

TEHNICI DE OPTIMIZARE A REZISTENȚEI LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A UNOR ALIAJE CuAlNiFeMn DESTINATE EXECUȚIEI ELICELOR NAVALE

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

Ing. Octavian Victor Oancă

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeasu
prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea
Referenți științifici: prof.univ.dr. C-tin Viorel Campian
prof.univ.dr.ing. Dorian Nedelcu
prof.univ.dr.ing. Mircea Barglazan

Ziua susținerii tezei: 14.02.2014

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, 2014

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. Republicii 9,
Tel./fax 0256 403823
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Prezenta teză de doctorat intitulată „**Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale**” reprezintă o sinteză a activității de cercetare teoretică și experimentală efectuată de autor în domeniul cavitației și cel al eroziunii prin cavitație.

Teza se axează pe studiul experimental al eroziunii prin cavitație vibratoare a unor bronzuri speciale, (**CuAl10Ni5Fe2.5Mn1- utilizat în teza prin simbolul AMPCO 45**), validat prin verificarea rezistenței folosind compararea cu materialele etalon OH12NDL și bronzul naval CuNiAl III-RNR și pe baza durabilității medii, definite de Steller [16], [66], [73], [111], [112], [113], [114] și a rezistenței normalizate la eroziune prin cavitație, exprimată prin parametrul R_{nsr} , definit de normele ASTM G32-2010.

Testele experimentale sunt realizate pe aparatul standard cu cristale piezoceramice T2, construit conform normelor ASTM G32-2010, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Cercetările au fost efectuate pe aliajul **AMPCO 45** în patru stări diferite (starea de livrare, tratat termic prin călire urmată de îmbătrânire prin dispersie, durificat la suprafața expusă cavitației cu fascicul laser și respectiv prin pulverizare termică urmată de tratare cu laser). Din fiecare specimen și pentru fiecare regim aplicat au fost testate câte trei probe (în total 21 de probe).

Cu această ocazie, doresc să mulțumesc coordonatorilor mei științifici, d-ui prof. univ. dr. ing. **Ilare Bordeasu** și d-lui prof. univ. dr. ing. **Ion Mitelea**, care mi-au făcut onoarea de a mă accepta ca student doctorand, sprijini, ajuta și îndruma cu un profesionalism de excepție și un deosebit simț pedagogic, de la începutul studiilor doctorale până la finalizarea tezei. Datorită colaborării cu dânsii și cu unii colegi, atât din cadrul Universității Politehnica din Timișoara cât și din cadrul altor universități din țară, am reușit să public, în domeniul tezei de doctorat, un număr de **18** lucrări științifice, prezentate și apărute în publicații naționale sau internaționale de prestigiu (în special din categoria ISI și BDI).

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

Mulțumesc, de asemenea, colegilor de la ISIM Timișoara, pentru sprijinul real acordat pe tot parcursul realizării părții experimentale a tezei de doctorat, pentru consultanța științifică și observațiile extrem de prețioase în conceperea și realizarea acestei lucrări, cât și pentru bunăvoința de care au dat dovadă în mod constant.

Mulțumesc cadrelor didactice, personalului tehnic și colegilor din Colectivele de Mașini Hidraulice și Știința Materialelor, din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara, care m-au ajutat în realizarea probelor, analiza și interpretarea corectă a rezultatelor cercetărilor.

Nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei mele, care a fost mereu alături de mine, dând dovadă de înțelegere, astfel încât am putut finaliza cu succes această activitate, începută la 1 octombrie 2010.

La final amintesc că studiile doctorale ale autorului s-au desfășurat prin finanțare obținută prin **Proiectul POSDRU ID77265 (2010), co-finanțat de Fondul Social European - Investește în oameni, în cadrul Programului Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013.**

Timișoara, ianuarie 2014

Ing. Octavian Victor Oancă

Oancă, Octavian Victor

TEHNICI DE OPTIMIZARE A REZISTENȚEI LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A UNOR ALIAJE CuAlNiFeMn DESTINATE EXECUȚIEI ELICELOR NAVALE

Teze de doctorat ale UPT, Seria 9, Nr. 143, Editura Politehnica, 2014, 156 pagini, 39 figuri, 27 tabele.

ISSN:1842-4937

ISBN:978-606-554-761-2

Cuvinte cheie: bronz naval, eroziunea prin cavitație, aparat vibrator, curbe și parametrii specifici, microstructură.

Rezumat:

În cadrul lucrării sunt cercetate comportamentul și rezistența bronzului CuAlNiFeMn-AMPCO 45, destinat fabricării elicelor navale, la eroziunea produsă prin cavitație vibratoare. Cercetarea pune în evidență modificările aduse prin tratament termic, retopirea stratului de suprafață cu fascicul laser, cu o putere în impuls de 160W, 180W și 220W, precum și acoperirea suprafeței expuse cavitației prin pulverizare termică urmată de retopire cu fascicul laser cu o putere în impuls de 2400W și 2600W. Analiza rezultatelor pe baza curbilor și parametrilor specifici eroziunii prin cavitație, corelată cu investigațiile morfologice ale structurii erodate, precum și compararea cu materialele etalon (oțelul inoxidabil OH12NDL - cu bună rezistență la eroziune prin cavitație, utilizat în fabricarea paletelor turbinelor Kaplan de la Porțile de Fier din România și bronzul naval CuNiAl III RNR - etalon pentru elicele navelor maritime) arată că prin tratamentele aplicate comportarea și rezistența la eroziune prin cavitație se îmbunătățesc substanțial, contribuind, astfel, la creșterea duratei de viață, în condiții de cavitație intens dezvoltată. Totodată, analizele realizate, pe baza parametrilor și a microfotografiilor structurilor erodate, confirmă importanța alegerii tehnologiei în tratarea suprafeței expuse atacului prin cavitație, pentru obținerea unei durități adecvate, bine corelate cu o structura fină și omogenă din punct de vedere al proprietăților mecanice. Studiile realizate în cadrul tezei sunt de un real folos, cu aplicabilitate imediată, în domeniul elicelor navelor maritime și fluviale.

CUPRINS

Introducere	8
1. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul eroziunii cavitaționale a bronzurilor utilizate în fabricarea elicelor navale.....	10
1.1 Generalități privind aliajele de Cu-Ni-Al-Mn și aplicațiile lor	11
1.1.1 Corelația dintre compoziția chimică, microstructură și proprietăți.....	11
1.1.2 Considerații privind utilizarea aliajelor Cu-Sn (Ni-Al-Mn) în fabricarea pieselor solicitate la eroziune prin cavitație	14
1.2 Documentare privind distrugerea prin cavitație a materialelor elicelor navale.....	14
1.2.1 Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan național	14
1.2.2 Considerații asupra rezultatelor obținute plan internațional	19
1.3 Concluzii	22
1.4 Obiectivele tezei de doctorat	23
2. Stand experimental dotat cu echipament de achiziții date în timp real destinat cercetărilor de eroziune prin cavitație vibratoare	25
2.1 Structura sistemului ultrasonic de 20 KHz	26
2.1.1 Cerințele tehnice ale sistemului	27
2.1.2 Dimensionarea sonotrodei cu program software specializat, pentru proba cu filet interior (Specimen AMPCO 45 tip A).....	28
2.1.3 Dimensionarea sonotrodei cu program software specializat, pentru proba cu filet exterior (specimen AMPCO 45 tip B)	33
2.1.4 Dimensionarea transformatorului de amplitudine cu program software specializat, pentru frecvența vibrațiilor de 20 KHz	37
2.1.5 Dimensionarea cu program software specializat a ansamblului rezonator mecanic, pentru specimen AMPCO 45 tip A, frecvența vibrațiilor 20 KHz	41
2.1.6 Verificarea cu program software specializat a convertorului piezoceramic pentru activare cavitațională	44
2.2 Echipamente și aparatură de calibrare electroultraacustică	47
2.3 Generatorul electronic de ultrasunete, 20kHz, 500W	49
2.3.1 Descriere și funcționare	49
2.3.2 Schema bloc	49
2.3.2.1 Filtrul de rețea	50
2.3.2.2 Convertorul AC-DC	51
2.3.2.3 Modulul redresor	53
2.3.2.4 Modulul filtru de putere PFC activ	53
2.3.2.5 Modulul punte IGBT	53
2.3.2.6 Modulul driver IGBT	54
2.3.2.7 Filtrul corector.....	54
2.3.2.8 Modulul DDS	55
2.3.2.9 Modulul filtru și formator de semnal	56
2.3.2.10 Modulul convertor RMS – DC	56
2.3.2.11 Modulul de comandă și control.....	57
2.3.2.12 Interfața cu utilizatorul	58
2.4 Sistemul de achiziții date	58
2.5. Concluzii	60

3. Materialul cercetat. Metoda de testare.....	61
3.1 Materialul cercetat.....	61
3.1.1 Considerații privind alegerea materialului	61
3.1.2 Prezentarea materialului.....	61
3.1.3 Aparatura utilizată pentru examinarea micro și macrografică a structurii	62
3.2. Metoda de testare	66
3.3 Concluzii	68
4. Cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitație a aliajului în stare livrată.....	69
4.1 Rezultatele experimentului de cavitație.....	70
4.1.1 Curbele specifice și parametri caracteristici eroziunii prin cavitație	72
4.1.2 Analiza rezultatelor experimentale	74
4.2 Investigare fenomenologică a microstructurii erodate	74
4.3 Concluzii	82
5. Îmbunătățirea prin tratament termic volumic a rezistenței la eroziune prin cavitație.....	83
5.1. Tratamentul aplicat.....	83
5.2 Rezultatele experimentului de cavitație	84
5.2.1 Curbele specifice și parametri caracteristici eroziunii prin cavitație	85
5.2.2 Analiza rezultatelor experimentale	86
5.2.3 Investigare fenomenologică a microstructurii erodate.....	86
5.3 Concluzii	93
6. Tratamentul de suprafață cu fascicul laser și rezistența la cavitație	94
6.1. Tratamentul aplicat.....	94
6.2 Rezultatele experimentului de cavitație	96
6.2.1 Curbe și parametri caracteristici eroziunii prin cavitație	99
6.2.2 Analiza rezultatelor experimentale	100
6.2.3 Investigarea fenomenologică a microstructurii erodate	101
6.3 Concluzii	107
7. Straturi de acoperire prin pulverizare și retopire cu fascicul laser	108
7.1. Tratamentul aplicat.....	108
7.2 Rezultatele experimentului de cavitație	111
7.2.1 Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație	112
7.2.2 Analiza rezultatelor experimentale	115
7.2.3 Investigare fenomenologică a microstructurii erodate.....	115
7.3 Concluzii	123
8. Comparații ale rezultatelor cercetării.....	124
8.1 Influența parametrilor fascicolului laser asupra rezistenței la eroziune prin cavitație	124
8.2 Influența tratamentului termic volumic asupra rezistenței la eroziune prin cavitație	127
8.3 Influența durității suprafeței asupra rezistenței la eroziune prin cavitație	132
8.4 Concluzii	134

9. Evaluarea rezistenței la cavitație după durabilitatea medie $\bar{\delta}_{cav}$ și rezistența normalizată R_{ns}.	135
9.1 Evaluarea și ierarhizarea după durabilitatea medie $\bar{\delta}_{cav}$	135
9.2 Evaluarea și ierarhizarea după rezistența normalizată la cavitație R_{ns}	138
9.3 Concluzii	139
10. Concluzii finale și contribuții originale. Noi perspective de cercetare	140
Bibliografie	146

INTRODUCERE

Eroziunea prin cavitație este prezentă în toate domeniile unde presiunea fluidelor aflate în mișcare scade sub valoarea vaporilor saturați și se datorează concentrării energiei mecanice generată, pe arii extrem de mici, la impactul materialului cu undele de șoc și microjeturile produse prin implozia bulelor de vapori. Această concentrare de energie determină valori ridicate ale solicitărilor mecanice care, în general, depășesc limita de oboseală, limita de curgere și chiar rezistența de rupere a tuturor materialelor cunoscute de tehnica actuală [2], [4], [15], [42], [43].

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

Deoarece tema prezentei lucrări este în domeniul bronzurilor destinate elicelor navale, mai jos este realizată o prezentare sintetică a problemei, care justifică scopul tezei, legat de condițiile de exploatare a navelor maritime și fluviale.

Condițiile hidrodinamice de exploatare a navelor maritime și fluviale, propulsate de elice, tot mai intense din punct de vedere cavitațional, au impus cercetarea diferitelor tehnologii prin care suprafețele expuse eroziunii prin cavitație și structura materialelor conferă elicelor o durată de viață cât mai mare posibil. Astfel de studii sunt realizate în toate țările mari constructoare și exploatoare de nave maritime și fluviale. Tradiție în cercetarea și elaborarea unor astfel de tehnologii și materiale au: S.U.A, Germania, Japonia, Rusia, Italia, Anglia și China [3], [5], [16], [47], [52], [55], [58], [60], [65], [66], [73], [38], [33], [91], [109], [116], [119].

Cercetările realizate în cadrul Laboratorului de Cavitație din cadrul Universității Politehnica Timișoara, pe alamele și bronzurile navale, de tip CuNiAl, au evidențiat o rezistență bună la eroziunea prin cavitație, care poate fi substanțial îmbunătățită prin diverse tratamente. Cum bronzurile de tip CuNiAl sunt scumpe, noile cercetări de eroziune prin cavitație sunt orientate și spre alte materiale, cum sunt bronzurile aliate cu mangan, de tip **CuAlNiFeMn** (AMPCO), datorită proprietăților mecanice foarte bune.

Cea mai rapidă și ieftină metodă de cercetare a distrugerii (eroziunii) prin cavitație o reprezintă cea realizată în laboratoare, folosind aparatele vibratorii ultrasonice [2], [15], [43], [46], [59], [61] datorită, în primul rând, a duratei foarte scurte de producere a eroziunii, chiar dacă fenomenul generat este complet diferit de cel din mașina hidraulică (turbină, pompă, elice). Un avantaj suplimentar, al cercetărilor realizate în laborator, îl oferă utilizarea aparaturii moderne, cum este microscopul electronic cu baleiaj, care permite analiza materialului până la nivelul de rețea și plan metalografic. Cu ajutorul unor astfel de mijloace de analiză microstructurală se pot oferi noi date despre fenomenul de eroziune prin cavitație, dar și despre transformările microstructurale pe care le suportă materialul în timpul atacului prin cavitație.

În pas cu noile direcții de cercetare și analiză, prin folosirea aparatelor de ultimă generație, foarte performante, de investigare structurală și de producere a eroziunii prin cavitație, lucrarea de față aduce elemente importante și noi despre

comportarea și rezistența la eroziune prin cavitație a bronzurilor aliate cu mangan, de tip CuAlNiFeMn, supuse diferitelor tratamente de îmbunătățire a comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație.

Cercetările realizate au drept scop punerea în evidență a efectului produs prin aplicarea unor tehnologii moderne, cum sunt utilizarea fasciculului laser și a pulberilor metalice, asupra rezistenței și a comportamentului la eroziune prin cavitație, al bronzurilor cu conținuturi de mangan și proprietăți mecanice diferite, pe parcursul atacului distructiv, ca urmare a modificărilor de caracteristici structurale și mecanice. Totodată, pentru această cercetare s-a construit un aparat vibrator cu cristale piezoceramice T2, care respectă cerințele normelor ASTM G32-2010, unic prin folosirea unei interfețe și dotări care asigură afișare pe ecranul calculatorului, constanța și controlul, prin computer, a parametrilor funcționali ai procesului de eroziune prin cavitație vibratoare.

1. STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII ÎN DOMENIUL EROZIUNII CAVITAȚIONALE A BRONZURILOR UTILIZATE ÎN FABRICAREA ELICELOR NAVALE

Primele observații de eroziune cavitațională s-au făcut asupra elicelor navale maritime de către italianul Bartello în anul 1875 [16], [29], [66].

Efectele negative, ale cavitației, asupra performanței unei elice navale, au fost identificate de Parsons în 1893, care a construit primul tunel pentru cavitație [13], [86], [32], [126].

Eroziunea prin cavitație, ca fenomen, practic, a fost sesizată, pentru prima dată, în 1894, când s-a constatat că viteza vasului de luptă Mauritania a crescut după schimbarea elicei. Însă, evidențierea prin cercetări a fost realizată în timpul experimentelor francezului George Rennie, efectuate pe o elice navală [3], [13], [125], [126].

Cum pentru constructorii de nave maritime și fluviale, un mare interes îl prezintă viteza de mers a navei, cele mai multe cercetări, de laborator, urmăresc hidrodinamica cavitației, respectiv modul de formare și dezvoltare a cavitației pe pala elicei, figura 1.1 [4], [29], [32].

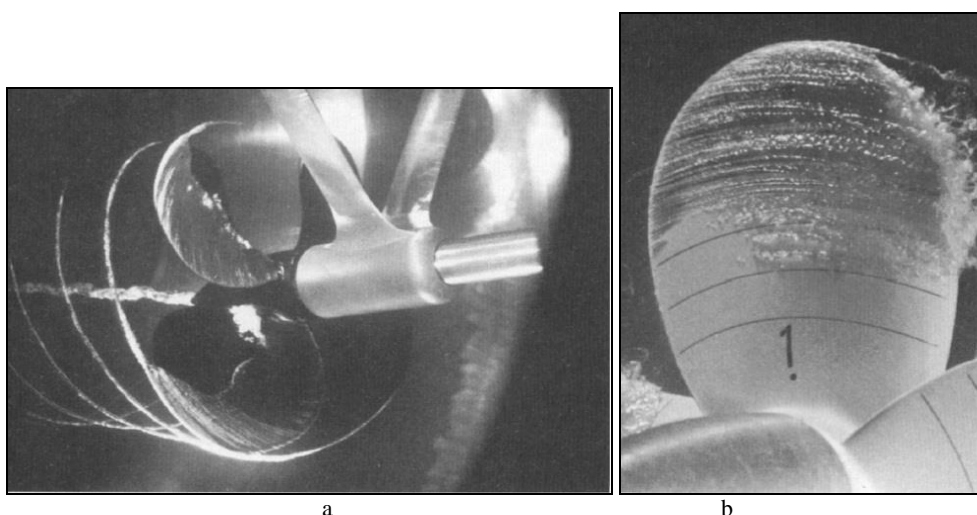


Fig. 1.1 Vizualizarea cavitației pe un model de elice navală, testată în laborator [80]
(a) vârtejul cavitațional pe suprafața palei de elice; (b) cavitația atașată pe pala de elice, la periferie

Deoarece, majoritatea elicelor navelor mari, maritime și fluviale, utilizate în transportul mărfurilor și excursii, sunt realizate din oțeluri inoxidabile și din aliaje

ale cuprului cu staniu sau zinc, aliate cu nichel, aluminiu și mangan, pentru creșterea duratei lor de viață este foarte important să se cunoască și căile/tehnologiile prin care să sporească comportarea și rezistența acestora la eroziunea cavitației.

Întrucât cercetările în acest domeniu sunt, totuși, foarte reduse, prin lucrarea de față și prin rezultatele obținute, se dorește îmbogățirea bibliotecii de date, care să servească constructorilor de elice navale.

1.1 Generalități privind aliajele de Cu-Ni-Al-Mn și aplicațiile lor

Corelația dintre compoziție chimică, microstructură și proprietăți

Bronzurile cu aluminiu și nichel, sunt materiale metalice de o foarte mare importanță în tehnică, datorită proprietăților deosebite pe care le posedă, dintre care putem aminti: caracteristici mecanice ridicate atât la temperaturi înalte cât și la temperaturi scăzute, refractaritate și rezistență la coroziune, proprietăți magnetice (permeabilitate magnetică variabilă sau constantă, pentru magneți permanenți), rezistență la uzare și proprietăți antifricțiune corespunzătoare, coeficient de dilatare practic nul în intervalul de temperatură 0...100°C sau apropiat de cel al platinei și sticlei, rezistivitate electrică constantă, între 0...100°C, mare rezistență electrică, forță termoelectromotoare ridicată etc. [125], [126].

Proprietățile caracteristice ale aliajelor din sistemul Cu - Al - Ni sunt rezistența foarte mare la coroziune, stabilitatea ridicată până la 500°C; se comportă mai bine decât nichelul în mediu reducător și decât cuprul în mediu oxidant și posedă o rezistență la fluaj superioară comparativ cu aliajele cu bază de cupru și fier.

a) Aliaje CUPRU - ALUMINIU - NICHEL

Proprietățile mecanice ale aliajelor de cupru cu aluminiu pot fi substanțial îmbunătățite prin aliere cu nichel.

În funcție de principalul element de aliere, aliajele cu bază de cupru se pot clasifica în aliaje cu: aluminiu, nichel, mangan, cupru, crom, fier, molibden, siliciu și beriliu. **Aliajul Cu - Al - Ni** face parte din categoria aliajelor cupru - aluminiu.

În figura 1.2 este prezentată diagrama ternară Cu-Ni-Al, în care sunt indicate punctele principalelor compoziții de aliaje [115], [126]. După cum se vede din diagramă, aceste aliaje sunt susceptibile la transformări în stare solidă, datorită separării fazelor intermetalice θ , (Ni Al) și β , (NiAl₂) care determină ca solubilitatea aluminiului și nichelului în cupru să se micșoreze o dată cu scăderea temperaturii [49], [115], [88]. Astfel, aceste aliaje sunt susceptibile la durificarea structurală prin tratament termic, care constă într-o călire la 900÷1000°C, răcire în apă și revenire la 500÷600°C, când se realizează descompunerea soluției solide α , suprasaturată, cu formarea în sistem a unei structuri eterogene, cu o dispersie foarte înaintată a fazelor precipitate.

Prin aceasta se produce o creștere sensibilă a rezistenței mecanice și durității aliajului. Cel mai mare efect se obține prin tratament termomecanic, adică ecruisare după călire și apoi revenire.

Un aliaj de tip CuNiAl prelucrat la cald și la rece are după călire la 900°C, rezistența mecanică de 25-35 daN/mm². Deformat la rece în stare călită și apoi revenit la 500°C, capătă rezistență de 80-90 daN/mm² și alungirea de 5-10%. Pe

12 Stadiul actual al cunoașterii în domeniul eroziunii cavitaționale a bronzurilor - 1

scară industrială, la noi în țară se folosesc două aliaje: CuNiAl A și CuNiAl B [11], [115]. CuNiAl A conține 12...15%Ni, 2,3...3%Al, restul cupru și are greutatea specifică 8,5 kg/dm³.

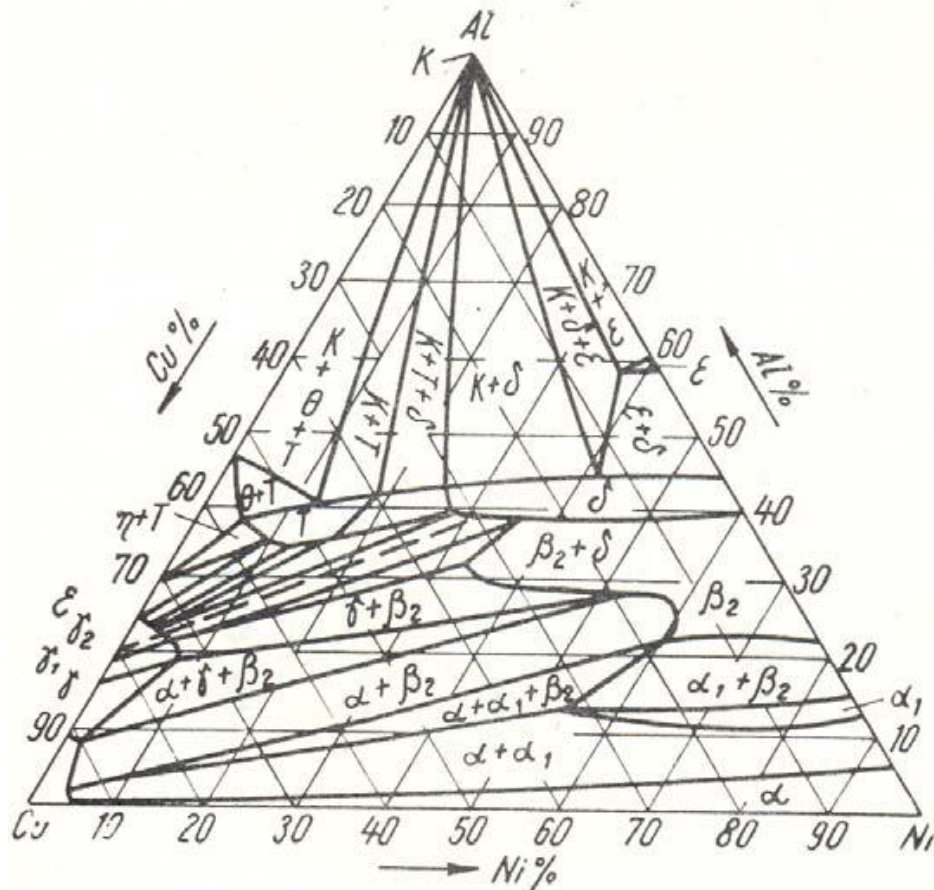


Fig. 1.2 Diagrama ternară Cu-Ni-Al [115], [126]

Aliajul fără tratament termic are $R_m = 35...38$ daN/mm² și $A = 20\%$, iar după tratament termomecanic $R_m = 80...90$ daN/mm², alungire 5% și duritate Brinell 260 daN/mm².

