară (Inginerie mecanică – Ingineria materialelor) care se înscrie în tendința actuală a cercetărilor, de a găsi soluții noi de creștere a duratei de viață a echipamentelor care sunt supuse solicitărilor mecanice generate prin cavitație.

Bibliografie-selectivă

1. Anton I., Cavitatea, Vol I, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1984
2. Anton I., Cavitatea, Vol II, Editura Academiei RSR, Bucuresti, 1985
3. Bordeasu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
4. Bordeasu I., Teză de doctorat: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, 1997
5. Bordeasu, I., Oanca, O., Considerations Regarding the Cavitation Damage Process on Bronze and Brass Used in the Marine Screw Manufacture, Machine Design, Vol.3(2011) No.4, ISSN 1821-1259 pp. 277-280, 2011
6. Bordeasu, I., Anton, M.I., Correlation Between Cavitation Rate with Both Parameters of the 6. Vibratory Apparatus and the Physico-mechanical Properties of the Material, Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, 7-10 April, France, p. 199-202, 1998
7. Bordeasu I., ș.a., An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves, Scientific Bulletin "Politehnica" University of Timișoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), ISSN:1224-6077, Timișoara, p.253-258, 2004
8. Breslin, J.P., Andersen P., Hydrodynamics of ship propellers, 3, Editor Cambridge University Press: United Kingdom, 2003
9. Brooks J. W. Thèse de doctorat (Ph. D.). Université de Birmingham, 1987
10. Carlton, J., Marine propellers and Propulsion, Elsevier Ltd: Oxford, 2007

11. Franc J P, Kueny J L, Karimi A, Fruman D H, Fréchou D, Briançon-Marjollet L, Yves Billard J Y, Belahadji B, Avellan F and Michel J. M., *La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels*, Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995
12. Garcia R., Hammitt F. G., Nystrom R.E., Correlation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1960
13. Geru N., s.a., Analiza structurii materialelor metalice, Editura Tehnică, București, 1991
14. Geru, N., Metalurgie fizică, Editura didactică și pedagogică, București, 1981
15. Hobbs J.M., Experience with a 20 – KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960
16. Hobbs J.M., Vibratory cavitation erosion testing at nel, Confernce Machynery Groop, Edinburgh, 1974
17. 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
18. 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
19. 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
20. Meigh, H.J., Cast and wrought aluminum bronzes properties, processes and structure, Cambridge: IOM Communications Ltd, University Press, 2000
21. Mitelea I., - Studiul metalelor, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timisoara, 1983
22. Mitelea I 2009 *Materiale inginerești*, Editura Politehnica, Timișoara, Romania
23. Okada, T., Iwai, Z., Hattori, s., Tanimura, N., Relation between impact load and the damage produced by cavitation bubble collapse, Wear 184, 1995, p.231-239
24. Popoviciu M., Bordeasu I., A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Vol II, Timișoara, 1994
25. Popoviciu O.M., Bordeasu I., Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice, Editura Politehnica, Timișoara, 1998
26. Steller J. K., International cavitation erosion test – test facilities and experimental results, 2 – emes Journees Cavitation, Paris, March, 1992.
27. Thiruvengadam A., Preiser H. S., - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 – 3, 1963.
28. ***Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32, 2010
29. ***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,
30. ***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
31. *** <http://www.uni-duisburg.de/FB7/IST/links/Klassif.html>], Uni-Duisburg FB IST: Liste der Klassifikationsgesellschaften und Organisationen
32. *** http://www.ampcometal.com/common/datasheets/us/A45_EX_E_US.pdf
33. *** http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/AM4_EX_E.pdf
34. ***www.sulzer.com/as/-/media/.../TS_MaterialGuide_EN_052012.pdf, Thermal Spray Materials Guide
35. [https://copperalliance.ro/despre-cupru/cupru-si-aliaje-de-cupru/aliaje/..](https://copperalliance.ro/despre-cupru/cupru-si-aliaje-de-cupru/aliaje/)
36. <http://www.scribub.com/stiinta/chimie/Utilizarea-metalelor-si-a-alia1621615721.php>
37. Registrul Naval Roman, Reguli pentru clasificarea si constructia navelor maritime, 1995.
38. <https://www.inspection-for-industry.com/pump-net-positive-suction-head-test.html>
39. <https://jacpump.wordpress.com/2011/04/17/solving-a-cavitation-problem>
40. <https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=xSvoW7jRKsX9kwW3p6WIAg&q=cavitation+empeller&oq=cavitation+empeller>
41. <https://www.ogorul.ro/p/pompa-de-transvazare-din-bronz-debit-33-litriminut-tp200>
42. <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->

43. <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/>
44. <https://ispshop.ro/collections/pompe/products/pompa-n20-tellarini?variant=37523734607>
45. <https://www.inspection-for-industry.com/pump-net-positive-suction-head-test.html>
46. <http://www.lnt-hydraulics.com/hydraulic-products/radial-piston-pumps/>
47. <http://www.directindustry.com/prod/spitznas/product-190535-1872759.html>
48. https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=913&tbm=isch&sa=1&ei=cS3oW_zHIsekwXzo rQY&q=vane+bronz&oq=vane+bronz&gs_l
49. Lazar, 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 ICAS2018, May 9-11, Banja Luka, Bosnia Hertegovina, 2018
50. [http://www.sim.tuiasi.ro/wp-content/uploads/Carcea-Aliaje-Neferoase-de-turnatorie1.pdf,- Carcea, I., Gherghe, M., Aliaje Neferoase De Turnătorie]
51. https://www.google.ro/search?biw=1280&bih=864&tbm=isch&sa=1&ei=G7f6W_qtF5CakwWH iqXADQ&q=tin+bronz+microstructure&oq=bronz+microstructure&gs_l=img.1.1.0i19j0i5i30i19l4.11445.17645..20508..0.0.0.85.1433.21.....1....1..gws-wiz-img.....0j35i39j0i67j0i30j0i8i30i19.F8pu5W7Eo2w
52. Ghera, C., Rolul tratamentelor duplex în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor pentru aparatura sistemelor hidraulice, Teza de doctorat, Timisoara, 2017
53. Salcianu, L., Curgerea în vanele fluture și eroziunea prin cavitație a componentelor din oțeluri inoxidabile austenitice Teza de doctorat, Timisoara, 2017
54. Oanca O., Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale, *Teza de doctorat*, Timișoara, 2014
55. *** <http://www.kleinmetals.ch/shop/Datenblatt/E/631.pdf>
56. Küçükömeroğlu T and Kara L 2014 The friction and wear properties of CuZn39Pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions, *Wear*, 309, pp 21–28
57. <https://www.rna.ro/Legislatie/SCTN/Norme%20ANR%20scanate/2-1Inspectarea%20si%20repararea%20elicelor.pdf> 20
58. Bordeasu, I., Popoviciu, M. O., Ghera, C., Micu, L. M., Pirvulescu, 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 294 (2017) 012020 doi:10.1088/1757-899X/294/1/012020, Hunedoara, 2017
59. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Patrascoiu C-tin, Bălăsoiu V.: „An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves”, Scientific Buletin Politehnica University of Timisoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), Timișoara, ISSN:1224-6077, pp. 253-258, 2004
60. <https://www.animavision.ro/pompa-hidrofor-el-pumps-jpv-1300b-rotor-bronz-p-4564.html>