O importanță deosebită în creșterea caracteristicilor mecanice și de rezistență la coroziune o au elementele de aliere, care funcție de natura și proporția în compoziția chimică a bronzului pot duce la creșterea duratei de viață, mai ales în condiții de exploatare marină.

Ca elemente de aliere, în mod curent, se folosește: fierul, nichelul, manganul, cobaltul, beriliu, zirconiu, titan, borul, staniul, zincul, siliciul, plumbul, vanadiul, niobiul, tantalul, carbonul, cromul, etc., unele dintre acestea în limitele: aluminiu, fier și nichel sub 20%, mangan până la 15%, beriliu, crom, zirconiu sub 3%, cobalt și zinc sub 10 %.

Rolul acestora, în structura bronzului este [125], [126], [127]:

- **fierul** finisează structura, mărește rezistența și duritatea, dar micșorează fluiditatea aliajului;
- **nichelul**, împreună cu cuprul formează o soluție solidă, finisează structura și îmbunătățește proprietățile mecanice, mai ales duritatea și rezistența la temperaturi înalte. La un conținut de 4% Ni în bronzurile cu aluminiu, duritatea lor crește atât de mult, încât devine dificilă prelucrarea prin așchiere.

Adaosul cel mai eficient al bronzurilor cu aluminiu este nichelul, care îmbunătățește caracteristicile mecanice, proprietățile anticorozive și antifricțiune. De asemenea, mărește compactitatea și rezistența la temperaturi ridicate.

- **manganul** are o acțiune favorabilă asupra bronzurilor, în sensul că permite obținerea unui material metalic dens, cu proprietăți mecanice îmbunătățite, având totodată o acțiune dezoxidantă;
- **plumbul** se găsește în aliaj sub forma unui constituent liber și moale. Bronzurile cu staniu, cu un conținut de Pb până la 2%, nu-și schimbă proprietățile mecanice, în schimb își îmbunătățesc proprietățile de prelucrare prin așchiere și rezistența la coroziune în mediu de acizi.

Unele elemente chimice, sub formă de impurități sunt dăunătoare bronzurilor cu aluminiu. Acestea sunt: Si, Pb, Sn, Bi, As, Sb, etc.

S-a observat că un adaos de **siliciu** în bronzuri, chiar numai în proporții de zecimi de procente, scade mult elasticitatea inițială a aliajului. De aceea, la utilizarea prealiajului Cu - Si ca dezoxidant, trebuie să conducem astfel rafinarea, încât să evităm rămânerea siliciului în bronz, nelegat de oxigen.

În aliaj se introduc adaosuri mici de **fosfor** până la 0,3% pentru dezoxidarea cuprului, înainte de introducerea staniului. La un conținut de **fosfor** mai mare de 0,3% se mărește rezistența bronzului prin apariția unui constituent structural mai dur și fragil (Cu₃P). **Fosforul** micșorează tendința de saturare cu gaze a bronzului, mărește intervalul de cristalizare și fluiditatea lui, ușurând lipirea și sudarea.

Antimoniul are o influență puternică asupra proprietăților bronzurilor; un procent mai mare face ca bronzul să devină casant (se sfărâmă prin lovire) deoarece formează cu cuprul și staniul compuși fragili, care se separă la marginea grăunților.

Bismutul are o influență puternică asupra proprietăților bronzului. Odată cu creșterea conținutului în bismut scade plasticitatea, elasticitatea și rezistența bronzului datorită apariției eutecticului ușor fuzibil și fragil, care se separă ca fază independentă la marginea grăunților. Ca procent maxim de bismut se poate admite 0,1%.

b) Aplicații ale aliajelor Cu-Ni-Al-Mn

Printre cele mai întâlnite aplicații ale aliajelor CuNiAlMn se întâlnesc [127], [128], [129]:

- aplicații mecanice și corozive, care implică uzura prin abraziune, frecare, deformare și eroziune chimică, precum: rulmenți și bucșe aeronave, arborii pompelor ce funcționează în mediu marin, unele piese pentru mașini-unelte;
- elicele navelor ce funcționează în mediu marin și oceanic, cu puternică coroziune chimică și cavitațională, etc.

1.1.2 Considerații privind utilizarea aliajelor Cu-Sn (Ni-Al-Mn) în fabricarea pieselor solicitate la eroziune prin cavitație

Materialele cu cea mai largă utilizare, folosite în turnarea elicelor navale sunt aliajele pe bază de cupru: alamele și bronzurile [15], [17], [40], [77], [78], [86], [89], [102], [105], [125].

Alamele sunt folosite pe scară largă în fabricarea elicelor, cu bună rezistență în apele fluviale, dar cu slabă rezistență în apele sărate. Cercetările arată că rezistența acestora, la cavitație, depinde de caracteristicile mecanice și de gradul de aliere [15], [40], [127]; comportarea fiind foarte mult influențată de materia organică dizolvată și de substanțele coloidale prezente în apa marină naturală sau poluată [85], [86].

Bronzurile fac parte din grupul metalelor cu cea mai mare rezistență la coroziune (chimică sau prin cavitație) în apa marină. Dintre acestea, **bronzurile cu aluminiu** au o rezistență cavitațională mare datorită proprietăților mecanice ridicate, comparabile cu cele ale aliajelor de Ti, W și oțelurilor aliate. Dintre acestea, cele care conțin și alte elemente de aliere, cum sunt **bronzurile cu aluminiu și mangan**, [48], [49], [87], deși sunt, oarecum, inferioare bronzului cu aluminiu și nichel, sunt cele mai folosite pentru elicele navelor marine, datorită și rezistenței foarte bune la acțiunea chimic corozivă a mediului.

Modul de folosire a celor două materiale, ca preferință pentru fabricanții de elice, a suferit modificări serioase de-a lungul anilor. La începutul anului 1960 utilizarea alamei, cu rezistență mare la tracțiune, a reprezentat circa 64% din totalul elicelor fabricate, iar elicele turnate din **bronz cu mangan și aluminiu** și respectiv din **bronz cu nichel și aluminiu** au reprezentat în jur de 12 % și respectiv 19% [32], [86]. Cu toate acestea, în a doua parte a anului 1980, bronzul cu nichel-aluminiu (CuNiAl) a devenit principalul material, care, conform clasificării date de Lloyd's Register, American Bureau of Shipping, Germanischer Lloyd și Bureau Veritas, [32], a reprezentat 82% din materialele utilizate în fabricarea elicelor. Datele statistice, obținute pe elicele folosite, arată că azi alama, cu rezistență mare la tracțiune, reprezintă mai puțin de 7%, iar bronzurile cu mangan și aluminiu sub 8% [31], [124].

Datorită calităților anticavitaționale, deși foarte bune, chiar excelente [15], [40], [100], [104], [127] oțelurile inoxidabile, destinate turnării elicelor navale, sunt tot mai puțin folosite, după 1970 pierzând continuu în favoarea aliajelor cu bază de cupru, actualmente situându-se la aproximativ 3% din materialele folosite pentru fabricarea elicelor [31], [124].

1.2 Documentare privind distrugerea prin cavitație a materialelor elicelor navale

1.2.1 Considerații asupra rezultatelor obținute pe plan național

Ca urmare a regimului hidrodinamic, de cavitație intens dezvoltată, în care funcționează elicea navală, s-a impus amplificarea cercetărilor privind crearea de noi bronzuri, cu caracteristici mecanice care să confere rezistențe sporite, dar și utilizarea

noilor tehnologii de tratament care să contribuie la îmbunătățirea comportării lor la cavitație [15], [24], [26], [32], [38], [43], [86], [89], [103], [120].

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 Politehnică din București (Departamentul de Hidraulică, Mașini Hidraulice și Ingineria Mediului [8], [9], Centrul de Cercetări Energetice și Protecția Mediului și Centrul pentru Expertizarea Materialelor Speciale [66], [72], [73], [74], [75], [86]), Universitatea Politehnică Timișoara (Colectivul de Mașini Hidraulice din cadrul Departamentului Mașini, Mecanice, Utilaje și Transporturi, Centrul Național pentru Ingineria Sistemelor cu Fluide Complexe) [12], [14], [18], [19-25], [27], [39], [64], [68-71], [94], [98], [101] și Universitatea Dunărea de Jos din Galați (Departamentul Hidrodinamică Navală, Centrul de Cercetare Hidrodinamică, Structuri și Tehnologii Navale) [125], [126].

Din studiile bibliografice, parcurse, se constată că cele mai ample cercetări privind eroziunea prin cavitație, a materialelor folosite la turnarea elicelor navale, sunt realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnică Timișoara, pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1 (amplitudinea vibrațiilor = 47 μm , frecvența vibrațiilor = 7000 $\pm 3\%$ Hz, diametrul probei = 14 mm) [6], [15], [16], [38], [64], [66], [73], [98], [101].

Cercetările au fost realizate pe fontă cu grafit nodular Fgn 450-5, oțel naval de înaltă rezistență D-32, oțel inoxidabil III-RNR, alamă navală și bronzuri navale de înaltă rezistență CuNiAl I-RNR și CuNiAl III-RNR [15], [26], [103]. Aprecierea comportamentului și rezistenței la eroziunea cavitației s-a făcut prin compararea curbelor de pierdere volumică, cumulată, fig. 1.3, cu cea a oțelului inoxidabil OH12NDL, considerat cu bună rezistență și etalon pentru turbinele hidraulice din România [3], [4], [15], [81], [98].

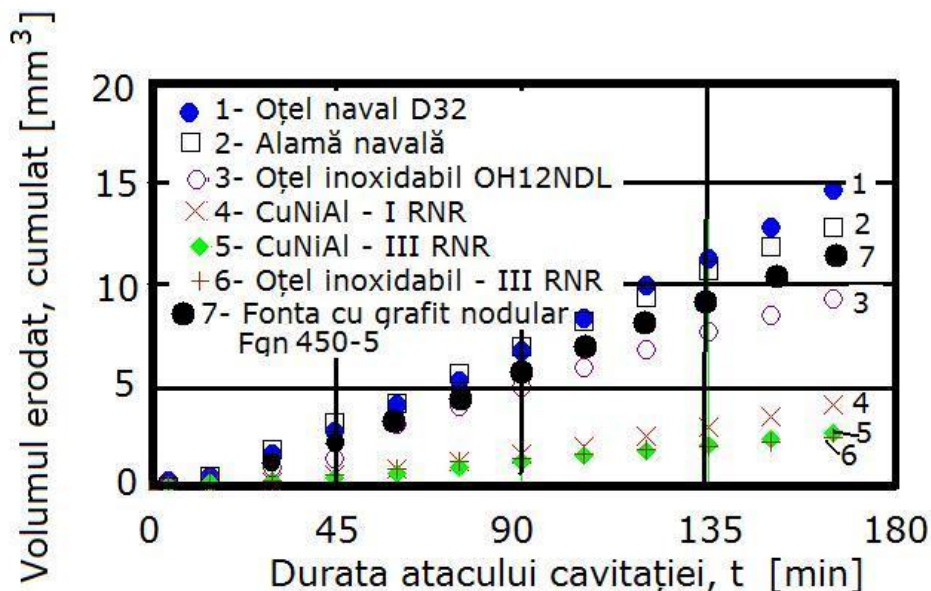


Fig.1.3 Variația pierderilor volumice cumulate cu durata atacului cavitației pentru materiale destinate fabricării elicelor navale (prelucrare după [15], [16])

16 Stadiul actual al cunoașterii în domeniul eroziunii cavitaționale a bronzurilor - 1

Studiile efectuate pe o perioadă de 7 ani (perioada 1988-1995) au arătat că oțelul aliat D-32 are slabă rezistență la cavitație, nefiind indicat pentru confecționarea elicei. De altfel, constructorul a dorit realizarea unei elice cu pale obținute din tablă de oțel D-32 sub formă de structură sudată [15].

Alama navală (compoziție chimică Cu = 70 %, Zn = 30 %), a fost apreciată ca fiind cu slabă rezistență la eroziunea cavitației și nu a fost recomandată pentru fabricarea elicelor navelor maritime, ea putând fi folosită la fabricarea elicelor navelor de apă dulce (fluviale) [15], [26], [102].

Bronzul naval CuNiAl I-RNR (81,65 % Cu, 0,9% Zn, 8,5% Al, 5% Fe, 0,4% Mn, 0,08% Sn, 3,0% Ni, 0,03% Pb) a fost apreciat, de asemenea, cu slabă rezistență la eroziunea cavitației și a fost recomandat doar pentru elicele navelor fluviale [15], [16], [26], [86].

Oțelul inoxidabil III-RNR (cu structura de 50% martensită și 50% ferită) și bronzul naval CuNiAl III-RNR (80,87% Cu, 1,0% Zn, 9,0% Al, 0,5 % Mn, 4,0% Fe, 0,1% Sn, 4,5% Ni, 0,03% Pb), au fost apreciate ca fiind cu foarte bună rezistență la eroziunea cavitației, motiv pentru care au fost recomandate în fabricarea elicelor navale [15], [16], [26], [86].

De asemenea, în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, au fost analizate și diverse metode de protejare, la eroziunea cavitației, a suprafețelor unor materiale, expuse atacului cavitației vibratoare. Astfel, a fost studiat efectul diverselor rășini epoxidice și vopsele, asupra performanțelor cavitaționale ale suprafeței acoperite [15]. Rezultatele au fost total nefavorabile, distrugerea straturilor de acoperire, realizându-se în timpi foarte scurți, motiv pentru care s-a făcut recomandarea ca aceste procedee de protecție să fie utilizate doar pentru protejarea elicelor de rezervă, confecționate din Fgn 450-5 [15], [103].

Ca efect, s-a studiat și influența nitrurării ionice, ecruisării mecanice și durificarea prin scânteii electrice a oțelului D 32. Rezultatele au fost diferite, unele slabe, altele foarte bune, în special pentru nitrurarea ionică și unele procedee de ecruisare cu alică [15], [16]. Deși unele rezultate au fost favorabile creșterii rezistenței la cavitație, procedeele nu și-au găsit aplicabilitate practică din cauza căderii industriei românești constructoare de nave maritime și fluviale, pe de o parte și dificultăților de aplicare la dimensiuni mari ale elicelor navelor de transport, cum sunt cargourile, pe de altă parte.

În cadrul centrului de Expertizare a Materialelor Speciale, din cadrul Universității Politehnica București, sunt semnificative rezultatele de analiză a structurilor distruse de cavitația vibratoare pe o alama navală și alte două bronzuri navale CuNiAl, tabelul 1.1 și 1.2, obținute în cadrul tezei de dr.ing. Mânzan Mădălina [86]. Investigarea structurilor erodate a fost realizate prin difracție de raze X (XRD) și prin intermediul microscopiei optice, cu aparatură foarte performantă, figura 1.4.

Tabelul 1.1. Compoziția chimică a alamei și bronzurilor investigate [86]

Aliaj pe bază de cupru	Compoziția chimică, %					
	Zn	Al	Ni	Mn	Fe	Cu rest
Alama navală	38,62	-	-	-	-	61,38
CuNiAl-1	-	10,86	5,46	1,22	5,23	77,24
CuNiAl-2	-	11,13	6,32	1,32	6,07	75,17

Tabelul 1.2. Valorile caracteristicilor mecanice [86]

Aliaj	Rezistența la tracțiune, R_m MPa	Limita de curgere, $R_{p0.2}$ MPa	Alungirea la rupere, A %
Alamă navală	372	145	45
CuNiAl-1	504	266	15
CuNiAl-2	827	469	12

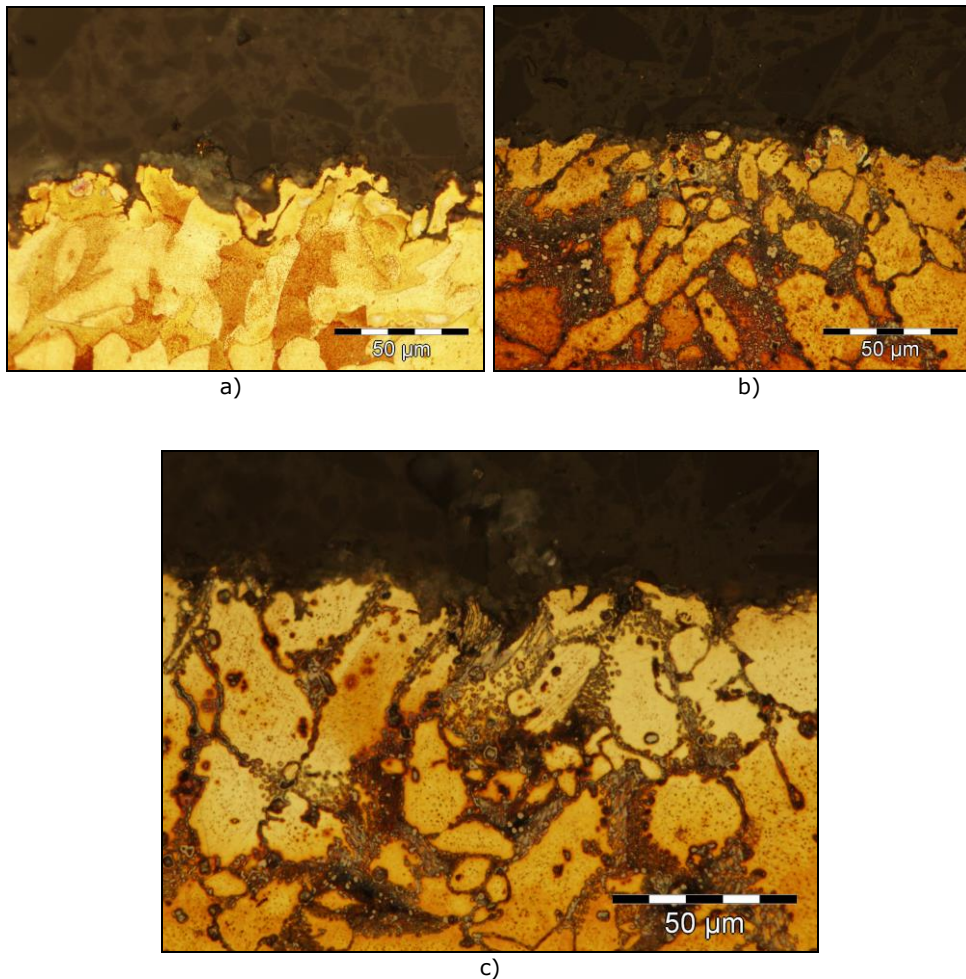


Fig. 1.4 Aspectul microstructural în secțiune perpendiculară pe suprafața deteriorată după 165 minute de atac al cavitației (mărire 500x) [86]
(atac chimic metalografic $FeCl_3$ + alcool etilic + HCl):

18 Stadiul actual al cunoașterii în domeniul eroziunii cavitaționale a bronzurilor - 1

Din investigațiile realizate s-a desprins concluzia că prezența eutectoidului ($\alpha+\gamma_2$), pentru cele două bronzuri, conduce la creșterea rezistenței și durității materialului, lucru care avantajează creșterea rezistenței la eroziunea cavitațională. Totodată, investigațiile realizate au pus în evidență și influența proprietăților mecanice (Tabelul 1.2). Astfel, se constată că bronzul CuNiAl-2 are cea mai redusă degradare prin cavitație, respectiv cea mai bună rezistență și ca urmare a valorilor ridicate ale caracteristicilor mecanice, iar alama cele mai mari deteriorări, respectiv cea mai slabă rezistență cavitațională.

Analiza macroscopică, realizată cu ajutorul stereomicroscopului OLYMPUS SZX57, la puteri de mărire de 8 ori, atât pentru aspectul stereomicrostructural cât și pentru aspectul stereomicrostructural, după măsurarea cavitației și la puteri de 10 ori pentru aspectul macrostructural al adâncimii maxime de pătrundere a cavitației, figura 1.5, a permis formularea următoarelor concluzii:

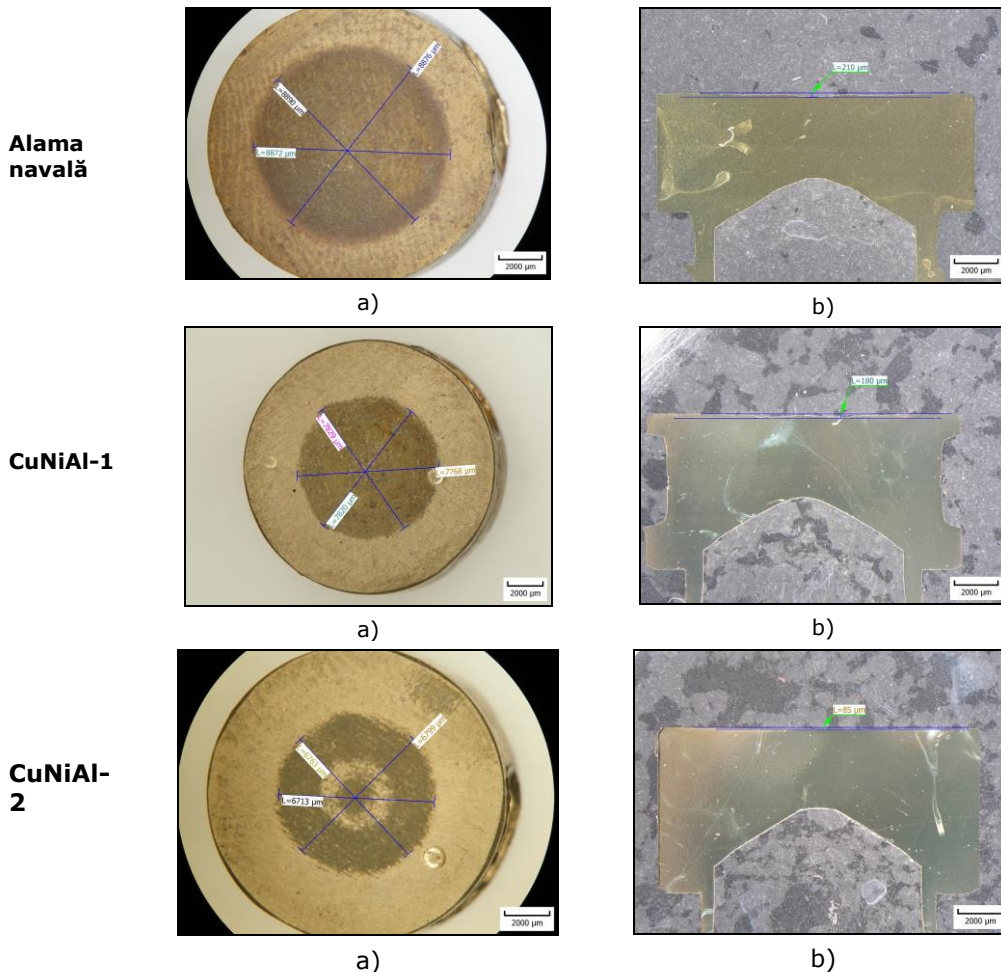


Fig. 1.5. Aspectul macroscopic după 165 minute de atac al cavitație [86]:
a-aspectul stereomicrostructural (8X);
b- adâncimea maximă de pătrundere a cavitației în secțiune (10X);

- alama prezintă cea mai ridicată adâncime maximă de pătrundere a cavitației (210 μ m) și o zonă afectată de cavitație concentrică, cu cavități fine și dispuse uniform pe întreaga suprafață;
- bronzul CuNiAl-1 are adâncimea maximă de pătrundere a cavitației de 180 μ m și prezintă o suprafață degradată prin cavitație concentrică, cavități fine și o distrugere mai intensă în centrul probei;
- bronzul CuNiAl -2 are o adâncime maximă de pătrundere a cavitației de 85 μ m, suprafața degradată fiind bine delimitată, cavități numeroase, diferite, iar centrul probei nu a fost afectat foarte mult de atacul cavitațional.

1.2.2 Considerații asupra rezultatelor obținute plan internațional

Cercetările efectuate pe plan internațional urmăresc determinarea cauzelor erodărilor produse în materialul elicei [3], [111], dar și realizarea unor relații de evaluare, pe baza corelării parametrilor specifici eroziunii cu caracteristici ale materialelor, precum corelarea parametrului MDER cu diverse proprietăți ale materialului (rezistența la rupere, limita de curgere, reziliența, duritatea) [48], [62], [63], [76], [79], [84], [90]; scopul este multiplu: de identificare a cauzelor ce determină diverse modificări structurale prin atacul cavitațional [43] și de stabilire a tehnologiilor de fabricare a unor materiale cu constituție structurală și caracteristici fizico-mecanice capabile să le confere rezistență sporită la atacul cavitațional [15], [38], [33], [66], [73], [96], [83], [113].

În ceea ce privește estimarea nivelului de distrugere cavitațională, aceasta este foarte dificilă, deoarece elicele funcționează în curent neuniform și nestaționar [31].

Distrugerea prin eroziune cavitațională, a elicelor navale, depinde de mai mulți factori ce intervin în exploatare, ca: profilul paletei, forma geometrică a paletei, dimensiunea elicei, tonajul navei, tipul regimului de cavitație, etc. Datorită imposibilității evitării acestui fenomen, oamenii de știință caută crearea unor noi materiale sau tratamente care să le mărească durata de viață [3], [15], [31], [45], [46], [53], [54], [56], [57].

În laboratoare, studiile se fac prin măsurători și observații vizuale, utilizând elici confecționate din materiale ușor distructibile, cum a procedat și Van der Meulen [15], [16], testând o elice de aluminiu supusă eroziunii timp de 40 de ore sau mai nou prin programe de simulare, acestea fiind și varianta mai economică. Cu toate că tehnologia a avansat mult, transpunerea rezultatelor din laborator pe elicea industrială este dificilă datorită efectului de scară nefinalizat [16], [51], [59], [95], [106], [117].

Distrugerile elicelor navale provocate de cavitație pot fi însemnate sau mai puțin însemnate în funcție de modul de exploatare al navelor. Boje semnaleză că distrugerile cele mai însemnate apar la elicele cargourilor și tancurilor petroliere de mare tonaj [16], [40]. În figura 1.6 se prezintă o elice utilizată la propulsarea unui nave maritime și prezintă distrugeri prin eroziune cavitațională.



Fig. 1.6 Elice de șalupă distrusă prin eroziune cavitațională, [66]

Cele mai semnificative rezultate, în domeniul cercetării degradărilor produse de eroziunea cavitației, la materialele destinate fabricării elicelor navale, sunt cele obținute de Ridley și alții (în 1976) și mai târziu de Humphries și Ridley (în 1978) și constau în investigarea fenomenului de cavitație intergranular a alamei 60/40. Astfel, se arată cum cavitațiile au fost distribuite uniform, cel mai frecvent fiind nucleate la fazele $\beta/\alpha/\beta$, în puncte triple, în timp ce creșterea lor tinde să apară de-a lungul granițelor dintre faze și nu în fazele propriu-zise [86], [123].

Studiile companiei Materion Brush [87], [122], asupra bronzului cu mangan (C67300) și bronzurilor cu staniu și plumb (C94100), au arătat ca acestea au cea mai mare pierdere în greutate și respectiv o distrugere cavitațională extrem de rapidă.

Cercetările lui Jasionowski [86], [123], privind comportarea la cavitație a bronzului cu aluminiu BA1055 au fost realizate pe trei stări ale materialului: turnat fără tratament, supus tratamentului de călire de la temperatura de 950°C urmată de revenire la 400°C și 600°C . Rezultatele arată că acest bronz (BA1055) prezintă cea mai ridicată rezistență cavitațională dintre toate aliajele de cupru utilizate pentru realizarea elicelor, cunoscute și cercetate de autor. Dintre procedeele aplicate, tratamentul de călire oferă cea mai mare rezistență cavitațională, superioară cu mult stării turnate și fără prescripție de tratament după turnare.

Xiao-Ya și alții [120], au cercetat modul de comportare cavitațională a bronzului aluminiu-nichel sudat în soluție apoasă de 3,5% NaCl. Acest bronz fiind folosit în industria navală pentru realizarea elicelor maritime, cu scopul îmbunătățirii modului de reparare a acestora. Rezultatele obținute de Xiao-Ya arată că rezistența cavitațională a zonei sudate este mai bună decât cea a materialului de bază. După 2,5 ore de atac al cavitației materialul din zona sudată, supus la eroziune, a prezentat pierderea masică cumulată de $2/3$ față de materialul de bază, iar viteza pierderii de masă a zonei sudate este $3/4$ din cea a materialului de bază. Legat de comportarea materialului depus prin sudare, la concluzii similare a ajuns și colectivul de cavitație din cadrul Universității Politehnica Timișoara, în studiile realizate pe diverse oțeluri prelevate din zonele sudate ale paletelor și rotoarelor turbinelor hidraulice [15].

Un rezultat interesant este cel obținut de Mânzană [86] pe o porțiune din vârful palei unei elice navale, realizată din bronz (Cu-Al), care a funcționat în regim de cavitație aproape 10 ani, figura 1.7.

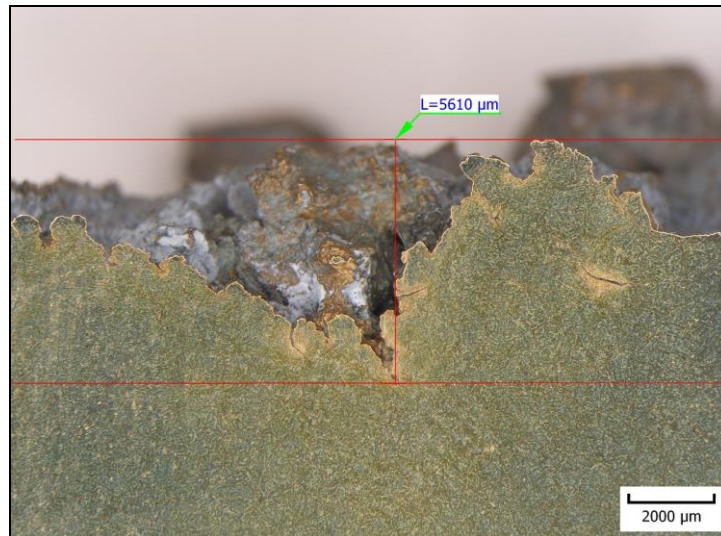


Fig. 1.7 Aspectul macrostructural al adâncimii maxime de pătrundere a eroziunii cavitației în elicea din bronz Al-Ni investigată, după examen la stereomicroscop, (10X) [86]

Investigația a fost realizată 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. Analiza a pus în evidență evoluția fenomenului de cavitație pentru întreaga porțiune afectată de cavitație. Astfel, s-a observat o structură cu aspect uniform al cavitațiilor fine și fisuri intergranulare. De asemenea, au fost evidențiate și zone cu smulgeri de grăunți și incluziuni nemetalice, figura 1.8.

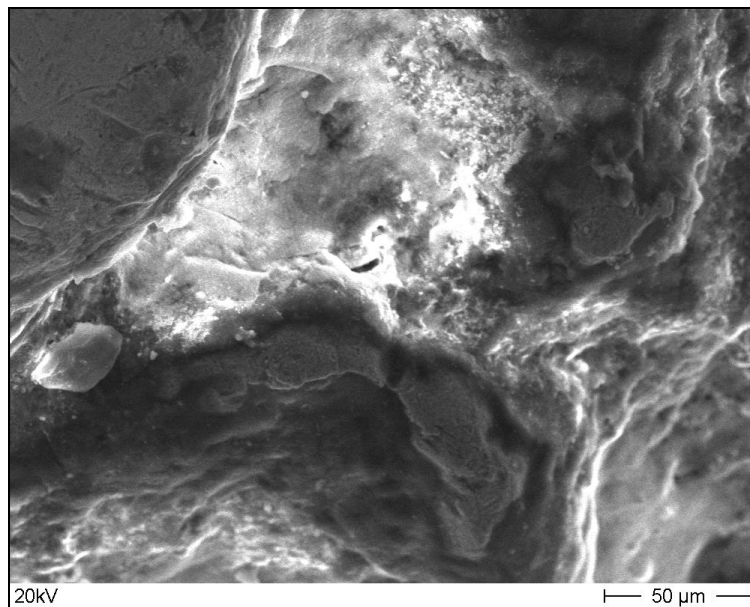


Fig.1.8 Imagini SEM ale suprafeței erodate de cavitație (500X) [86]

Concluziile finale, la care se ajunge în urma investigării zonei de pală erodată prin cavitație, funcționând timp de 10 ani în mediu marin, sunt [86]:

- **analiza macroscopică** a evidențiat că adâncimea maximă de pătrundere a cavitației are valori situate într-un domeniu foarte larg de $715 \div 5610 \mu\text{m}$;
- analiza constituțională fazică, corelată cu analiza stereomicroscopică a suprafețelor erodate prin cavitație, arată că degradarea are loc prin erodare în proporții egale, de-a lungul constituenților structurali;
- **analiza la microscopul electronic de baleiaj** a evidențiat o structură cu aspect uniform al cavităților fine și fisuri intergranulare, zone cu smulgeri de grăunți și incluziuni nemetalice.

1.3 Concluzii

Fenomenul de cavitație, fiind unul complex, este întâlnit atât în condiții de simulare în laborator cât și în condiții reale pe elicele navale.

Materialele cercetate la eroziunea cavitației sunt foarte diferite: fonte, oțeluri slab aliate, oțeluri inoxidabile, alame și bronzuri navale.

Cercetările de laborator, oferite de literatura de specialitate, sunt realizate cu precădere pe alame și bronzuri navale (cu aluminiu și nichel, respectiv cu aluminiu, nichel și mangan) și au avut drept scop doar evidențierea rezistenței la atacurile cavitației. De asemenea, se constată penuria cercetărilor privind utilizarea diferitelor tehnici și procedee de îmbunătățire a comportamentului și rezistenței la cavitație a suprafețelor aliajelor cu bază de cupru, folosite în fabricarea elicelor navale. Literatura parcursă arată doar efectul tratamentului termic de călire, respectiv de călire și revenire, care produce modificări ale caracteristicilor mecanice în ansamblul structurii aliajului, cu influență asupra comportării la atacul cavitației.

Se constată scăderea interesului pentru folosirea oțelurilor inoxidabile la realizarea elicelor navale.

Se constată existența unor cercetări insuficiente privind investigarea, prin mijloace specifice și cu aparatura adecvată, a evoluției eroziunii în structura aliajelor, pentru a înțelege mecanismul degradării, în vederea stabilirii unor căi de creștere a rezistenței la solicitările generate de impactul cu undele de șoc și microjeturile rezultate din implozia bulelor cavitaționale.

Dintre aliajele folosite la turnarea elicelor, alamele prezintă cea mai slabă comportare la eroziunea prin cavitație, iar oțelurile inoxidabile și bronzurile cu aluminiu prezintă cea mai ridicată rezistență cavitațională.

Actualmente, bronzurile de tip CuNiAl, respectiv cele de tip Cu-Al-Ni-Fe-Mn sunt tot mai des utilizate în turnarea elicelor navale, datorita caracteristicilor mecanice și tehnologice ridicate; rata de utilizare, în fabricarea elicelor, ajungând până la circa 82%.

Studiul realizat pe elicea unui cargou, care a funcționat ani de zile în apă marină, arată că distrugerea diferă, ca intensitate și profunzime, între diversele zone ale palei (la vârf și la butuc).

Unele studii arată că alierea cu mangan poate duce la sporirea rezistenței elicei la cavitație, însă cercetările, în această direcție, trebuie continuate pentru a crește gradul de certitudine.

Literatura de specialitate oferă foarte puține date despre utilizarea diferitelor procedee ca: tratamentul termic, tratarea cu fascicul laser a suprafețelor atacate ca efect al cavitație, acoperirea zonelor atacate de cavitație prin pulverizare termică și tratare cu laser, etc, ca metode de îmbunătățire a rezistenței și comportamentului bronzurilor la eroziunea prin cavitație.

Cercetarea fenomenului de eroziune prin cavitație, în laborator, pe aparate cu intensitate ridicată de distrugere, cum sunt aparatele vibratorii, rămâne soluția optimă pentru obținerea informațiilor despre efectul diverselor constituții structurale, influența elementelor de aliere și aplicarea tehnicilor și procedeele de modificare a comportamentului și rezistenței structurii sau suprafeței materialului la atacurile prin cavitație.

Pentru obținerea unor informații cât mai complete despre comportarea și rezistența la eroziunea prin cavitație, se impune corelarea analizelor efectuate pe baza curbilor și parametrilor specifici eroziunii, cu investigațiile macro și microstructurale realizate cu aparatura optică și electronică performantă.

Utilizarea noilor tehnologii (tratare cu laser, folosirea diverselor materiale pentru tratamentele de suprafață, etc), dar și a procedeele de tratament tradiționale, prin care rezistența la cavitație se poate îmbunătăți, trebuie să rămână și în continuare obiective ale cercetărilor din domeniul eroziunii prin cavitație.

1.4 Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele abordate și rezolvate în cadrul tezei sunt:

1 - cercetarea comportamentului și rezistenței la cavitație vibratoare a bronzului **CuAlNiFeMn (AMPCO 45)**, în patru stări diferite (stare livrată, tratat termic, durificat la suprafața expusă cavitației cu fascicul laser (prin trei regimuri diferite) și respectiv prin pulverizare termică urmată de tratare cu laser (două regimuri diferite)).

2 - realizarea testelor de eroziune prin cavitație în aparatul vibrator standard, cu cristale piezoceramice, T2 (amplitudinea vibrațiilor = 50 μ m, frecvența vibrațiilor = 20000 \pm 3% Hz, diametrul probei = 15,8mm), construit după normele ASTM G32-2010, care, prin modificările și dotările realizate în cadrul tezei și folosirea unei interfețe, asigură afișare pe ecran, constanța și controlul, prin computer, a parametrilor funcționali ai procesului de eroziune. Aparatul este în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Cu actuala dotare și modernizare este cel mai performant dintre toate aparatele de acest tip, aflate în laboratoarele de cavitație, din țară și ale marilor centre de cercetare din lume.

3 - analiza comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitație pe baza curbilor caracteristice MDE(t), MDER(t) cu punerea în evidență a efectelor compoziției chimice, a principalelor proprietăți mecanice și tipurilor de tratamente și regimuri specifice aplicate. Această analiză aduce elemente noi față de cele obținute prin simpla comparare cu caracteristicile cavitaționale ale materialelor etalon [15], [38, [66], [73], [46], [100], [110], [112], [116];

4 - investigarea macro și microstructurală cu aparatură optică și electronică de ultimă generație, pentru studierea mecanismului de generare și propagare a fisurilor și ruperilor, pentru fiecare dintre tipurile de probe testate;

5- compararea rezultatelor obținute, prin folosirea metodelor recomandate de normele ASTM G32-2010 [121] și evidențierea rezistenței dobândite prin utilizarea parametrilor rezistența normalizată la cavitație R_{ns} și durabilitatea medie, definită de Steller [15], [114].

Noutatea tezei de doctorat:

Noutatea tezei de doctorat constă în aducerea de elemente noi și originale pentru îmbunătățirea comportamentului și creșterea rezistenței la cavitația vibratoare a bronzurilor CuAlNiFeMn prin folosirea unor tratamente noi, prin care se modifică caracteristicile mecanice și structurale ale suprafeței expuse atacului prin cavitație. Compararea rezultatelor cu parametrii și curbele specifice ale materialelor etalon pentru Laboratorul de Cavitație al U.P. Timișoara (bronzul naval CuNiAl III-RNR și oțelul inoxidabil OH12NDL) arată că metodele cercetate pot fi soluții de creștere a duratei de viață a elicelor navale, prin sporul adus rezistenței la eroziunea cavitațională.

2. STAND EXPERIMENTAL DOTAT CU ECHIPAMENT DE ACHIZIȚII DATE ÎN TIMP REAL DESTINAT CERCETĂRIILOR DE EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE VIBRATOARE

Programul de cercetare doctorală a inclus conceperea unui proiect de modernizare a standului experimental existent, prin interfațarea acestuia cu un sistem de achiziție date în timp real, destinat cercetării de eroziune prin cavitație vibratoare.

În fig. 1 este prezentat acest stand cu aparatura componentă.

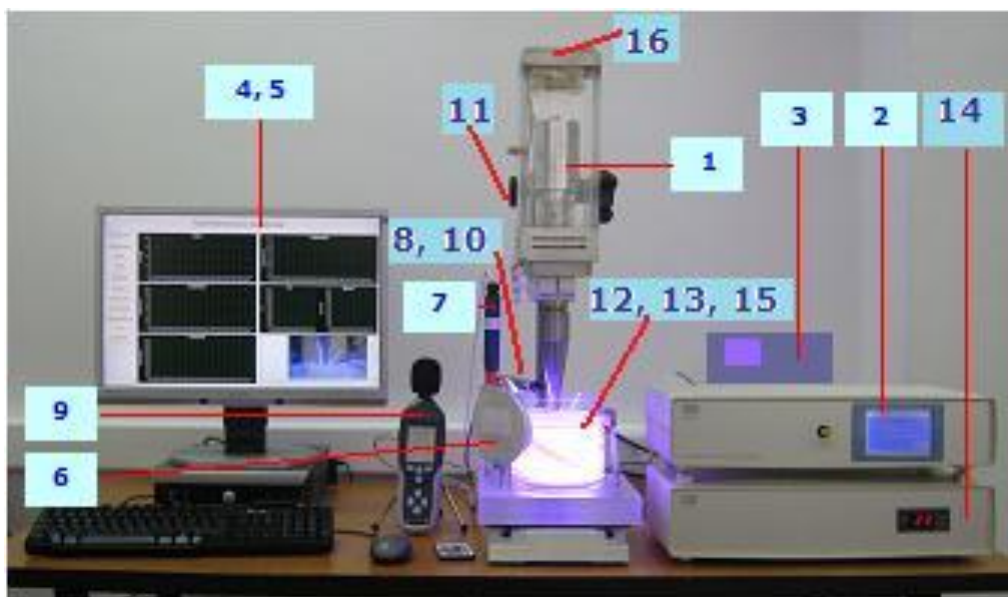


Fig. 2.1 Stand experimental dotat cu echipament de achiziții date în timp real destinat cercetărilor de eroziune prin cavitație vibratorie

Principalele caracteristici tehnice ale modulelor și componentelor standului experimental, dotat cu echipament de achiziții date în timp real, sunt prezentate în tabelul 2.1

26 Stand experimental dotat cu echipament de achiziții date în timp rea I - 2

Tabelul 2.1 Elementele componente ale standului experimental-caracteristici tehnice

	Componenta	Caracteristici tehnice
1	Ansamblul rezonator mecanic	20 kHz +/- 200Hz
2	Generator ultrasonic	240V/50Hz,20kHz, 500W
3	Automat programabil XBC-D2-64H	AC100~220V,DC24V Input /Output 32
4	Interfața achiziției date	DC24V Input /Output 32
5	Sistem operare DELL OPTIPLEX 745	250GB HDD, RAM 2048MB
6	Monitor LCD PHILIPS	19" ,TFT, interfata DVI-D
7	Sistem vizualizare HD NetWorking PLANET	Full HD,2 Duo 2,0GHz
8	pH-metru ProMinent	pH 1...12, T=0...80 °C
9	Senzor infraroșu de temperatura OMEGA Engineering.Inc	OB 211-MT
10	Senzor temperatură	0-100°C
11	Suport ansamblu rezonator mecanic	Reglaj cursa 200mm
12	Recipient de activare cavitațională	1,5 l
13	Sistem de răcire recipient activare cavitațională	19-22° C, 5 l/ minut
14	Sistem de recirculare și filtrare	24V DC, 5 l / minut
15	Sistem de iluminare recipient de activare	LCD, 50 LUX
16	Sistem ventilare ansamblu rezonator	5 V DC, 1Nm ³ / minut

2.1 Structura sistemului ultrasonic de 20 KHz

Ansamblul vibrator, care constituie fundamentul aparatului pentru generarea cavitației vibratoare, este format dintr-un generator electronic de ultrasunete și un ansamblul rezonator mecanic, fig. 2.2. De modul în care acestea sunt dimensionate și racordate la frecvența de rezonanță depinde obținerea amplitudinii și frecvenței vibrațiilor, la suprafața probei ce urmează a fi erodată prin cavitație [1], [34], [35], [50], [107].

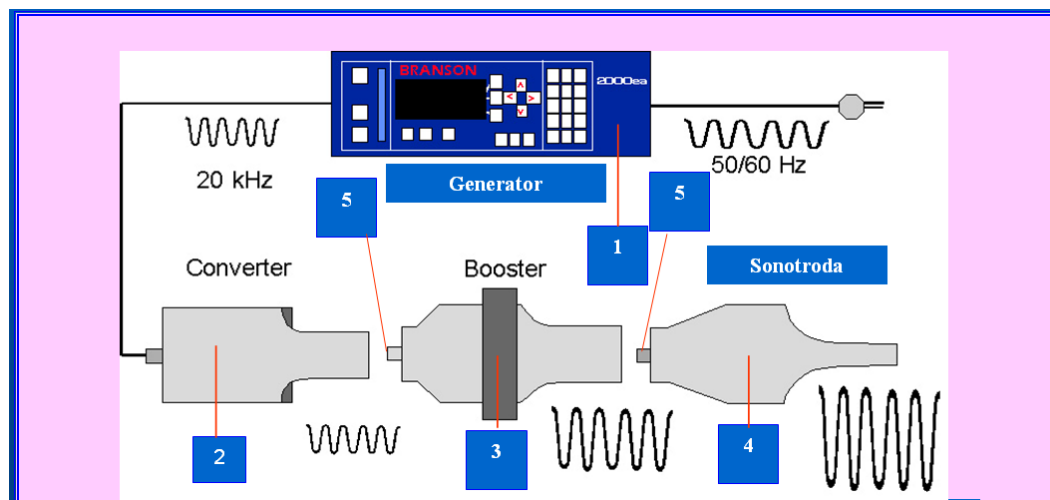


Fig. 2.2 Structura sistemului ultrasonic de 20 KHz

În continuare se prezintă elemente de descriere, dimensionare și de punere în funcțiune a standului, cu detalii privind realizarea echipamentului pentru controlul procesului cavitațional și achiziționarea datelor în timp real.

2.1.1 Cerințele tehnice ale sistemului

Prezentarea de mai jos, a cerințelor și rolului funcțional al elementelor ce intră în componența sistemului ultrasonic pentru realizarea vibrațiilor cu o frecvență de 20 KHz și o amplitudine de 50 μm , se face în concordanță cu pozițiile din fig.2.2

Generatorul electronic de ultrasunete, poz.1 este alimentat la o linie de tensiune de 220/50 Hz, frecvența de lucru fiind reglabilă între 20000 Hz \pm 200 Hz. Echipamentul destinat cavitației ultrasonice este dotat cu un generator cu o putere maximă de 500 W.

Generatorul convertește tensiunea convențională la 50-60 Hz în energie electrică la 20-40 KHz și este proiectat pentru funcționare la o durată de acțiune „DA” de maxim 90 %. Energia electrică de frecvență ridicată este aplicată ansamblului rezonator mecanic, format din convertorul piezoceramic, poz. 2, transformatorul (boosterul) poz. 3, și sonotroda, poz. 4, care transformă oscilațiile electrice de frecvență înaltă, în vibrații mecanice de frecvență înaltă.

Ansamblul rezonator mecanic are în componența sa trei elemente de bază: transductorul cu cristale piezoceramice, un booster (transformator de amplitudine) și o sonotradă, la al cărei capăt inferior este fixată proba de cavitație (cu filet interior-notată **tip A** și cu filet exterior – notată **tip B**).

Pentru producerea cavitației este obligatoriu ca ansamblul booster-sonotrod-proba să fie racordate la frecvența transductorului cu cristale piezoceramice (numit și convertor), indiferent de materialul din care sunt fabricate [7], [37], [36], [118]. Excitarea convertorului este realizată cu ajutorul generatorului electronic de ultrasunete.

Convertorul (cunoscut sub denumirea de transductor piezoceramic) transformă energia electrică de înaltă frecvență, produsă de generator, în energie mecanică. Pentru a se asigura absorbția oscilațiilor de către componentele convertorului acestea se pretensionează prin aranjarea inelelor piezoceramice în perechi, pe direcție axială. În acest fel, frecvența de rezonanță a convertorului este corelată cu frecvența de lucru a generatorului ultrasonic.

Transductorul este realizat din zircotitanat de plumb cu caracteristici electrostrictive care, fiind supus unei tensiuni pulsatorii, se dilată și se contractă. Eficiența transductorului este de 90-95 %.

Pentru a realiza un acord acustic foarte bun între mărimile de ieșire ale transductorului și sonotrodă este necesară intercalarea unui **booster (transformator)** între cele două elemente constructive ale echipamentului de activare cavitațională.

Boosterul este proiectat să intre în rezonanță la aceeași frecvență cu transductorul cu care va fi utilizat și, de obicei, este montat într-un punct nodal (de vibrație minimă) pentru a minimaliza pierderile de energie și pentru a preveni transmiterea ultrasunetelor în batiu. Cuplajul axial și mecanic se realizează prin șuruburi de strângere și, astfel, este asigurat transferul energiei ultrasonice către booster și sonotrodă. Boosterul are rol de transformator de amplitudine pentru întreg domeniul de amplitudini necesare procesului, cât și rol de stabilizator general pentru oscilațiile sistemului transductor.

Sonotroda are rolul de a transmite vibrațiile, cu frecvență ultrasonică, de la elementul transductor la specimenul de testare (proba cavitațională), forma sonotrodei influențând factorul de amplificare [1], [35], [44], [90].

Suprafețele de cuplare ale sonotrodei și convertorului trebuie să fie complet aliniată, prin intermediul niplurilor de cuplare, poz. 5, pentru a preveni pierderile de energie în timpul transferului acesteia.

Pentru a realiza un acord acustic foarte bun între mărimile de ieșire ale transductorului și sonotrodă este necesară intercalarea unui transformator de amplitudine între cele două elemente constructive ale echipamentului de activare ultrasonică [1], [10], [35], [44].

Pentru a obține o acțiune mecanică foarte bună și de durată mare este absolut necesar ca materialul din care este realizată sonotroda să aibă proprietăți acustice foarte bune și, de asemenea, o rezistență ridicată la uzură. Materiale recomandate pentru construcția sonotrodelor sunt: monel, oțel inoxidabil și aliaje de titan [36], [37]. Acestea din urmă, cu rezistență ridicată, depășesc considerabil alte materiale din punct de vedere al rezistenței la uzură și, din acest motiv, sunt folosite în mod uzual la fabricarea sonotrodelor pentru echipamentele folosite în linii de fabricație industrială și în echiparea standurilor de testare la eroziune cavitațională.

Funcționarea echipamentului specializat, de testare la eroziune cavitațională, este dată de componenta software a modulului de comandă și programare a echipamentului care realizează următoarele funcții :

- asigurarea dialogului cu utilizatorul prin intermediul tastaturii și afișajului;
- generarea semnalelor de PWM ;
- afișarea elementelor de sistem ;
- generarea ciclogramei de prelucrare cavitațională.

2.1.2 Dimensionarea sonotrodei cu program software specializat, pentru proba cu filet interior (Specimen AMPCO 45 tip A)

Dimensiunile geometrice exterioare ale sonotrodei, pentru activare cavitațională cu specimen AMPCO 45 tip A, la frecvența de rezonanță de 20 KHz, rezultate din programul de simulare [44] sunt prezentate în figura 2.3 și figura 2.4.

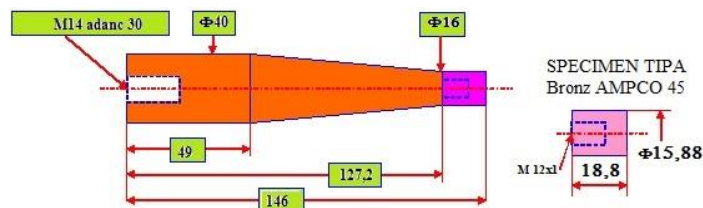


Fig. 2.3 Sonotroda Titan Grade 5, pentru activare cavitațională cu specimen AMPCO 45 tip A - frecvența de rezonanță 20 KHz

SURFACE	TYPE	X_END	DIAMETER	ANGLE	RADIUS	MATERIAL
5e	∅ Straight	146.00	16.00	0.00		Material X-10
4e	∅ Straight	127.20	16.00	90.00		Material X-10
3e	∅ Straight	127.20	16.00	-8.72		Ti-6Al-4V rod
2e	∅ Straight	49.00	40.00	0.00		Ti-6Al-4V rod
1e	∅ Straight	0.00	40.00	90.00		Ti-6Al-4V rod
0e	-----	0.00	0.00	0.00		---

Fig. 2.4 Dimensiuni exterioare ale sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A, introduse în programul de simulare (frecvența de rezonanță 20 KHz)

Materialul utilizat în construcția sonotrodei este aliaj de titan de înaltă rezistență, Titan Grade 5, având caracteristicile mecanice și acustice prezentate în tabelul din figura 2.5. Variația vitezei de propagare a sunetului în aliajul de titan, în funcție de temperatură, este prezentată în diagrama din figura 2.6.

MATERIAL PROPERTIES MENU (1)	
Information	
Material name	Ti-6Al-4V rod
Thin-wire wave speed	4865 m/sec at 24 °C
Modulus of elasticity	114.2 GPa
Density	4429 kg/m ³
Poisson's ratio	0.33
Q	26000

Fig.2.5 Caracteristici mecanice și acustice Titan Grade 5

Fig. 2.6 Variația vitezei de propagare a Forma dimensională rezultată în urma autocalibrării transformatorului de amplitudine este prezentată în figura 2.7.

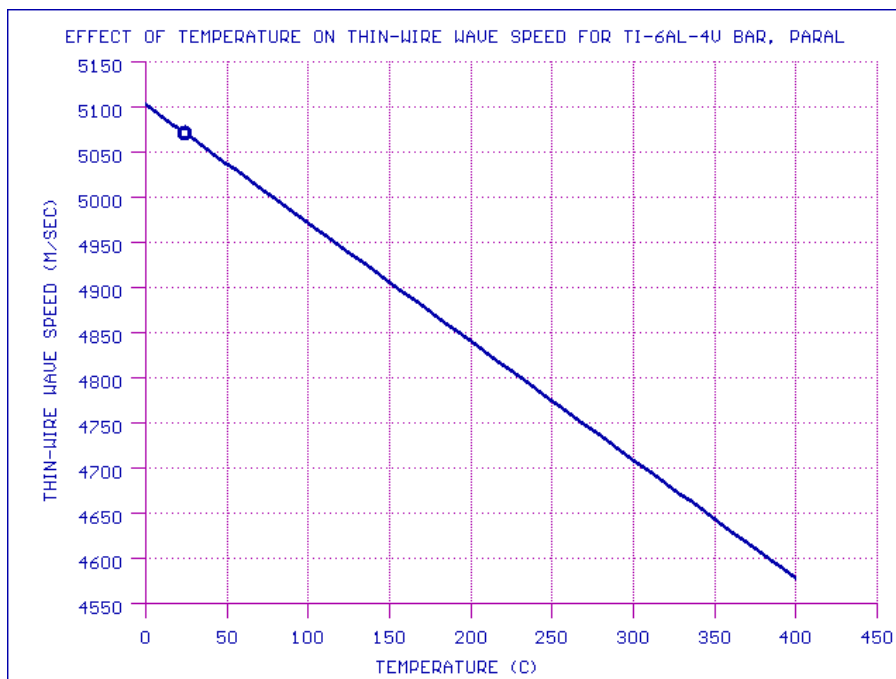


Fig. 2.7 Forma dimensională a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

Elementele de caracterizare ale sonotrodei cu specimen AMCO 45 tip A, pentru frecvența de rezonanță de 20 KHz, rezultate din programul de simulare, sunt prezentate în figura 2.8

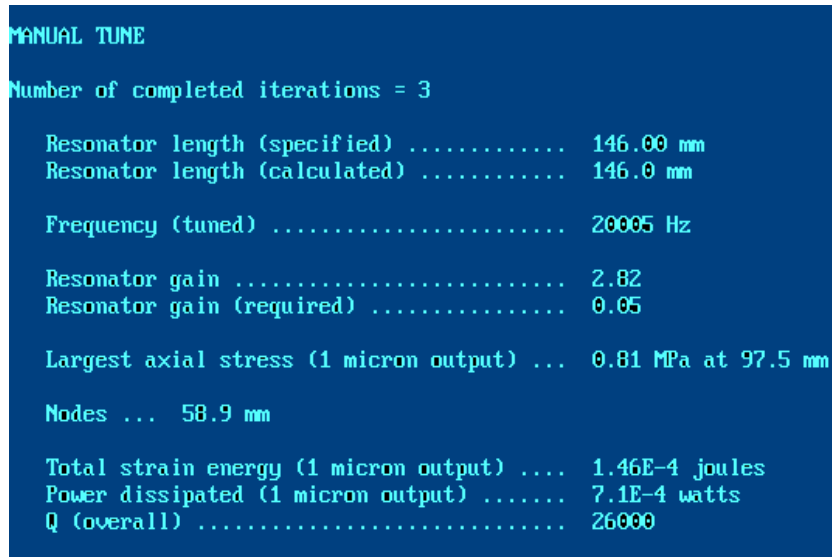


Fig. 2.8 Elementele de caracterizare a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea tensiunii axiale, figura 2.9, evidențiază un maxim rezultat în urma simulării având valoarea de 0,81 MPa, la cota X= 97,5 mm pentru 1 micron amplitudine.

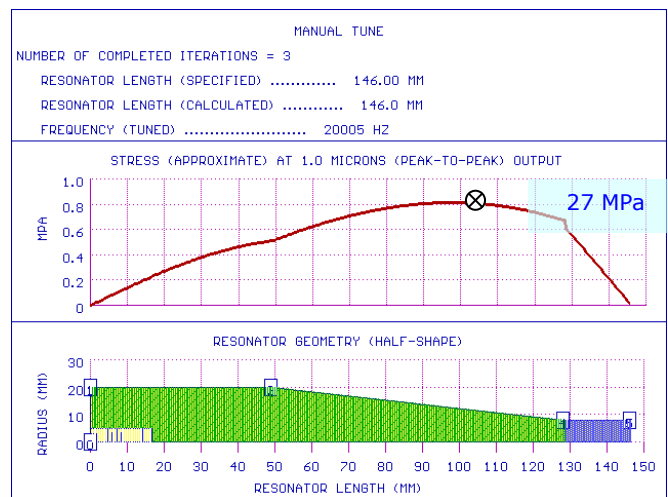


Fig. 2.9 Tensiunea axială a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea variației amplitudinii de oscilație, figura 2.10, în lungul transformatorului de amplitudine, evidențiază un punct nodal de oscilație zero la coordonata X= 58,9 mm.

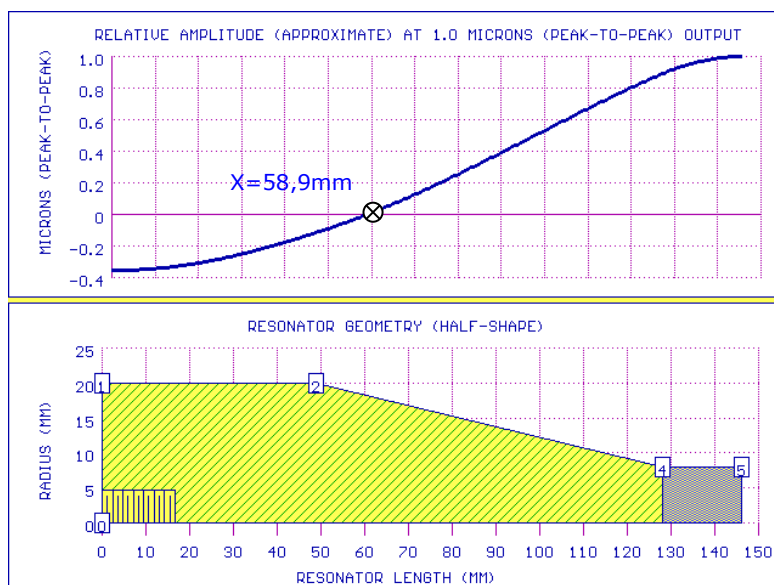


Fig. 2.10 Variația amplitudinii la frecvența 20 KHz, a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A

Energia de deformație cumulată - în volum și liniară, în structura internă a sonotrodei cu specimen AMPCO45 tip A, pentru frecvența de vibrație de 20 KHz, prezentată în diagrama din figura 2.11, are o valoare maximă de $1,46 \cdot 10^{-4}$ Joule, pentru 1 micron amplitudine.

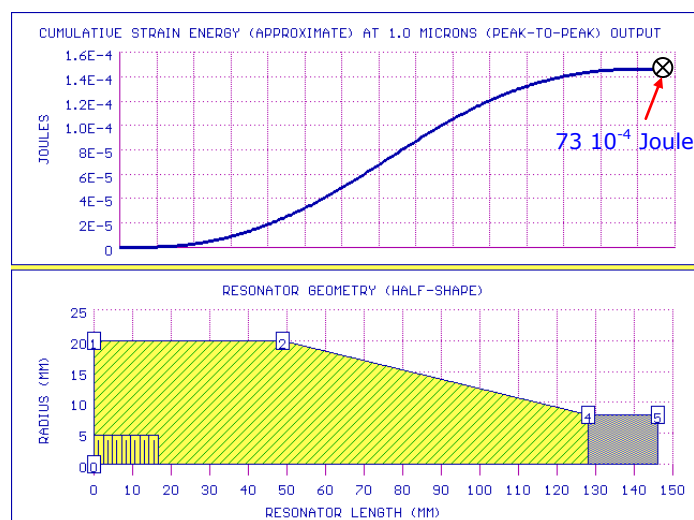


Fig. 2.11 Reprezentarea energiei de deformație cumulată la frecvența 20 KHz, a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A

Pierderile de energie cumulate - în volum și liniară, în structura internă a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A, pentru frecvența de 20 KHz, prezentată în diagrama din figura 2.12, au o valoare maximă de $7,1 \cdot 10^{-4}$ W, pentru 1 micron amplitudine.

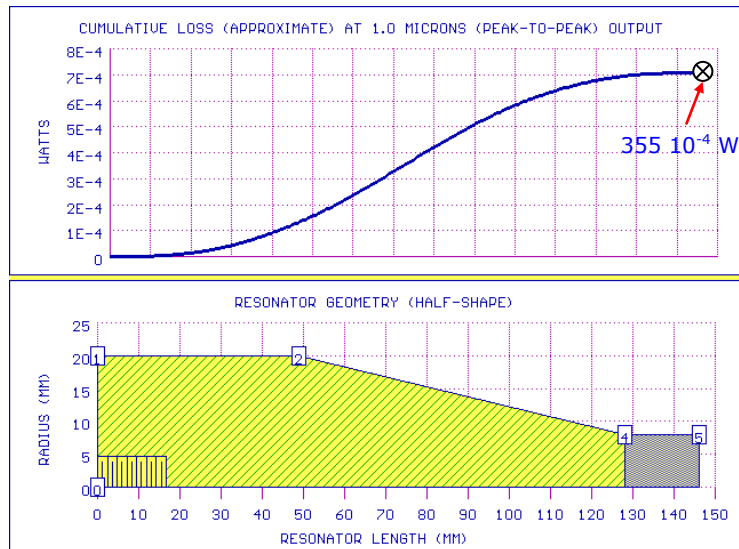


Fig. 2.12 Reprezentarea pierderilor de energie cumulată la frecvența 20 KHz, a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip A

2.1.3 Dimensionarea sonotrodei cu program software specializat, pentru proba cu filet exterior (specimen AMPCO 45 tip B)

Dimensiunile geometrice exterioare ale sonotrodei pentru activare cavitațională cu specimen AMPCO 45 tip B, la o frecvență a vibrațiilor de 20 kHz, rezultate din programul de simulare [44], sunt prezentate în figura 2.13 și figura 2.14

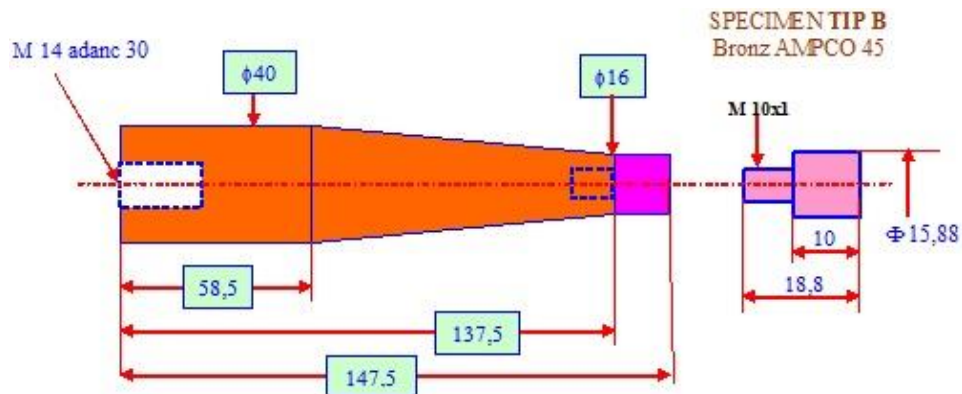
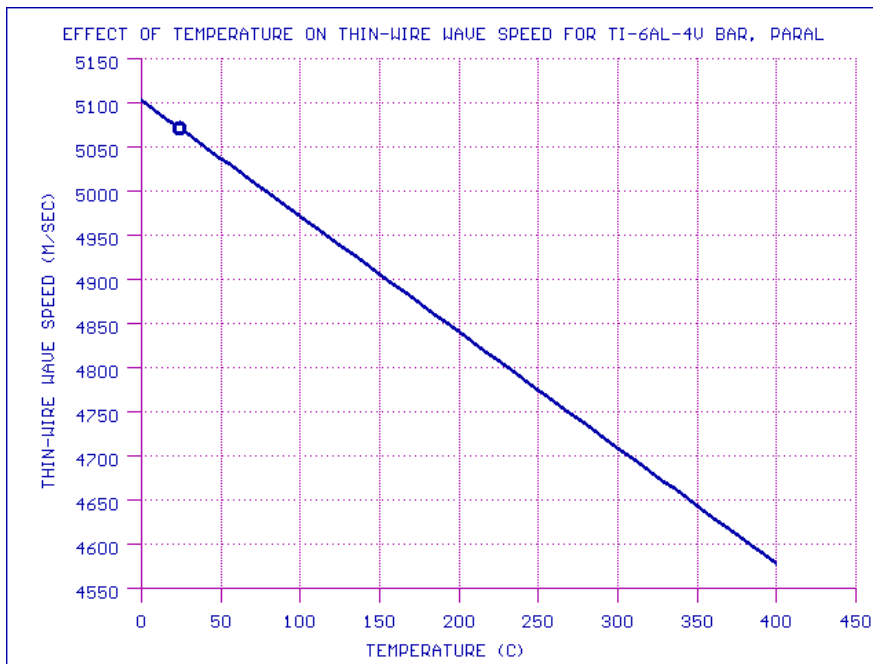


Fig. 2.13 Sonotroda Titan Grade 5, pentru activare cavitațională cu specimen AMPCO 45 tip B, frecvență de vibrație 20 KHz

FILE	GRAPH	OPTION	EQUATION	HELP	ABOUT	RADIUS	MATERIAL	M
SURFACE	TYPE	X_END	DIAMETER	ANGLE	RADIUS	MATERIAL		
5e	∅ Straight	147.00	6.00	0.00		Material X-10		
4e	∅ Straight	137.00	16.00	90.00		Material X-10		
3e	∅ Straight	137.00	16.00	-8.64		Ti-6Al-4U rod		
2e	∅ Straight	58.00	40.00	0.00		Ti-6Al-4U rod		
1e	∅ Straight	0.00	40.00	90.00		Ti-6Al-4U rod		
0e	-----	0.00	0.00	0.00		---		

Fig. 2.14 Dimensiuni exterioare ale sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B, introduse în programul de simulare, frecvența de vibrație 20 KHz

Materialul utilizat în construcția sonotrodei este, de asemenea, aliaj de titan de înaltă rezistență, Titan Grade 5, având caracteristicile mecanice și acustice prezentate în tabelul din figura 2.5. Variația vitezei de propagare a sunetului în aliajul de titan, în funcție de temperatură, este prezentată în diagrama din figura 2.15.



Forma dimensională rezultată în urma autocalibrării transformatorului de amplitudine este prezentată în figura 2.16.

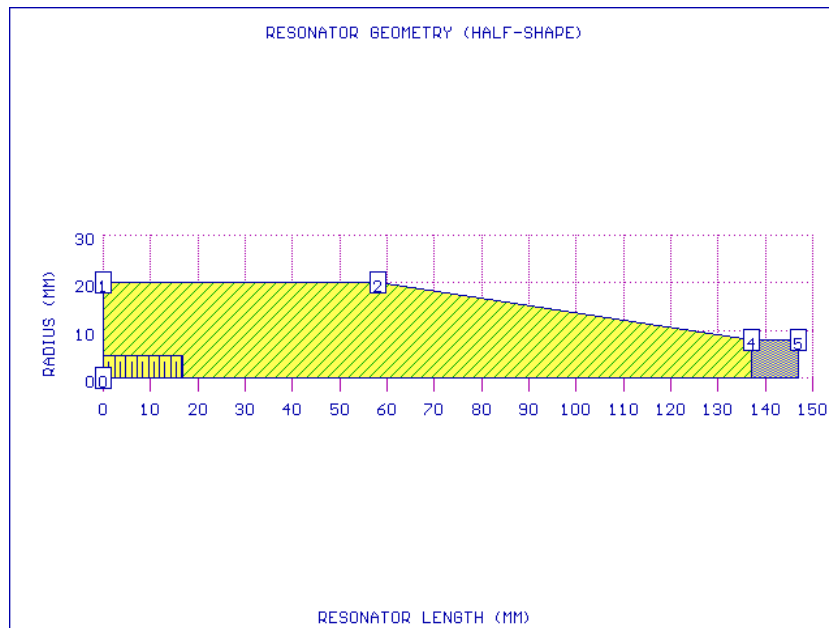


Fig. 2.16 Forma dimensională a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B frecvența vibrațiilor 20 KHz

Elementele de caracterizare ale sonotrodei cu specimen AMCO 45 tip B, 20 KHz, rezultate din programul de simulare, sunt prezentate în figura 2.17.

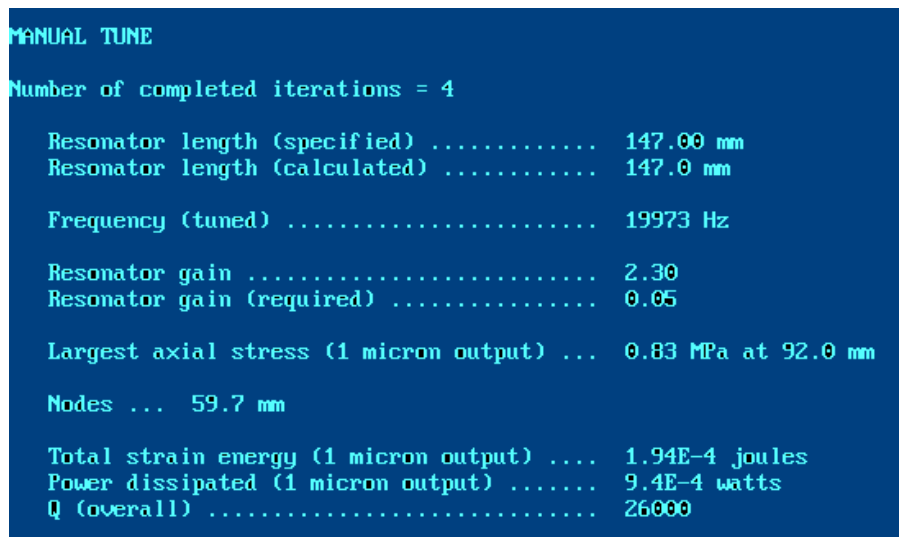


Fig. 2.17 Elementele de caracterizare a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea tensiunii axiale, figura 2.18, evidențiază un maxim rezultat în urma simulării având valoarea de 0,83 MPa, la cota X= 92,0 mm pentru 1 micron amplitudine.

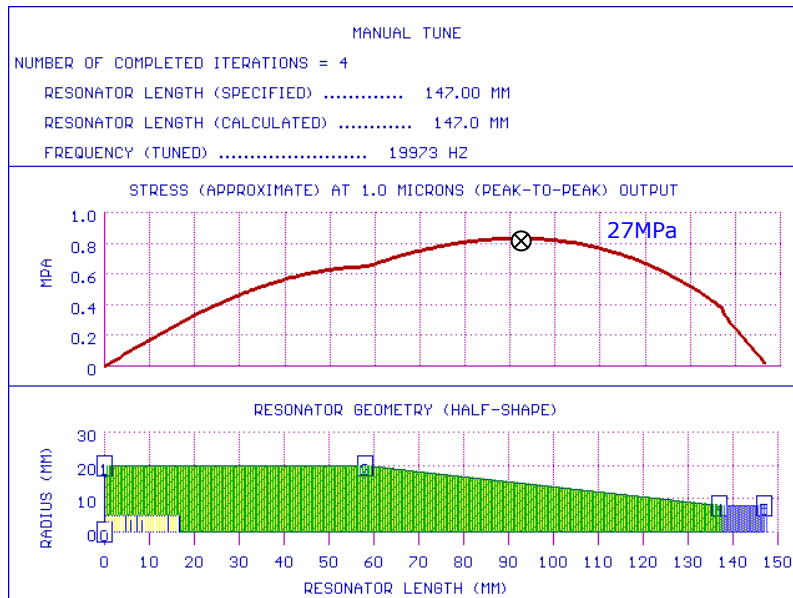


Fig. 2.18 Tensiunea axială a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B, frecvența de rezonanță 20 KHz

Reprezentarea variației amplitudinii de oscilație în lungul transformatorului de amplitudine, figura 2.19, evidentază un punct nodal de oscilație zero la coordonata X= 59,7 mm.

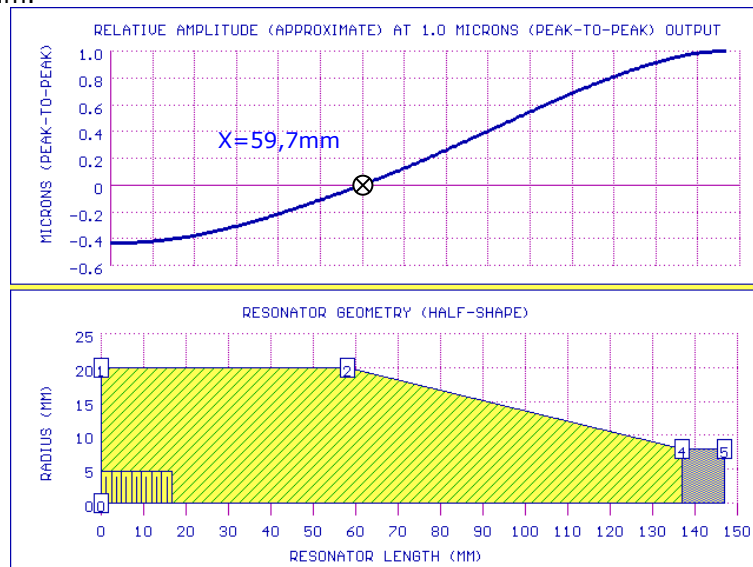


Fig. 2.19 Reprezentarea variației amplitudinii la frecvența 20 KHz, a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B

Energia de deformare cumulată - în volum și liniară, în structura internă a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B, pentru o frecvență a vibrațiilor de 20 kHz,

prezentată în diagrama din figura 2.20, are o valoare maximă de $1,9 \cdot 10^{-4}$ Joule, pentru 1 micron amplitudine.

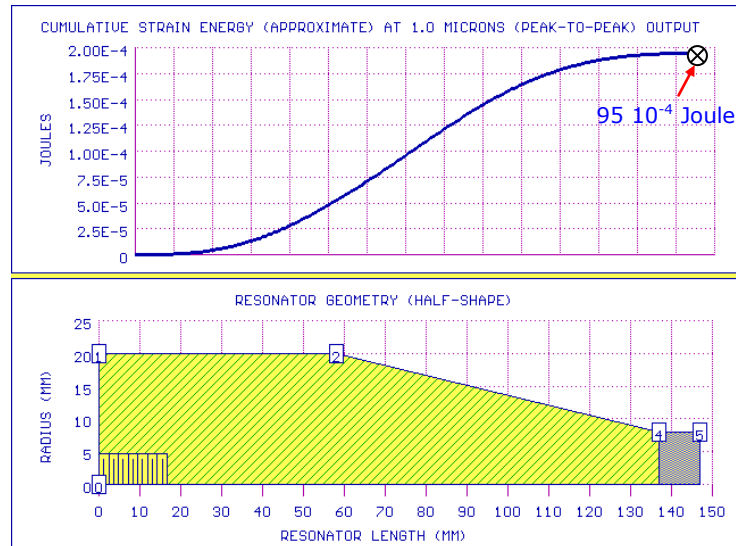


Fig. 2.20 Reprezentarea energiei de deformație cumulată la frecvența 20 KHz a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B

Pierderile de energie cumulate - în volum și liniară, în structura internă a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B, pentru frecvența de 20 KHz, figura 2.21, au o valoare maximă de $9,4 \cdot 10^{-4}$ W, pentru 1 micron amplitudine.

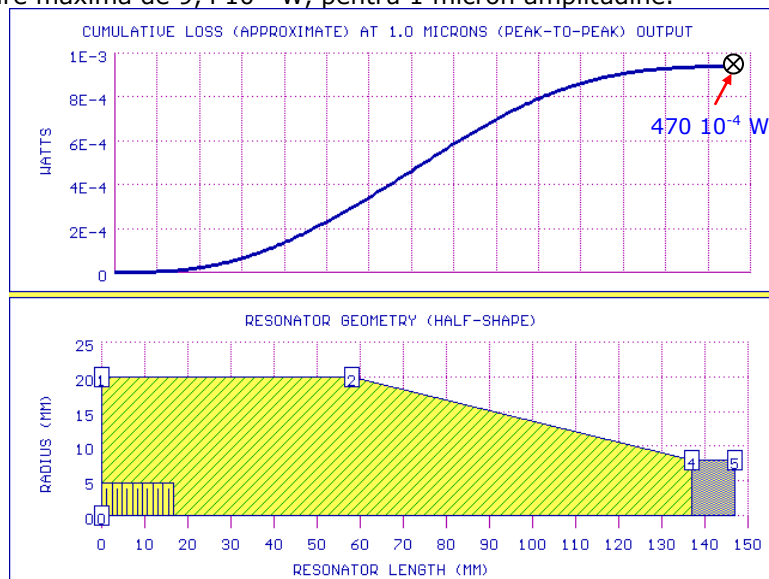


Fig. 2.21 Reprezentarea pierderilor de energie cumulată la frecvența 20 KHz a sonotrodei cu specimen AMPCO 45 tip B

2.1.4 Dimensionarea transformatorului de amplitudine cu program software specializat, pentru frecvența vibrațiilor de 20 KHz

Dimensiunile geometrice exterioare ale transformatorului de amplitudine, pentru specimenul AMPCO 45 tip A, rezultate din programul de simulare [44], sunt prezentate în figura 2.22 .

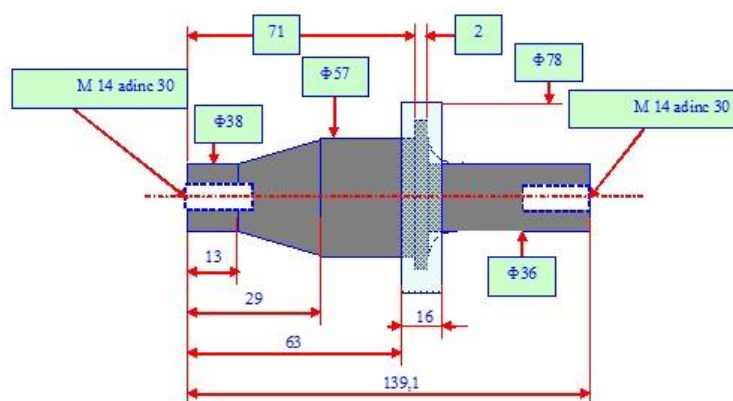


Fig. 2.22 Transformator de amplitudine , pentru activare cavitațională, frecvența vibrațiilor de 20 KHz

Forma dimensională rezultată în urma autocalibrării transformatorului de amplitudine este prezentată în figura 2.23.

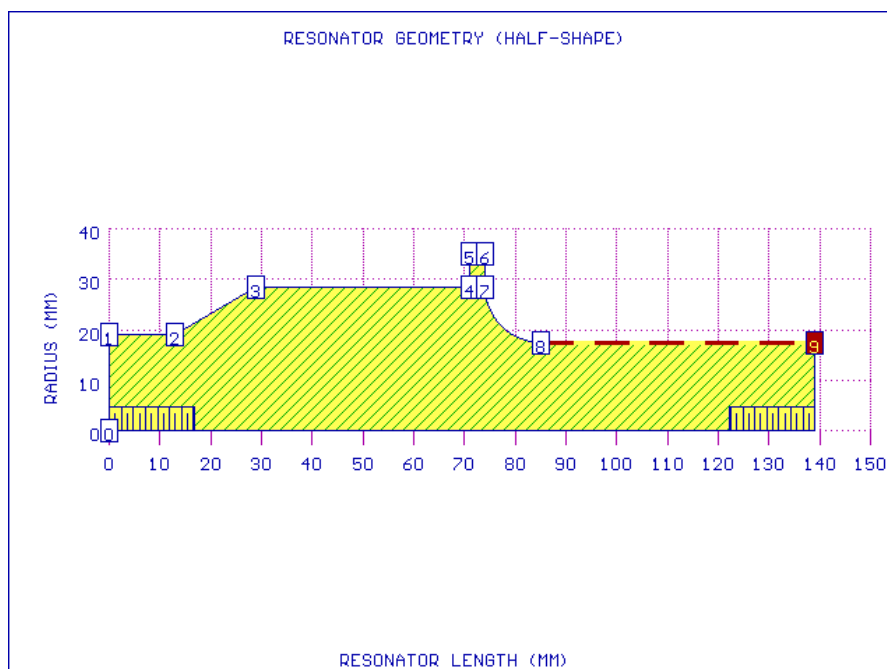


Fig. 2.23 Forma dimensională a transformatorului de amplitudine cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența vibrațiilor 20 KHz

Elementele de caracterizare ale transformatorului de amplitudine la o frecvență de 20 KHz, rezultate din programul de simulare, sunt prezentate în figura 2.24.

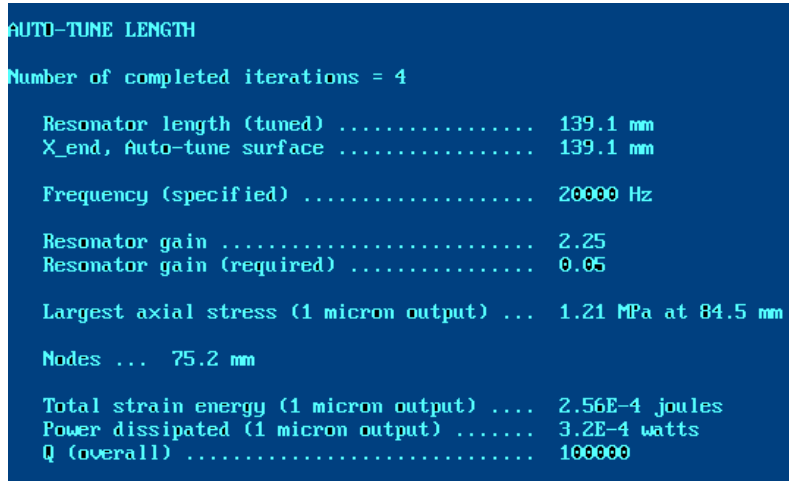


Fig. 2.24 Elementele de caracterizare transformatorului de amplitudine, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea tensiunii axiale, figura 2.25, evidențiază un maxim de 1,21 MPa, rezultat în urma simulării, la cota X= 75,2 mm, pentru 1 micron amplitudine.

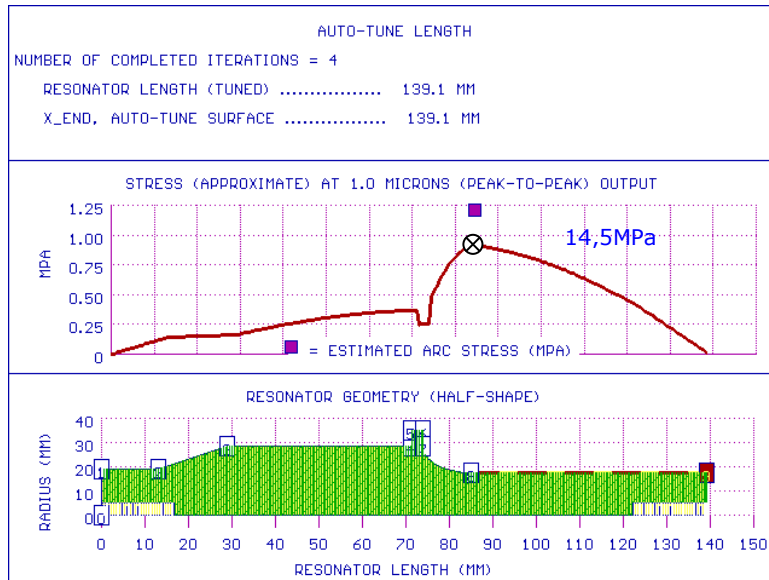


Fig. 2.25 Tensiunea axială a transformatorului de amplitudine, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea variației amplitudinii de oscilație, în lungul transformatorului de amplitudine, evidențiază un punct nodal de oscilație zero la coordonata X= 75,2 mm, figura 2.26.

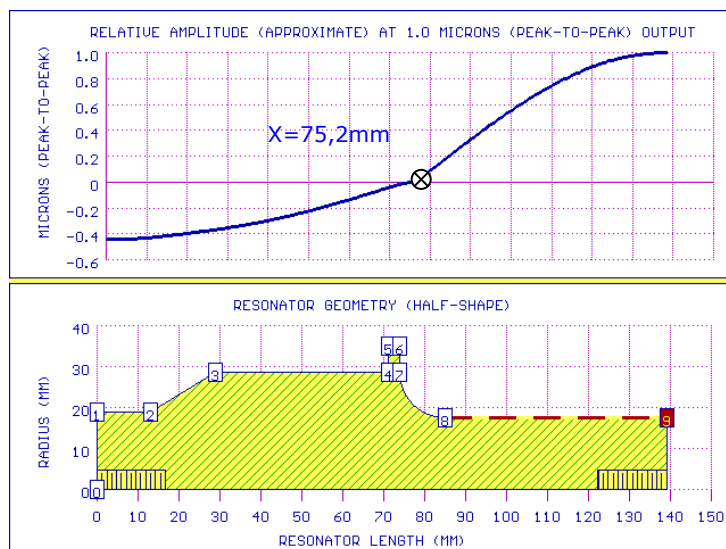


Fig. 2.26 Reprezentarea variației amplitudinii în lungul transformatorului acustic, la frecvența de 20 KHz

Energia de deformare cumulată - în volum și liniară, în structura internă a transformatorului de amplitudine monobloc, pentru frecvența de 20 KHz, figura 2.27, are o valoare maximă de $2,56 \cdot 10^{-4}$ Joule, pentru 1 micron amplitudine.

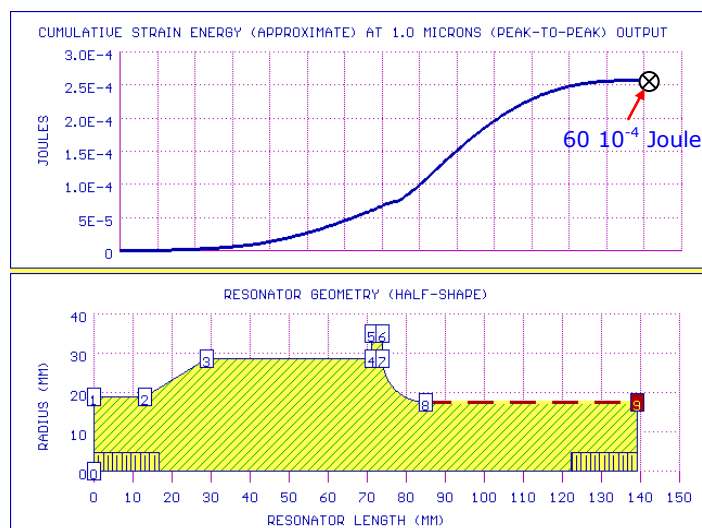


Fig. 2.27 Reprezentarea energiei de deformare cumulată, la frecvența 20 KHz

Pierderile de energie cumulate - în volum și liniară, în structura internă a transformatorului de amplitudine monobloc, pentru frecvența vibrațiilor de 20 KHz, figura 2.28, au o valoare maximă de $3,2 \cdot 10^{-4}$ W, pentru 1 micron amplitudine.

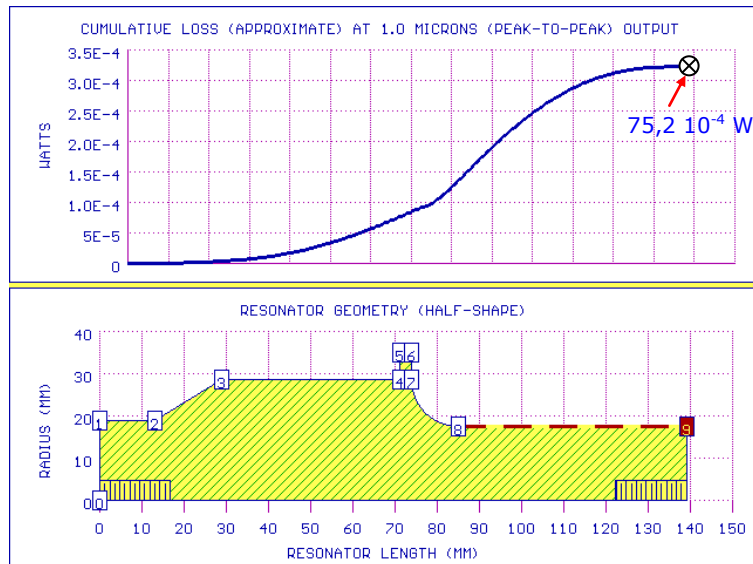


Fig. 2.28 Reprezentarea pierderilor de energie cumulate la frecvența 20 KHz

2.1.5 Dimensionarea cu program software specializat a ansamblului rezonator mecanic, pentru specimen AMPCO 45 tip A, frecvența vibrațiilor 20 KHz

Dimensiunile geometrice exterioare ale ansamblului rezonator mecanic pentru activare cavitațională cu specimen AMPCO 45 tip A, pentru frecvența vibrațiilor de 20 KHz, rezultate din programul de simulare [44], sunt prezentate în figura 2.29.

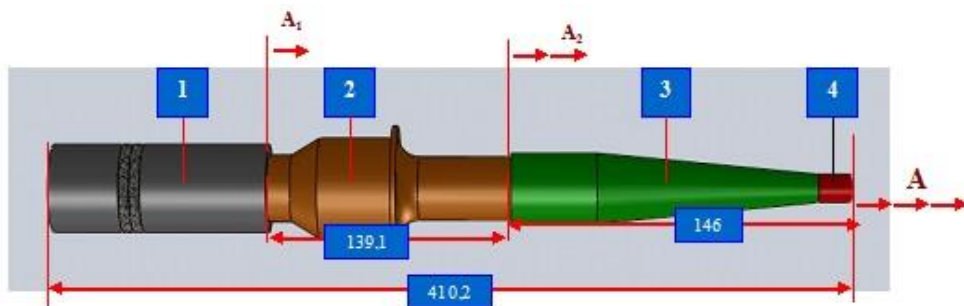


Fig. 2.29 Ansamblul rezonator mecanic cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

Elementele de caracterizare ale ansamblului rezonator mecanic cu specimen AMCO 45 tip A, 20 KHz, rezultate din programul de simulare, sunt prezentate în figura 2.30.

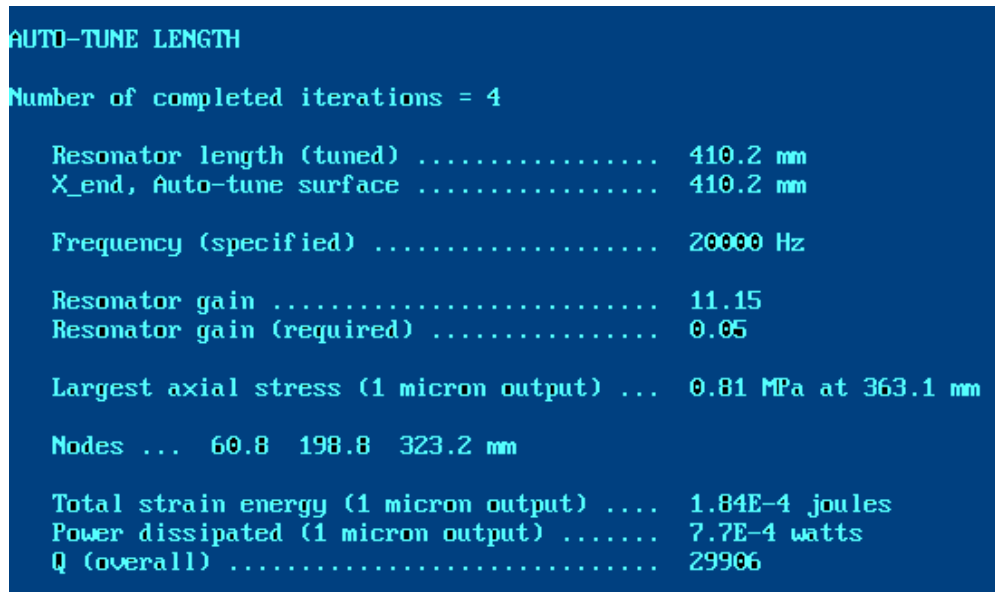


Fig. 2.30 Elementele de caracterizare dimensională ansamblul rezonator mecanic cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

Reprezentarea tensiunii axiale, figura 2.31, evidențiază un maxim, rezultat în urma simulării, având valoarea de 0,81 MPa, la cota X= 363,1 mm pentru 1 micron amplitudine.

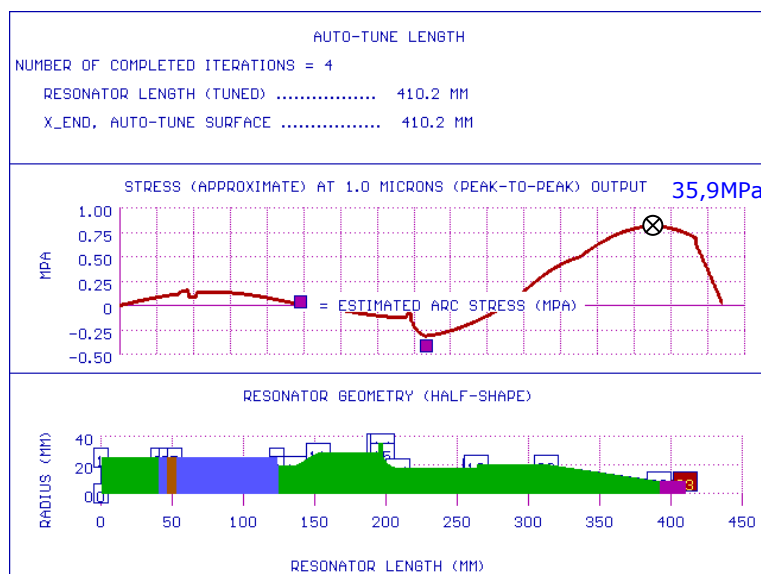


Fig. 2.31 Tensiunea axială ansamblul rezonator mecanic cu specimen AMPCO 45 tip A, frecvența de vibrație 20 KHz

42 Stand experimental dotat cu echipament de achiziții date în timp real I - 2

Reprezentarea variației amplitudinii de oscilație în lungul transformatorului de amplitudine, figura 2.32, evidențiază punctele nodale de oscilație zero la coordonatele $X=60,8$ mm, $198,8$ mm și $323,3$ mm.

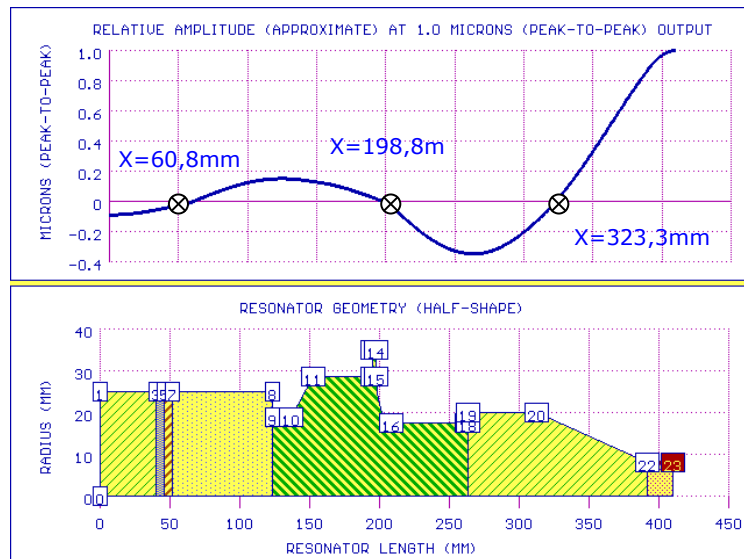


Fig. 2.32 Reprezentarea variației amplitudinii la frecvența 20 KHz, ansamblul rezonator mecanic cu specimen AMPCO 45 tip A

Energia de deformare cumulată - în volum și liniară, în structura internă a transformatorului de amplitudine monobloc, pentru frecvența de 20 KHz, figura 2.33, are o valoare maximă de $1,04 \cdot 10^{-4}$ Joule, pentru 1 micron amplitudine.

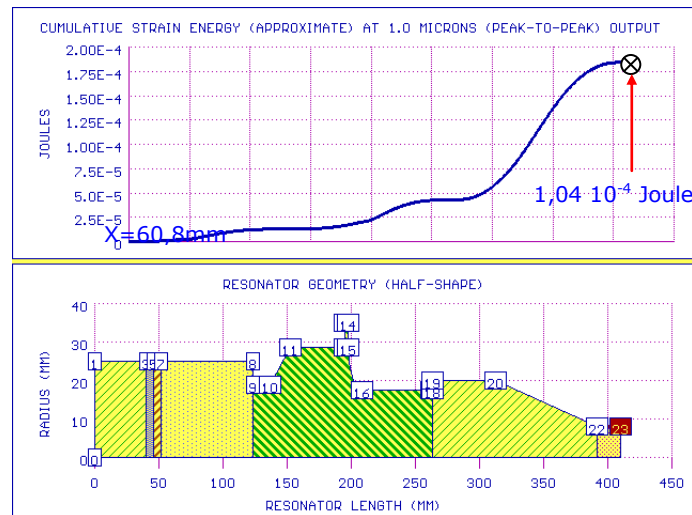


Fig. 2.33 Reprezentarea energiei de deformare cumulată la frecvența 20 KHz, ansamblul rezonator mecanic cu specimen AMPCO 45 tip A

Pierderile de energie cumulate - în volum și liniară, în structura internă a transformatorului de amplitudină monobloc, pentru 20 kHz, figura 2.34, au o valoare maximă de $7,7 \cdot 10^{-4}$ W, pentru 1 micron amplitudine.

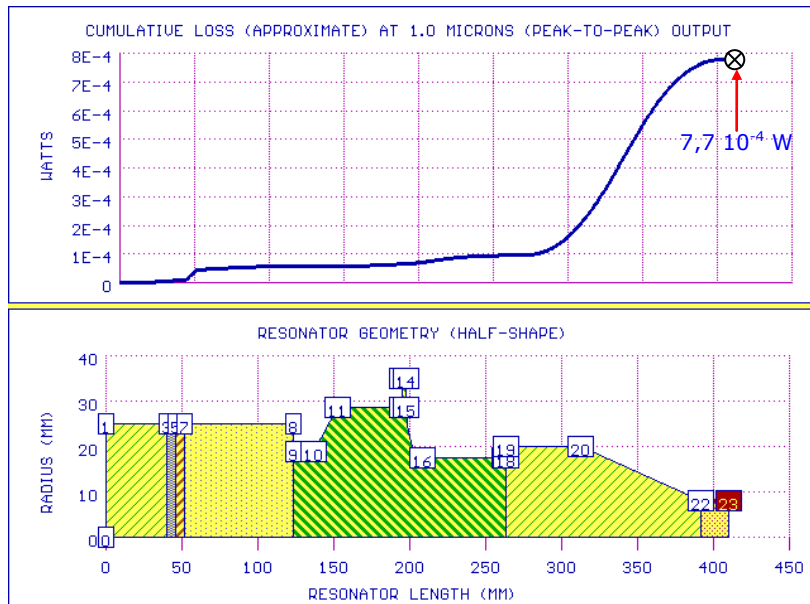


Fig. 2.34 Reprezentarea pierderilor de energie cumulată în ansamblul rezonator mecanic la frecvența 20 KHz

2.1.6 Verificarea cu program software specializat a convertorului piezoceramic activare cavitațională, 20 KHz

Dimensiunile geometrice exterioare ale ansamblului convertor (transductor) piezoceramic de 20 kHz, rezultate din programul de simulare sunt prezentate în figura 2.35.

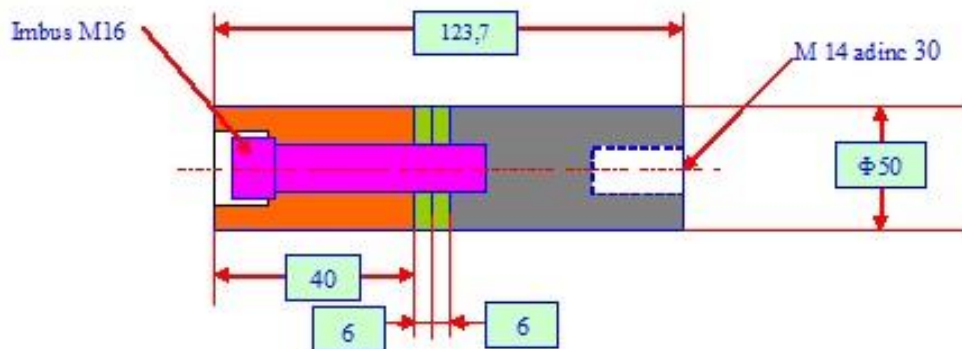


Fig. 2.35 Ansamblul convertor piezoceramic de 20 KHz

Forma dimensională rezultată în urma autocalibrării transformatorului de amplitudine este prezentată în figura 2.36 .

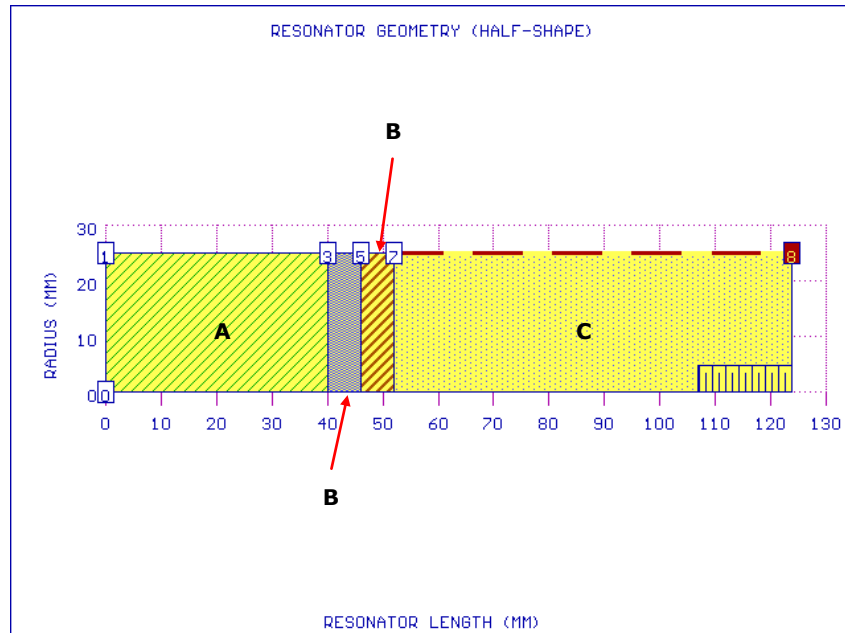


Fig. 2.36 Forma dimensională a ansamblului convertor piezoceramic de 20 KHz
A- Ti6Al4V ; B – inel piezoceramic; C – Aluminu 2024-T3

Elementele de caracterizare ale ansamblului convertor piezoceramic rezultate din programul de simulare sunt prezentate în figura 2.37

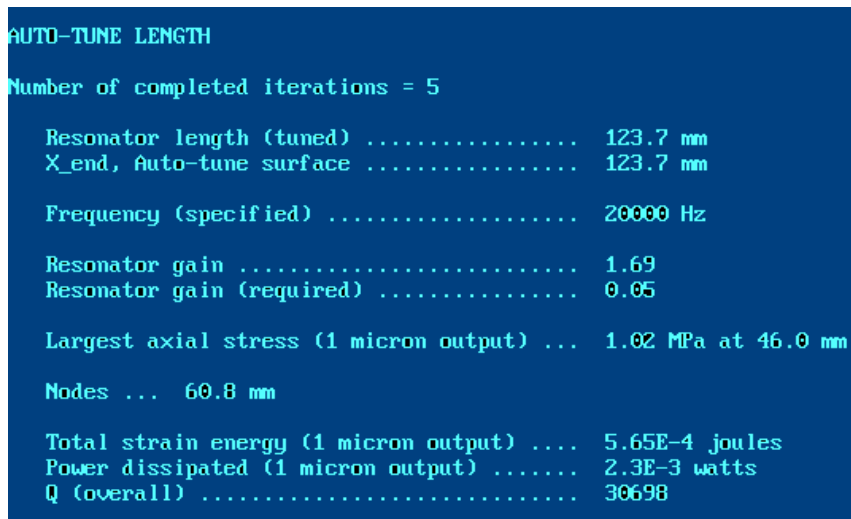


Fig. 2.37 Elementele de caracterizare a ansamblului convertor piezoceramic de 20 KHz

Reprezentarea tensiunii axiale, figura 2.38, evidențiază un maxim rezultat în urma simulării având valoarea de 1,02 MPa, la cota X= 46.0 mm pentru 1 micron amplitudine.

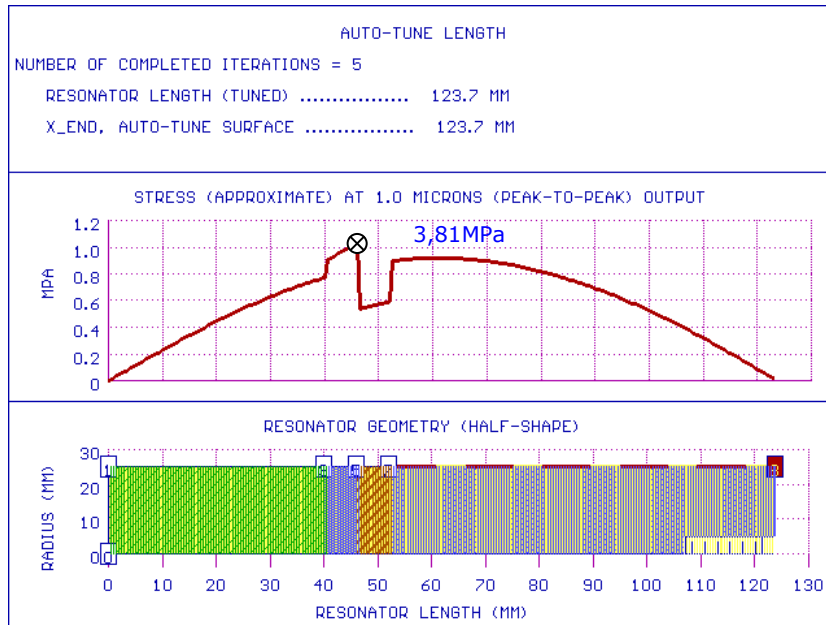


Fig. 2.38 Tensiunea axială a ansamblului convertor piezoceramic de 20KHz

Reprezentarea variației amplitudinii de oscilație, figura 2.39, în lungul transformatorului de amplitudine evidențiază un punct nodal de oscilație zero la coordonata X= 60,8 mm.

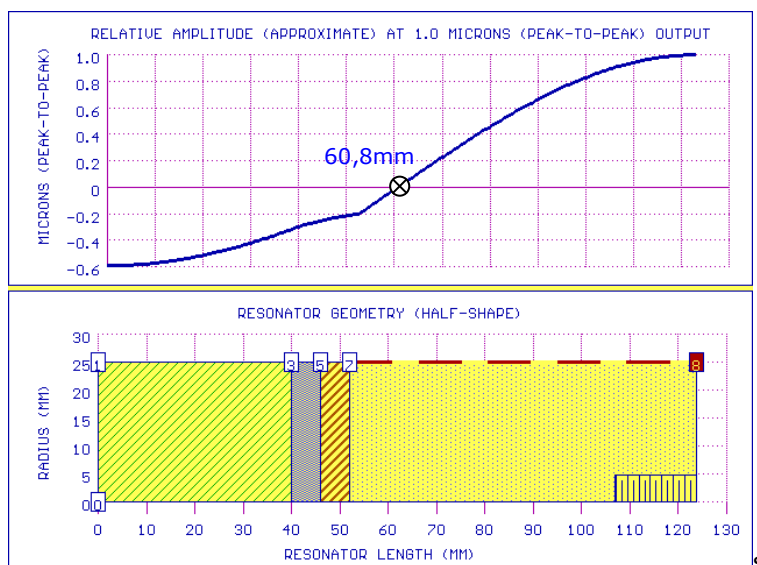


Fig. 2.39 Reprezentarea variației amplitudinii la frecvența 20 KHz

Energia de deformare cumulată - în volum și liniară, în structura internă a ansamblului convertor piezoceramic de 20 KHz, figura 2.40, are o valoare maximă de $5,65 \cdot 10^{-4}$ Joule, pentru 1 micron amplitudine.

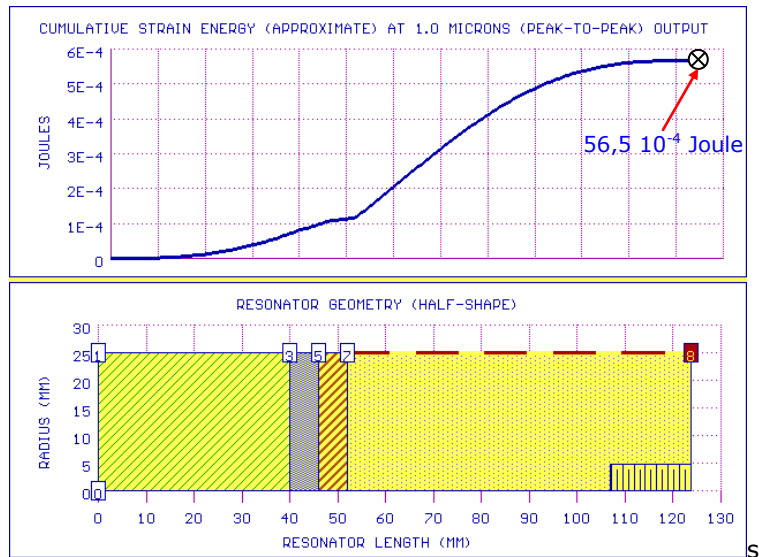


Fig. 2.40 Reprezentarea energiei de deformare cumulată la frecvența ansamblului convertor piezoceramic de 20 KHz

Pierderile de energie cumulate - în volum și liniară, în structura internă a transformatorului de amplitudine monobloc de 20 KHz, figura 2.41, au o valoare maximă de $2,3 \cdot 10^{-3}$ W, pentru 1 micron amplitudine.

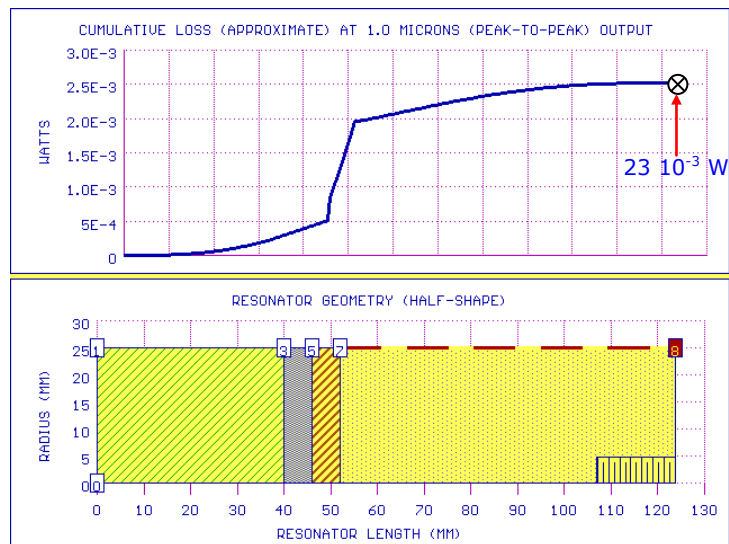


Fig. 2.41 Reprezentarea pierderilor de energie cumulată, pe ansamblul convertor piezoceramic de 20 KHz

2.2 Echipamente și aparatură de calibrare electroultraacustică

În programul experimental s-a utilizat ca aparatură de investigare de laborator, sonometru de frecvență de rezonanță și impedanță acustică, senzor de frecvență în timp real, modul digital de măsurare a amplitudinii de vibrație ultrasonică, prezentate în imaginea din figura 2.42.



Fig. 2.42 Echipamente și aparatură de calibrare electroultraacustică
 1. Sonometru măsurare frecvență de rezonanță și impedanță acustică
 2. Modul digital de măsurare a amplitudinii de vibrație ultrasonică
 3. Senzor de măsurare a frecvenței de rezonanță în timp real

Caracteristicile tehnice ale echipamentelor și aparaturii de calibrare electroultraacustică sunt prezentate în tabelele 2.1.2, 2.1.3, 2.1.4

Tabel 2.1.2 Caracteristici tehnice [35]

Feature	Value
Frequency Range :	10.00 - 89.99 kHz
Display :	LCD 160x100 with backlight
Keyboard :	19 keys
Resolution :	1 Hz
Tolerance :	1 Hz
Size :	W 155 x L 210 x H 100
Weight :	1100g
Power supply :	90 - 240 VAC with external power supply

Tabel 2.1.4 Caracteristici tehnice senzor de frecvență în timp real [35]

Feature	Value
Frequency Range :	10.00 - 99.99 kHz
Display :	4 digit LCD
Resolution :	10 Hz
Tolerance :	1 digit (10 Hz)
Size :	L 120, W 60, H 25 (4.72"L x 2.36"W x 1"H)
Weight :	100 g (3.5 oz. = <¼ lb.)
Battery :	9 V , 6LR61 or 6AM6

Tabel 2.1.4 Caracteristici tehnice modul digital de măsurare a amplitudinii [35]

Feature	Value
Range 1 :	+/- 500um
Range 2 :	+/- 100um
Range 3 :	+/- 5 um
Resolution Sensor :	0.1 um
Display :	Analog & Digital
Interface :	RS 232
Battery :	3 x 1.5 V / AA LR06
Minimum Adjustment Gage Sensor	0.1 um

2.3 Generator electronic de ultrasunete 20 KHz, 500 W

2.3.1 Descriere funcționare

Pentru a obține vibrații mecanice de înalta frecvență, ansamblul rezonator mecanic, format din convertor piezoceramic, transformator de amplitudine și sonotrodă, trebuie excitat cu energie electrică de frecvență ridicată [1], [35]. Acest rol este îndeplinit de către generatorul de ultrasunete.

Generatorul de ultrasunete specific aplicațiilor de prelucrări mecanice de găurire și rectificare realizează conversia tensiunii de 220 V alternativ cu frecvență de 50 Hz de la rețeaua de alimentare, în energie electrică ultrasonică de frecvență cuprinsă între 20 KHz și 40 KHz.

Componenta software implementată, în cadrul modulului de comandă și control a parametrilor specifici cavitației vibratoare, permite echipamentului cu ultrasunete realizarea următoarelor funcții:

- dialogul cu utilizatorul prin intermediul interfeței realizată cu ecranul LCD și senzor tactil
- compensarea variațiilor tensiunii de alimentare cu energie electrică
- urmărirea în timp real a frecvenței de rezonanță a ansamblului rezonator mecanic

- generarea semnalelor PWM de comandă pentru blocul de putere
- controlul amplitudinii vibrațiilor ultrasonice
- afișarea parametrilor sistemului
- implementarea algoritmului procesului specific echipamentului de prelucrare mecanică cu ultrasunete

Modalitatea de implementare a componentei software din cadrul modulului de comandă și control proces, permite realizarea a două moduri de lucru al generatorului :

- mod de lucru cu amplitudine constantă
- mod de lucru cu energie constantă

În modul de lucru **cu amplitudine constantă**, generatorul monitorizează în timp real parametrii ansamblului rezonator mecanic cât și tensiunea de alimentare și ajustează energia ultrasonică aplicată acestuia astfel încât amplitudinea oscilațiilor mecanice obținute să se mențină constantă.

În modul de lucru **cu energie constantă**, parametrii întregului sistem sunt modificați pentru a se obține o energie constantă transferată ansamblului mecanic în unitatea de timp.

Prin intermediul interfeței cu utilizatorul se pot programa următorii parametri tehnologici, care sunt funcție de dimensiunile componentelor ce urmează a fi prelucrate și de starea suprafeței acestora :

- frecvența de bază: 20 KHz, 35 KHz sau 40 KHz în funcție de aplicație
- amplitudinea oscilațiilor mecanice: 15-20 μm
- energia ultrasonică transferată
- timpul de procesare: maxim 30 min

2.3.2 Schema bloc

Transferul maxim de putere activă de la generatorul de semnal ultrasonic la ansamblul rezonator mecanic are loc atunci când frecvența de rezonanță mecanică este egală cu frecvența semnalului de excitație. Această frecvență nu este fixă ci variază în limite restrânse în jurul valorii nominale caracteristice traductorului.

Pentru realizarea acestui transfer maxim, frecvența de oscilație a generatorului este variabilă și urmărește, în permanență, frecvența de rezonanță mecanică a ansamblului transductor piezoceramic-booster-sonotroda-proba prin controlul defazajului dintre tensiune și curent de la bornele traductorului piezoceramic.

Procesul de control al frecvenței generate este realizată de către blocul de comandă și control ce are la bază un microcontroler. Acesta, prin intermediul componentei software implementate, măsoară defazajul dintre curentul și tensiunea aplicată traductorului piezoceramic, cât și cantitatea de energie transferată acestuia. Pe baza acestor parametri, este comandat modulul DDS care are rolul de a genera semnalul de comandă pentru etajul de putere cu punte de tranzistoare IGBT.

Datorită faptului că la ieșirea din modulului punte IGBT semnalul electric are forma dreptunghiulară, acesta nu se poate aplica direct traductorului piezoceramic, fiind necesară intercalarea unui filtru corector, pentru a diminua pierderile în traductor la armonicile impare din semnalul de excitație.

În figura 2.43 este prezentată schema bloc a generatorului destinat sistemului de testare la eroziunea cavitațională, cu semnalele de ieșire pentru monitorizarea frecvenței și amplitudinii.

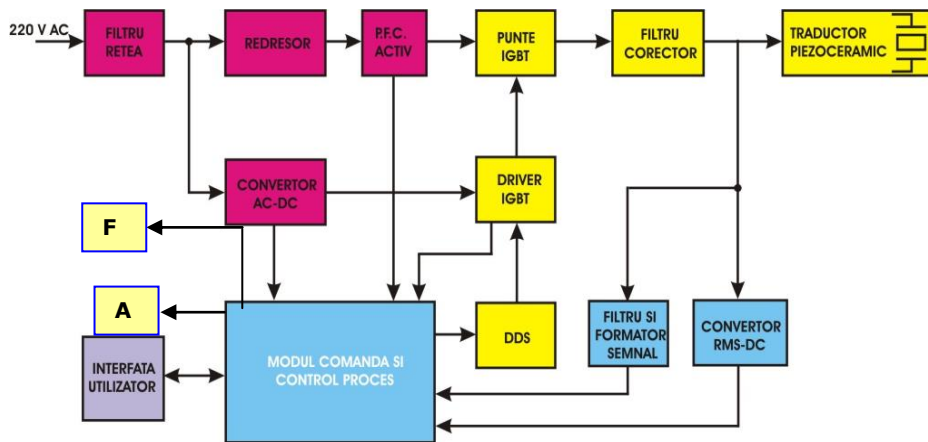


Fig. 2.43 Schema bloc a generatorului electronic de ultrasunete

Conform structurii din figura 2.43 au loc trei conversii intermediare de energie :

- o conversie de energie electrică de 50Hz în energie de curent continuu prin intermediul blocului de alimentare redresor și a blocului convertor AC-DC
- o conversie a energiei de curent continuu în energie de curent alternativ de frecvența ultrasonică
- o conversie a energiei semnalului de excitație în energie de oscilații mecano-elastice de frecvența ultrasonică

2.3.2.1 Filtrul de rețea

Funcționând în regim de comutație de mare putere, filtrul de rețea, figura 2.44, are rolul de a elimina interferențele eletromagnetice (EMI) și de radio frecvență (RFI) introduse de către generatorul de ultrasunete în rețeaua de alimentare cu energie electrică. Are de asemenea rolul de a nu permite intrarea în generator a semnalelor parazite de frecvențe înalte ce se regăsesc pe rețeaua de alimentare cu energie electrică, lucru care ar putea perturba buna funcționare a acestuia.

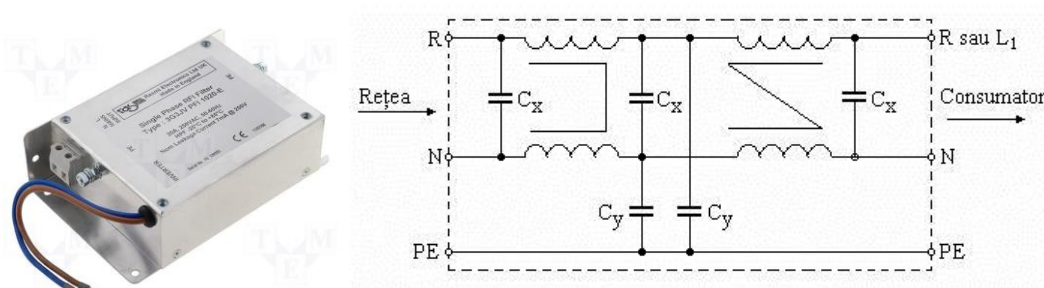


Fig. 2.44 – Model constructiv de filtru RFI/EMI

Caracteristicile tehnice ale filtrului de rețea :

- curentul maxim suportat: până la 50 A
- tensiunea maxima: până la 250 VAC, 50 Hz
- gama de temperaturi de funcționare: -25°C la +85°C
- filtrare efectivă în gama de frecvență: 100 KHz la 30 MHz

2.3.2.2 Convertorul AC-DC

Tensiunea alternativă de la bornele de alimentare ale generatorului ultrasonic, este convertită în tensiuni continue, de mică putere, necesare alimentării modulelor de comandă și control din cadrul generatorului ultrasonic.

La baza acestui convertor se află un circuit integrat specializat, TOP 246, fig.2.45, care asigură toate funcționalitățile necesare obținerii tensiunilor necesare:

- integrează elementul de comutație de putere
- generează semnalul PWM necesar funcționarii convertorului DC-DC
- implementează soft-startul pentru a elimina posibilitatea apariției de supracurenți la punerea sub tensiune a echipamentului
- încorporează protecție la supratensiuni
- realizează controlul tensiunilor de ieșire prin intermediul circuitului de feedback

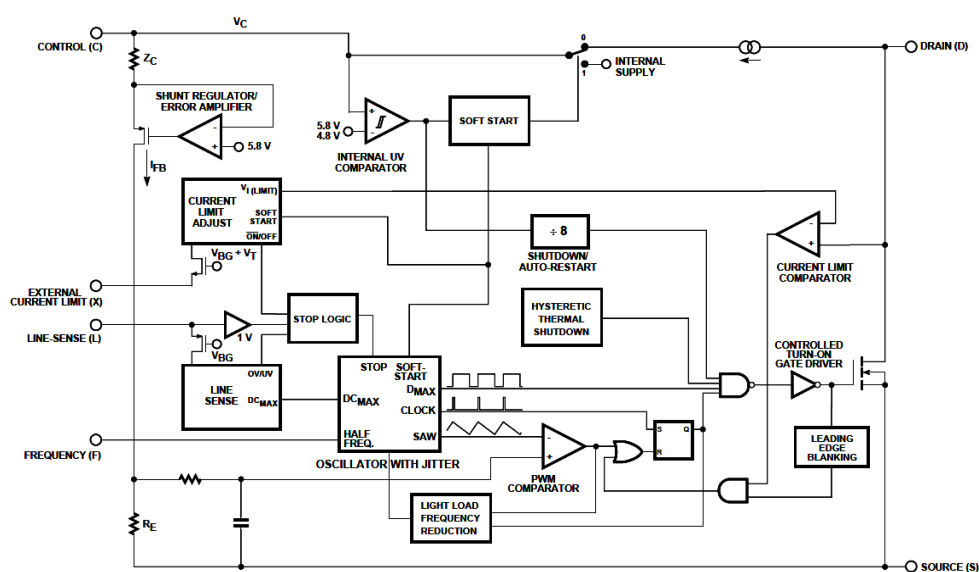


Fig. 2.45 Schema bloc, internă, a circuitului integrat TOP 246

În fig. 2.46 este prezentată o schemă de aplicație a lui TOP 246

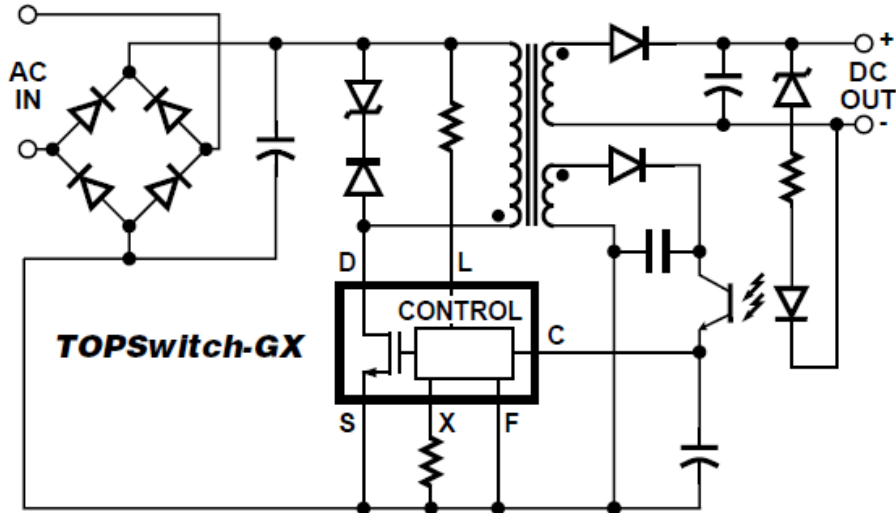


Fig. 2.46 Schema de aplicație a circuitului integrat TOP 246

Tensiunile de ieșire ale modului convertor DC-DC sunt:

- +5 V pentru alimentarea părții de logică digitală din cadrul generatorului
- +12 V pentru alimentarea ansamblor analogice
- +15 V pentru alimentarea driver-ului de IGBT-uri
- -15 V pentru alimentarea driver-ului de IGBT-uri

2.3.2.3 Modul redresor de putere

Asigura conversia tensiunii alternative 220 V AC 50 Hz de la bornele de alimentare ale generatorului în tensiune continuă ce este necesară funcționării blocului de putere cu tranzistoare IGBT.

2.3.2.4 Modul filtru de putere PFC activ

Obținerea unui factor de putere apropiat de 95% de la rețeaua de alimentare se realizează prin intermediul modului PFC activ, fig. 2.47, având în componența sa circuite integrate specializate

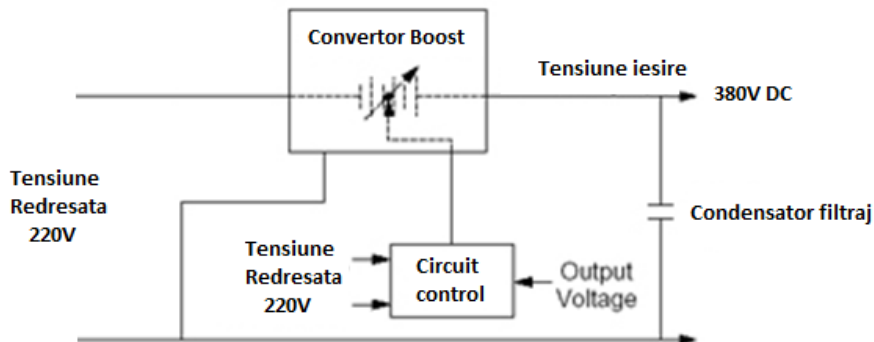


Fig. 2.47 Schema bloc PFC activ

2.3.2.5 Modul punte IGBT

Schema standard pentru a obține semnalul de excitație de putere pentru traductorul piezoceramic, s-a folosit o punte completă de tranzistoare IGBT, fig. 2.48, ce are ca sarcină un transformator de separație.

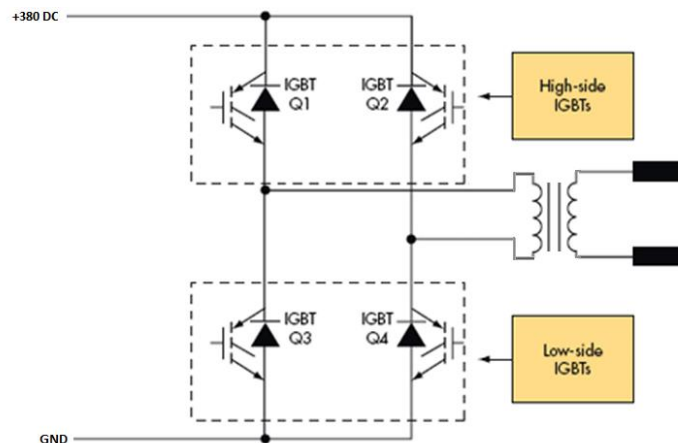


Fig. 2.48 Schema de principiu punte de tranzistoare IGBT

Pentru realizarea acestui modul de putere, sau ales tranzistoare IGBT cu următoarele caracteristici:

- viteza mare de comutație
- tensiune maximă colector-emitor: 1200 V
- curent de colector: 50 A
- puterea disipată: 300 W
- tensiunea grilă-emitor: ± 20 V

2.3.2.6 Modulul driver IGBT

Circuitul driver specializat, de tip UC37322 (fig.2.49), prin intermediul unor transformatoare de impuls comandă tranzistoarele IGBT.

Caracteristicile circuitului driver sunt:

- curent de vârf: ± 9 A
- tensiune maximă: ± 18 V
- timp de creștere/coborâre: 20 ns

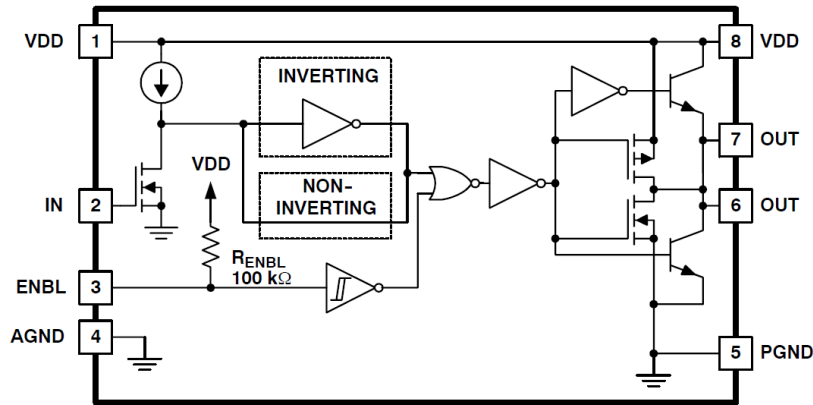


Fig. 2.49 Schema bloc internă a circuitului UC37322

Semnalul de comandă al etajului driver IGBT este un semnal compatibil TTL, ce este preluat de la ieșirea modului DDS, după etajul ce generează factorul de umplere variabil și are frecvența dictată de către modulul de comandă și control proces.

2.3.2.7 Filtrul corector

Semnalul generat de către puntea de IGBT-uri este un semnal dreptunghiular.

Conform teoriei Fourier, semnalul undă dreptunghiulară conține armonici de ordin impar destul de mari. Aceste armonici impare, excitând traductorul ultrasonic de putere pot avea două efecte:

- un consum suplimentar de putere electrică pe traductor;
- o conversie suplimentară de semnal electric în oscilații mecanice ultrasonice de frecvențe corespunzătoare

Din caracteristica spectrală a transductorului ultrasonic de putere, dată de fabricant, se observă că, pentru frecvențe mai mari decât cea nominală, deformațiile produse prin efect piezoelectric invers, sunt mult atenuate [1], 5], 44]. Rezultă că, pentru semnalul de excitație de frecvență $f_1 = f_n$, oscilațiile mecano-elastice de frecvențe $(2k-1)f_1$ cu $k = 2, 3, 4, \dots, \infty$ sunt considerate parazite și sunt mult atenuate față de cele de frecvență f_1 . Problema principală o constituie pierderile suplimentare de putere active la semnalele armonici impare.

Transductorul piezoceramic are un caracter capacitiv; în consecință, filtrul corector, fig. 2.50, este o inductivitate serie cu Z_{me} și un condensator în paralel C_0 . În aceste condiții, filtrul corector are un caracter de filtru trece-jos.

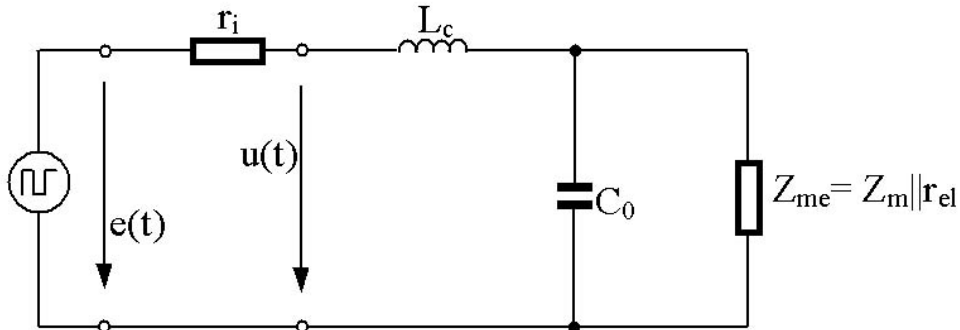


Fig. 2.50 Filtrul corector

2.3.2.8 Modulul DDS

Pentru a putea obține un semnal de comandă pentru blocul de putere, blocul de comandă și control gestionează prin intermediul unei interfețe SPI un circuit specializat de sinteză digitală de tipul AD9852, fig.2.51. Acesta este un circuit de tipul DDS (direct digital synthesizer) în tehnologie CMOS, având următoarele caracteristici :

- frecvența ceas intern 300 MHz
- comparator intern ultrarapid
- două registre de 48-biti pentru programarea frecvenței
- două registre 14-biti pentru programarea fazei
- interfața serială de comunicație SPI cu viteza de 10 MHz
- tensiune alimentare 3,3 V

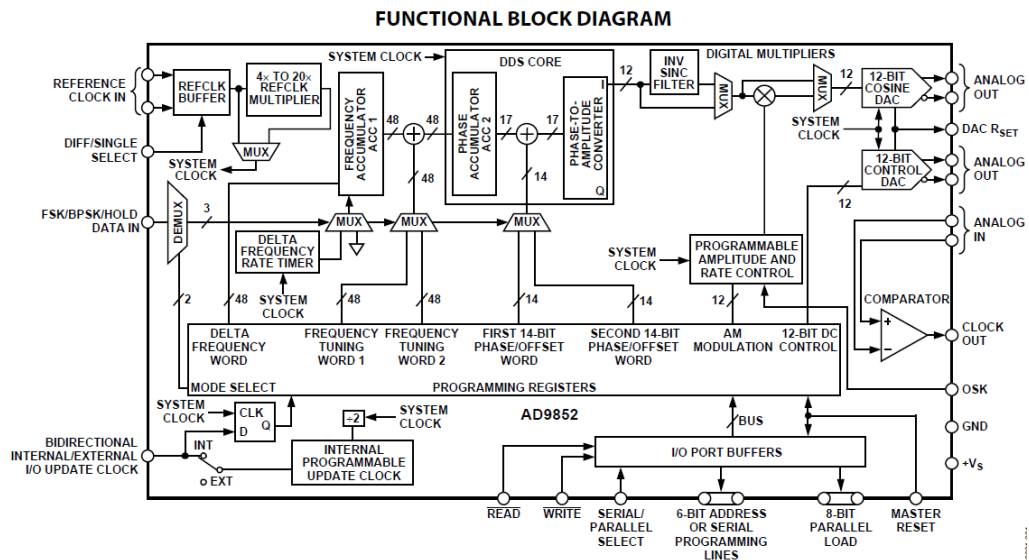


Fig. 2.51 Schema bloc a circuitului AD9852

Tot în cadrul acestui modul DDS se va efectua și reglajul factorului de umplere al semnalului digital obținut, astfel rezultând un semnal PWM. Prin variația factorului de umplere al acestui semnal, se obține modificarea puterii generate de către generatorul ultrasonic, într-o plajă de 60-100 %.

2.3.2.9 Modulul filtru și formator de semnal

Pentru a putea realiza măsurarea defazajului tensiune-curent de la bornele transductorului piezoceramic, modulul de comandă și control are nevoie de două semnale compatibile TTL care dictează momentul treceri prin zero a tensiunii respectiv a curentului prin piezoceramic.

Aceste semnale se obțin prin filtrarea semnalelor de feedback cu ajutorul unor filtre active realizate cu circuite operaționale, și prin intermediul a două circuite comparatoare de precizie.

În urma procesării semnalelor analogice se obțin două semnale dreptunghiulare, ale căror fronturi crescătoare dictează momentul trecerii prin zero ale tensiunii respectiv ale curentului prin piezoceramic.

2.3.2.10 Modulul convertor RMS - DC

În cadrul acestui modul se realizează o înmulțire analogică a curentului și tensiunii măsurate la bornele transductorului piezoceramic, cât și conversia acestui semnal în semnal DC pentru a putea fi achiziționat de către microcontrolerul din modulul de comandă și control.

Înmulțirea analogică se realizează utilizând circuitul integrate specializat AD633, fig.2.52. Precizia circuitului este dată de tensiunea internă de referință de 10 V, foarte stabilă datorită prelucrărilor laser efectuate asupra pastilei de siliciu a circuitului.

Măsura puterii transmise convertorului piezoceramic este dată de semnalul rezultat în urma acestei înmulțiri analogice. Conversia acestuia în semnal de curent continuu se realizează cu circuitul integrat AD636, fig.2.53, cu următoarele caracteristici tehnice :

- lățime de bandă 1 MHz
- sursa de referință internă 10 V de mare precizie

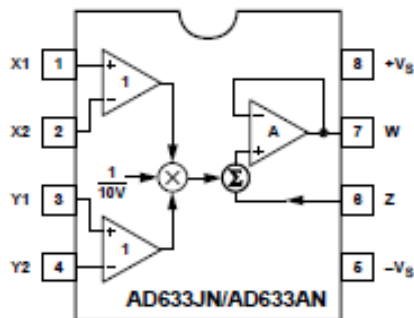


Fig. 2.52 Schema bloc AD633

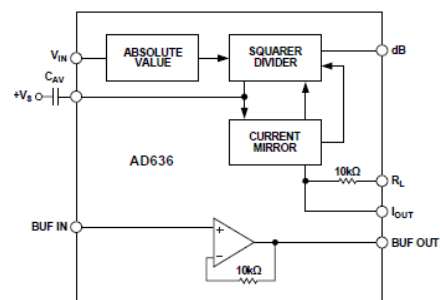


Fig. 2.53 Schema bloc AD636

2.3.2.11 Modulul de comandă și control

Modulul de comandă și control are la bază un microcontroler LPC2138 cu nucleu ARM7 produs de către compania Philips. Împreună cu restul de circuite periferice, acest modul gestionează întreaga funcționare a generatorului ultrasonic.

Caracteristicile microcontrolerului LPC2138 sunt:

- nucleu ARM7TDMI-S 16/32biti
- memorie internă flash 521 kB
- memorie internă SRAM 32 kB
- timere 32 biti
- porturi de intrare-ieșire de viteză mare
- frecvența de tact de 60 MHz
- interfețe seriale SPI, I2C, RS232
- ieșiri PWM
- convertoare analog-digitale pe 10 biți și 8 canale
- convertoare digitalo-analogice pe 10 biți

În memoria internă flash, se va implementa software-ul ce gestionează întregul proces de generare de energie ultrasonică a echipamentului specializat de prelucrare mecanică cu ultrasunete.

Comunicarea cu modulul DDS este realizată prin intermediul interfeței SPI, cu frecvența de tact de 10 MHz, ceea ce permite un timp de răspuns minim, foarte necesar pentru corecția în timp real a frecvenței generate.

Prin intermediul unui timer de 32 biți, se realizează măsurarea defazajului tensiune-curent, al tensiunii aplicate traductorului piezoceramic. În același timp, folosind unul din cele 8 canale de conversie analog-digitale, se achiziționează măsura energiei transmise de către generator la transductorul piezoceramic.

Pe baza unui algoritm implementat, și folosind acești parametrii, se urmărește menținerea la rezonanță a întregului ansamblu și, totodată, se implementează modul de lucru selectat de către utilizator.

2.3.2.12 Interfața cu utilizatorul

Este realizată cu un ecran LCD cu senzor tactil, prin intermediul căruia utilizatorul poate parametriza procesul tehnologic, accesând meniurile implementate în componența software.

În timpul realizării programului de lucru, pe ecranul LCD sunt afișați parametrii în timp real, ce sunt achiziționați de către modulul de comandă și control.

2.4 Sistemul de achiziții date

Schema bloc a sistemului de achiziții date în timp real este prezentată în imaginea din figura 2.54

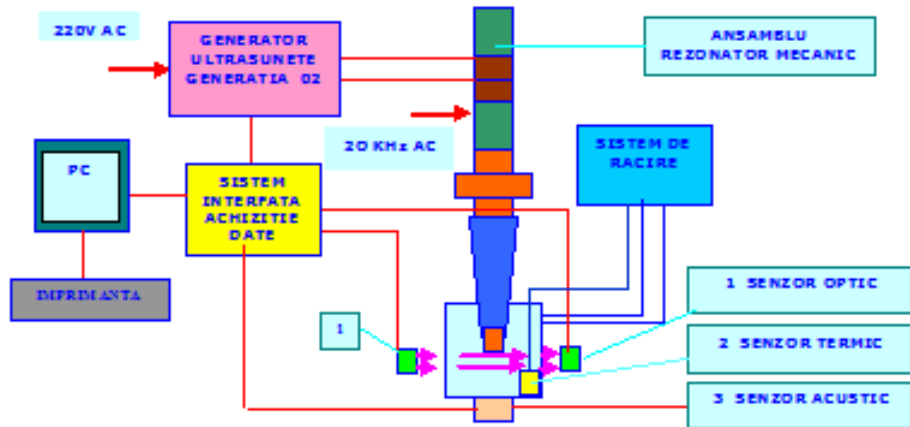


Fig.2.54 Schema bloc a sistemului de achiziții date în timp real

Sistemul de achiziții date în timp real a procesului de cavitație este construit pe baza automatului programabil XBC-D2-64H, AC100/220V/DC24V.

Comunicația cu sistemul este asigurată de 32 intrări și 32 de ieșiri, semnale, procesate prin intermediul software - ului implementat pe sistemul DELL OPTIPLEX 745, cu performanțele 250 GB HDD, RAM 2048 MB.

Sunt procesate următoarele semnale monitorizate:

- Frecvența de oscilație în timp real a sonotrodei
- Amplitudinea vibrațiilor
- Puterea electrică
- Temperatura mediului lichid de reacție
- Temperatura sonotrodei
- Nivelul acustic al procesului de cavitație
- Imaginea în timp real a norului de cavitație
- pH lichid de reacție

Programul software implementat generează grafice în timp real privind evoluția parametrilor monitorizați.

Meniurile de operare

Pentru procesul de cavitație, programul software [131] generează două ferestre de programare proces.

Prima fereastră conține date de identificare a experimentului, tipul materialului, timpul programat pentru cavitație, masa specimenului la minutul corespunzător startului procesului de cavitație, masa specimenului la minutul corespunzător sfârșitului timpului de proces de cavitație.

A doua fereastră de programare conține meniul principal, prezentat schematizat în imaginea din figura 2.55, urmând a se alege unul din următoarele submeniuri: automat, programare, test ultrasunet, parametri, imprimare.

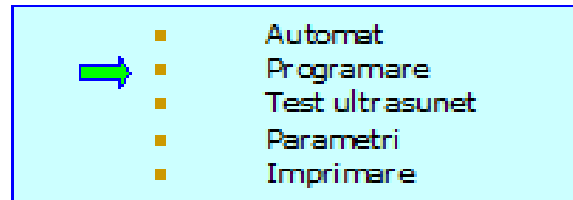


Fig. 2.55 Fereastra de programare proces cavitare

Exemplificarea principalelor submeniuri ale sistemului de achiziție:
Automat – reprezintă funcția de setarea automată a parametrilor de proces pentru începerea unei noi etape de cavitație;
Programare – reprezintă funcția de programare a unui regim nou de cavitație. Se va seta la început numărul programului reprezentând minutul aferent experimentului;
Parametri - reprezintă funcția de acordare frecvență și amplitudine;
 În imaginea din figura 2.56 este prezentată captura de ecran cu graficele parametrilor monitorizați în timp real ai procesului de cavitație.

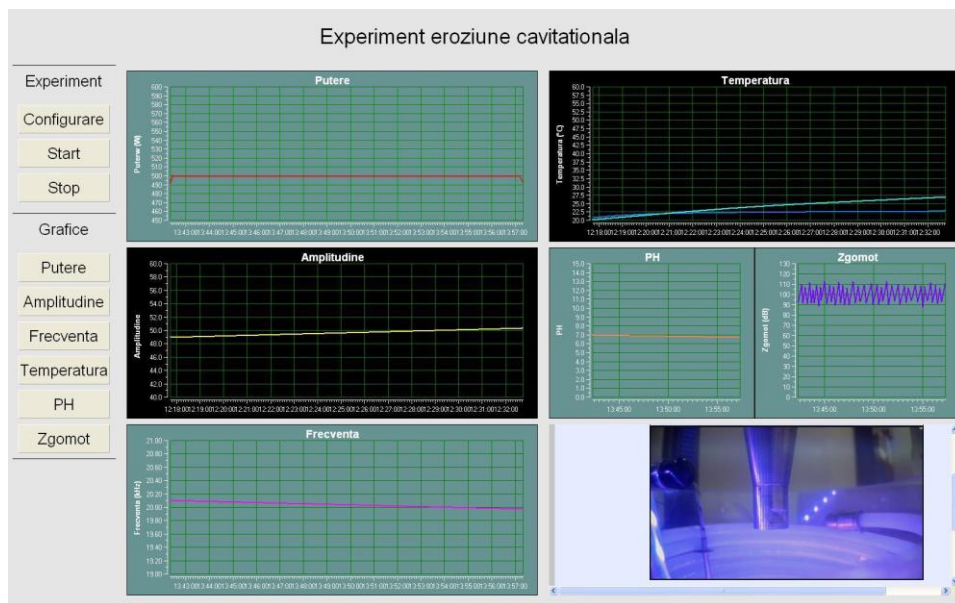


Fig. 2.56 Vizualizare ecran de captura grafice parametrii monitorizați în timp real

2.5 Concluzii

Având la bază schema bloc, se poate realiza un generator de ultrasunete având următoarele caracteristici tehnice:

- puterea de ieșire : maxim 600 W
- frecvența de lucru de bază: 20 KHz \pm 200 Hz
- banda de captură : \pm 500 Hz
- amplitudine reglabilă in domeniul : 15÷100 μ m
- timpul de procesare : maxim 30 min

Din punct de vedere al facilităților, generatorul ce va echipa echipamentului specializat de producere a cavitației vibratoare cu ultrasunete va dispune de :

60 Stand experimental dotat cu echipament de achiziții date în timp real - 2

- interfața cu utilizatorul, bazată pe ecran LCD cu senzor tactil;
- suită de meniuri ce permit configurarea întregului sistem de comunicație cu calculatorul pentru transferul de date;
- diferite moduri de lucru (cu energie constantă, cu amplitudine constantă);
- semnalizarea erorilor apărute în procesul tehnologic.

Modelul de generator prezentat este modelul standard la nivelul anului 2012 pentru aplicațiile de ultrasunete de la ISIM Timișoara, având implementate elemente specifice pentru comunicarea cu sistemul de achiziții date, monitorizare frecvență și amplitudine vibrații, pentru aplicația de modernizare stand testare cavitațională.

Precizare: Incipiența și dezvoltarea modelului a avut la bază programele naționale de cercetare, cu finanțare prin competiție, proiectul RELANSIN, *Centrul de Excelență în Sudarea cu Ultrasunete, CEXUS ISIM Timișoara 2001-2004*; proiectul GRANT CNCISIS ID 34/2007, faza - *Aparat vibrator destinat eroziunii prin cavitație 500W, 20KHz, 240V/50Hz*; proiectul CEEX 265 *Centrul Virtual pentru tehnologii integrate cu aplicații ale energiei electroultraacustice în ingineria materialelor avansate, acronim ULTRATECH 2006-2008*; proiectul european ERA NET MANUNET *Procese activate ultrasonic pentru prelucrarea componentelor de înaltă precizie, acronim PRECISUS 2010-2012*. Aceste proiecte s-au constituit în baza unor parteneriate consolidate cu specialiști din cadrul Universității POLITEHNICA Timișoara, având în colaborare specialiști de excepție în domenii specifice, Societatea SMD Electronics Timișoara.

3. MATERIALUL CERCETAT. METODA DE TESTARE

3.1 Materialul cercetat

3.1.1 Considerații privind alegerea materialului

Selecția bronzului CuAl10Ni5Fe2.5Mn1-AMPCO 45, pentru cercetarea comportamentului și rezistenței la eroziunea prin cavitație, are ca rațiune documentarea bibliografică din capitolul 1, care arată că acest material, alături de bronzurile CuNiAl, este tot mai des utilizat în fabricarea elicelor navelor maritime și fluviale și prin tratamente volumice, sau de suprafață, își poate îmbunătăți substanțial caracteristicile de rezistență la cavitație. De asemenea, un alt motiv în selecția acestui aliaj a fost punerea în evidență a modului în care își modifică rezistența, respectiv comportarea la cavitație, prin aplicarea anumitor tipuri de tratamente termice și de suprafață. Totodată, procedeele de tratament, folosite în cadrul lucrării, deși sunt menționate în literatură, ele nu au fost folosite pe un astfel de aliaj, constituind noutate și oferind posibilitatea de aplicare în practică, cu scopul creșterii duratei de exploatare a elicelor.

3.1.2 Prezentarea materialului

Compoziția chimică a materialului oferit de producător [128] este: 10% Al, 5% Ni, 2,5% Fe, 1,0% Mn, rest Cu.

Alte caracteristici fizice și mecanice sunt cuprinse în tabelul 3.1

Tabelul 3.1 Caracteristicile fizico-mecanice, după [128]

Proprietatea mecanică sau fizică	Unitatea de măsură	Valoarea		
Dimensiunea epruvetei	mm	$\Phi \leq 25,4$	Dimensiunea epruvetei	mm
Rezistența mecanică la rupere R_m	MPa	814	Rezistența mecanică la rupere R_m	MPa
Limita de curgere $R_{p0.5}$	MPa	517	Limita de curgere $R_{p0.5}$	MPa
Alungirea A_5	%	15	Alungirea A_5	%
Duritatea Brinell	HB 30	228	Duritatea Brinell	HB 30
Duritatea Rockwell	HRC	98	Duritatea Rockwell	HRC
Gâtuirea Z	%	15	Gâtuirea Z	%
Rezistența la compresiune	MPa	303	Rezistența la compresiune	MPa
Reziliența	J	11,3	Reziliența	J
Nodulul de elasticitate E	GPa	117	Nodulul de elasticitate E	GPa
Densitatea ρ	g/cm^3			7,53

3.1.3 Aparatura utilizată pentru examinarea micro și macrografică a structurii

Pentru investigarea macro și micrografică au fost utilizate aparate fotografice de mare rezoluție, microscopae optice și electronice, dar și aparate pentru pregătirea și analiza metalografică.

O parte din aparatele folosite, pentru asemenea investigații, se află în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, o altă parte se găsesc în dotarea Centrului de Cercetare și Expertizare Materiale Speciale, din cadrul Universității Politehnica din București, iar altele se află în cadrul Laboratorului de Știința Materialelor din cadrul Universității Politehnica Timișoara.

Conform metodologiei stabilite în cadrul Laboratorului de Cavitație, în concordanță cu cerințele impuse de normele ASTM G32-2010, 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, a cărei rezoluție permite, mai mult, evidențierea extinderii distrugerilor pe suprafață și mai puțin în profunzime, figura 2.1

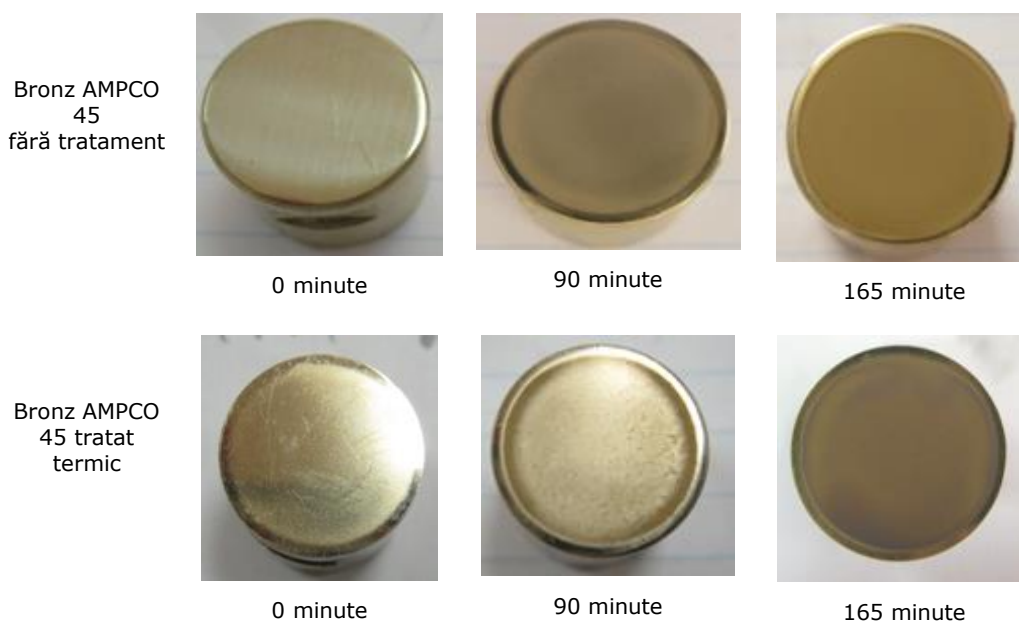


Fig.2.1 Imagini macrografice ale suprafeței erodate

Microscopul Optika, fig. 2.2, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, poate mări imaginea de 4x, 10x, 20x, 40x respectiv 80x. Fiind racordat la calculator permite examinarea suprafețelor atacate cavitațional, după fiecare perioadă intermediară de testare la cavitație și obținerea de imagini de tipul celei prezentate în figura 2.3 (mărire 10x).

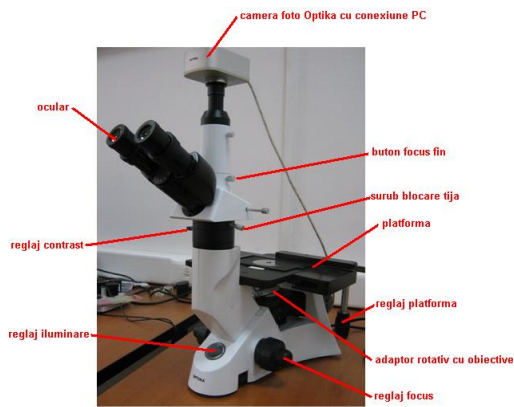


Fig. 2.2 Microscopul optic „Optika”

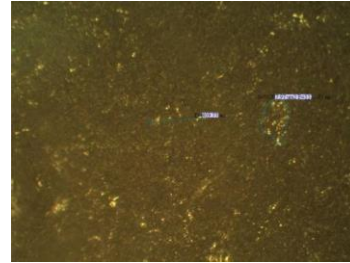


Fig. 2.3 Imagine microscopică a eroziunii produsă în bronzul naval de tip CuNiAl III RNR, după 45 minute de atac al cavitației, obținută în Laboratorul de Cavitație cu ajutorul microscopului optic la o mărire de 10x

Determinarea adâncimii maxime de pătrundere, într-o secțiune perpendiculară pe suprafața erodată, cu evidențierea fisurilor și ruperilor generate la impactul cu microjeturile și undele de șoc, produse la implozia bulelor cavitaționale, au fost realizate cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM, fig.2.4.



Fig. 2.4 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 ÷ 30kV

Tunul de electroni		Emisie de Câmp
Mărirea		15 to 500.000
Gradul de mișcare (mișcare motorizată pe 3 axe)	Z	Rotire $-15^{\circ} \div +75^{\circ}$
	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.

Pentru examinări macro și micrografice, la finalul testului de cavitație (165 minute), s-a utilizat microscopul Olympus SYX7, prezentat în figura 2.5, care dispune de un sistem de mărire de până la 56x. Distanța de lucru este mai mare decât cea a unui microscop complex tipic, permițând ca analiza să se facă pe probă în timp ce aceasta este observată prin microscop (de unde numele "microscop de analiză"). Acest stereomicroscop are un design modular care permite implementarea unei varietăți de oculare, obiective și tehnici de iluminat în funcție de scopul utilizării.



Fig. 2.5 Microscopul OPLIMPUS SYX7

Înainte de începerea examinării, suprafețele erodate au fost atacate metalografic, iar probele au fost secționare axial. Investigarea distrugerilor s-a realizat atât în suprafața secționată cât și neseționată.

Tăierea probelor, perpendicular pe suprafața atacată, s-a făcut cu aparatul de tăiat cu pânză și lichid de răcire de tip Buehler 4000, figura 2.6.



Fig. 2.6 Aparatul de tăiat cu pânză BUEHLER 4000

Pentru a putea realiza investigațiile metalografice, probele au fost înglobate, la cald, în rășina polimerică cu aparatul de tip Buehler Simplimet 1000 (Figura 2.7).



Fig. 2.7 Aparatul de înglobat la cald BUEHLER SIMPLIMET 1000

Șlefuirea și lustruirea probelor înglobate s-a făcut pe aparatul Buehler Phoenix Beta (fig. 2.8) care este echipat cu un cap de șlefuire/lustruire Buehler Vector.



Fig. 2.8 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta

Procedurile de pregătire a probelor erodate de cavitație și de investigare structurală au constat în parcurgerea următorilor pași:

- probele au fost tăiate axial (perpendicular pe suprafața erodată), în jumătate;
- piesele rezultate în urma tăierii au fost înglobate la cald în rășină polimerică cu aparatul Buehler Simplimet 1000;
- după înglobare s-a realizat șlefuirea și lustruirea, pe aparatul Buehler Phoenix Beta. Pânzele și emulsiile, folosite la șlefuire și lustruire, au fost selectate din catalogul producătorului de echipament, conform recomandărilor, funcție de tipul bronzului. După fiecare schimbare de pânză, piesa înglobată a fost spălată și atacată metalografic. după atacul metalografic a urmat analiza microstructurilor cu ajutorul microscopului OLYMPUS SYX7.

3.2. Metoda de testare

Metoda de testare folosită în cercetarea eroziunii cavitaționale este în conformitate cu normele ASTM G32-2010 [121]. Pentru fiecare probă, suprafața de atac a fost lustruită la o rugozitate de $R_a=0,2\div0,8\mu\text{m}$.

Sau realizat 21 de încercări experimentale pe probe din materialul în stare livrată și cu tratament termic (vezi capitolele 4 și 5), probe tratate cu laser (trei regimuri-vezi capitolul 6), probe pulverizate termic și tratate cu laser (două regimuri-vezi capitolul 7).

Testele au fost efectuate în Laboratorul de Cavitație din cadrul Universității Politehnica Timișoara, pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (vezi capitolul 2).

Durata totală a fiecărui test, de 165 minute, a fost divizată în 12 perioade intermediare (câte una de 5 și 10 minute, iar celelalte 10 au avut o perioadă de testare de 15 minute fiecare).

La începutul și sfârșitul fiecărei perioade de testare, probele au fost spălate sub jet de apă (de la rețea), apă distilată, alcool, acetonă, uscate sub jet de aer cald și cântărite.

Înainte de începerea testelor și la finalul fiecărei perioade intermediară, de testare, suprafețele expuse cavitației au fost examinate la microscopul optic și fotografiate cu aparatul de fotografiat Canon Power Shot A480, de mare rezoluție, pentru a se urmări evoluția distrugerii în suprafața expusă atacului.

În timpul atacului cavitațional amplitudinea și frecvența vibrațiilor au fost menținute constante la valorile precizate în capitolul 2.

Probele au fost cântărite, înainte de începerea testelor și la finalul fiecărei perioade intermediare. Cântărirea s-a făcut cu balanța analitică tip Zatkłady Mechaniki Precyzyjnej (figura 2.9), modelul WP-11, aflată în dotarea laboratorului. Masa maximă ce poate fi cântărită cu această balanță este de 100 de grame. Precizia balanței este de 5 zecimale (până la 0,00001 grame).



Fig. 2.9 Balanța analitică de tip Zatkłady Mechaniki Precyzyjnej WP 11

Ca mediu lichid s-a utilizat apă potabilă de la rețea, din considerentul că este cea mai apropiată de mediul în care sunt exploatate elicele navelor fluviale și rezultatele nu sunt semnificativ diferite de cele obținute prin testarea în apă dublu distilată, deoarece efectul chimic coroziv, este eliminat, prin păstrarea probelor, în perioadele de pauză, într-un exicator. Temperatura lichidului, pe parcursul testelor, s-a menținut la $22 \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Pentru evaluarea și prezicerea eroziunii produsă prin cavitație, literatura recomandă utilizarea unuia sau a mai multora dintre parametrii:

1. panta curbelor de pierdere masică $m(t)$, volumică $V(t)$ sau a adâncimii de pătrundere a eroziunii $MDE(t)$, $tg\alpha$, în zona de stabilizare [15], [53], [91], [92], [39], [66], [73], [116], [119], figura 2.10;
2. viteza de staționare a eroziunii (de stabilizare, finală de palier) v_s [15], [66], [73], [116], figura 2.10;

3. viteza maximă a eroziunii v_{max} [15], [79], [82], [84], [116], [121], figura 2.10;
4. rezistența normalizată la cavitație R_n [15], [66], [73], [114], [121];
5. viteza adâncimii medii sau maxime de pătrundere a eroziunii, MDER respectiv $MDER_{max}$, sau inversul acestora, $1/MDER$ respectiv $1/MDER_{max}$, [39], [46], [47], [51], [55], [66], [73], [106], [121];
6. timpul de incubație t_i [15], [117], [119], [121];
7. durata necesară obținerii unei pierderi volumice sau masice date [15], [121];
8. durata necesară realizării unei anumite adâncimi de pătrundere [73], [121].

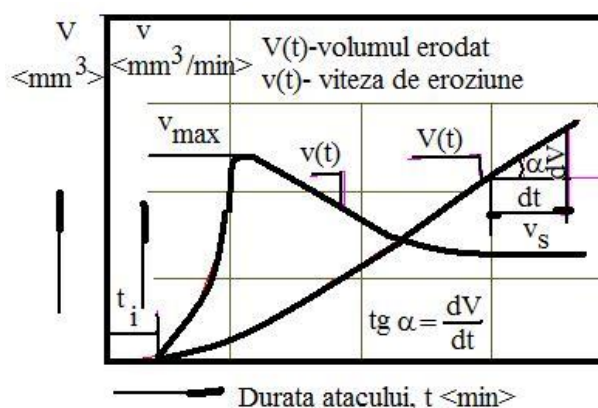


Fig. 2.10 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională

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

În cadrul tezei s-au utilizat parametrii 1, 4 și 5 pentru a permite discuții și evaluări de substanță ale influenței procedurii de tratament asupra rezistenței și comportamentului bronzurilor, la eroziunea produsă prin cavitație vibratoare.

3.3 Concluzii

Materialul selectat pentru experimentări este destinat execuției elicelor navale, iar aplicarea tratamentelor de îmbunătățire a caracteristicilor de comportare și rezistență la eroziunea cavitației, prin care durata de exploatare crește, poate duce la depășirea procentului de 82% [86] de utilizare a bronzurilor CuNiAl și CuNiAlMn la turnarea elicelor.

Aparatura și tehnica descrisă mai sus, asigură respectarea cerințelor de cercetare, precizate prin normele ASTM G32-2010 și oferă posibilitatea derulării cercetărilor la cel mai înalt nivel științific.

4. CERCETAREA COMPORTĂRII ȘI REZISTENȚEI LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A ALIAJULUI ÎN STARE DE LIVRARE

Înainte de începerea testelor de eroziune prin cavitație, după pregătirea probelor, pe suprafața ce urma a fi atacată de cavitație au fost realizate măsurători de duritate, prezentate în figura 4.1 și tabelul 4.1; valoarea medie este foarte apropiată de cea dată în standard (vezi capitolul 3).

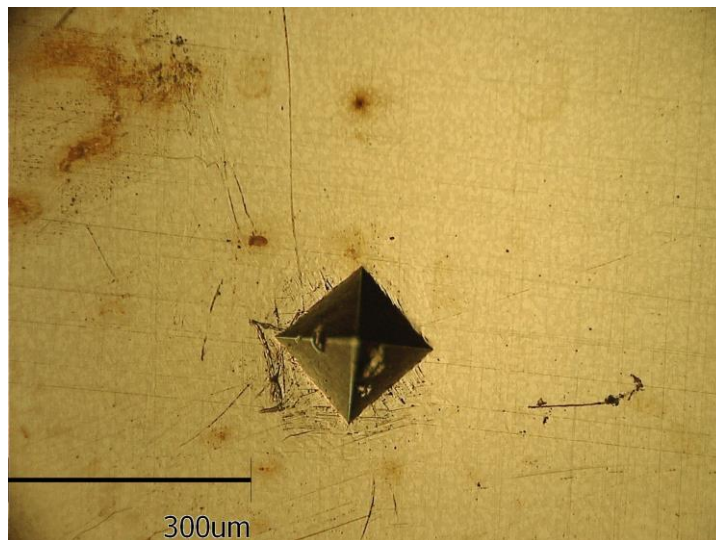


Fig.4.1 Imaginea unei amprente de duritate

Tabelul 4.1 Duritatea HV3, daN/mm²

Adâncimea [μm]	HV3	HV3 mediu
145	265	247
148	254	
149	251	
148	254	
155	232	
152	241	
152	241	
143	238	
152	241	
146	261	

Analiza compoziției chimice a materialului folosit în experimente atestă că concentrația în cupru și a principalelor elemente de aliere se încadrează în prescripțiile impuse de producător (tabelul 4.2).

Tabelul 4.2 Compoziția chimică a materialului AMPCO 45

ANALIZOR INNOV-X-SYSTEMS [MB]	Al [%]	Fe [%]	Ni [%]	Mn [%]	Cu [%]	Si [%]	Mo [%]	Pb [%]
	11,19	3,6	4,61	0,66	79,16	0,69	0,0306	0,0490
Ampco Metal CATALOG	10	2,5	5	1	rest			

4.1 Rezultatele experimentului de cavitație

Testele au fost realizate în conformitate cu procedura descrisă la capitolul 3. Conform cerințelor ASTM G32-2010 [121], au fost testate trei probe.

Modul de pregătire a probelor, înainte de testare, a respectat procedura descrisă la capitolul 3 și este conformă cutumei laboratorului.

Pentru reducerea erorilor de experiment (cum ar fi defecte de material, erori de cântărire, abateri de la valorile prestabilite ale parametrilor funcționali ai aparatului, etc.) s-a recurs la prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale, cu verificarea nivelului erorilor, folosind procedura descrisă în [39], [41], [66], [73]. În această prelucrare sau utilizat rezultatele obținute pe cele trei probe. Pentru această verificare statistică, a rezultatelor experimentale obținute în laborator, s-a dorit construirea unei benzi de dispersie. Banda de dispersie a fost construită cu ajutorul erorii standard de estimare și al unor curbe de regresie polinomiale. Avantajul utilizării curbelor de regresie constă în faptul că aceste curbe oferă o imagine mai exactă asupra rezultatelor experimentale.

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

$$Y = a \cdot x(1 - e^{-bx}) \quad (4.1)$$

unde:

- Y este curba de regresie;
- x este timpul la care se calculează valoarea Y;
- a și b sunt constante alese astfel încât curba de regresie să aproximeze cât mai bine punctele experimentale.

După stabilirea curbei de regresie, s-a calculat valoarea medie pentru aceasta, precum și mediile pentru adâncimile medii cumulate și pentru timp. De asemenea am calculat dispersia cu ajutorul relației:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.2)$$

unde:

- s^2 este dispersia parametrului calculat (adâncimea medie cumulată, timp, etc.);

- n este numărul încercărilor efectuate;
- \bar{x}_i este valoarea experimentală a parametrului calculat ;
- \bar{x} este media aritmetică a valorilor parametrului calculat.

Abatererea standard s-a obținut cu ajutorul dispersiei, calculând rădăcina pătrată a acesteia. Următorul pas a fost calcularea erorii standard de estimare. Aceasta este necesară pentru construirea benzii de dispersie. Formula de calcul a erorii standard de estimare este:

$$s_{xy} = \left[\frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n - 2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

unde:

- y_i este adâncimea medie de pătrundere a eroziunii la timpul i ;
- Y_i este eroarea de estimare la timpul i ;
- n este numărul de încercări.

Ultima etapă parcursă a constat în stabilirea intervalului de toleranță, care reprezintă numărul de puncte experimentale ce trebuie să se regăsească în banda de dispersie, figura 4.2, pentru ca aceasta să poată fi considerată bună. Limita superioară a intervalului de toleranță, notată cu S , s-a obținut prin adunarea valorii standard de estimare cu valoarea curbei de regresie. Limita inferioară a intervalului de toleranță, notată cu I , s-a obținut prin scăderea valorii erorii standard de estimare din valoarea curbei de regresie. Pentru intervale de toleranță de 95% sau 99%, limitele interval s-au calculat astfel:

- Interval de toleranță 99%: $P99S(xc) = HmE(xc) + 3s_{xy}$; $I = HmE(xc) - 3s_{xy}$;
- Interval de toleranță 95%: $P95S(xc) = HmE(xc) + 2s_{xy}$; $I = HmE(xc) - 2s_{xy}$;

Notațiile utilizate în figură sunt:

- $P99S(xc)$ – limita superioară a intervalului de toleranță;
- $P99I(xc)$ – limita inferioară a intervalului de toleranță;
- h_1, h_2, h_3 – adâncimile medii cumulate de eroziune, corespunzătoare fiecărei din cele trei probe;
- hm – media aritmetică a adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii, aferente celor trei probe.

$HmE(xc)$ - curba analitică de regresie, definită de ecuația (4.7).

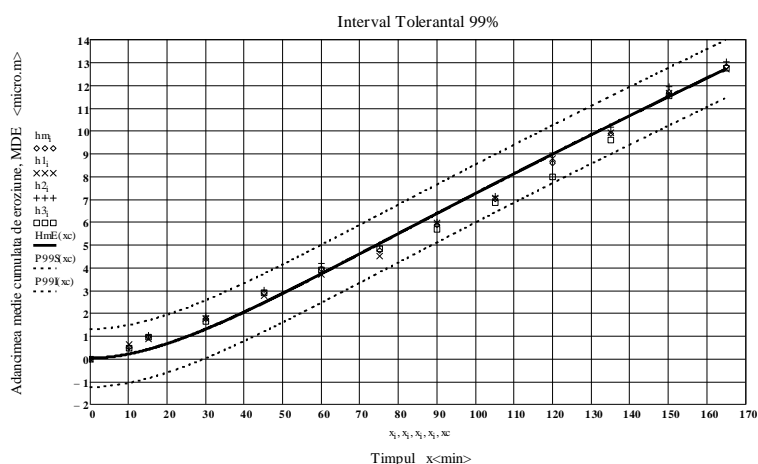


Fig. 4.2 Banda de dispersie

Uniformitatea eroziunii este dată de valoarea erorii standard de estimare. Cu cât această eroare este mai mare, cu atât eroziunea este mai neuniformă.

În tabelul 4.3 sunt prezentate valorile maxime ale adâncimii medii cumulate de eroziune, la finalizarea testului, ale curbelor de regresie și eroarea standard (s_{xy}).

Tabelul 4.3 Valorile parametrilor statistici

Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii după 165 minute de atac [μm]	12,694
Valoarea maximă conform curbei de regresie [μm]	13,966
Valoarea minimă conform curbei de regresie [μm]	11,422
Eroarea standard de estimare (s_{xy}) [μm]	0,424

Valoarea mică a abaterii standard (sub 0,5) sugerează că eroziunea produsă în bronzul AMPCO 45 este realizată în mod uniform.

4.1.1 Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație

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

$$m = \sum_{i=1}^{12} \Delta m_i \quad (4.4)$$

Pe baza pierderilor masice s-au determinat valorile experimentale pentru adâncimile medii de pătrundere a eroziunii MDE și vitezei acesteia MDER, cu relațiile:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, cumulată

$$MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{4 \cdot \Delta m_i \cdot 10^6}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) [\mu\text{m}] \quad (4.5)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii

$$MDER_i = \Delta MDE_i / \Delta t_i \quad (4.6)$$

unde:

i - reprezintă perioada de testare;

Δm_i - este masa de material, pierdută prin eroziune, în perioada i, în grame,

ρ - densitatea bronzului (vezi capitolul 3), în grame/mm³;

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

d_p - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ($d_p = 15,8$ mm - deoarece, diferența dintre diametrul suprafeței erodate efective și cea a suprafeței atacate este foarte mică, peste 90 % din suprafață este erodată-vezi imaginile de la paragraful 3.1.3, fig. 2.1);

ΔMDE_i - valoarea adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, realizată prin cavitație în perioada Δt_i .

Aproximare valorilor experimentale este realizată prin curbe analitice construite cu relațiile stabilite pe baza modelului prezentat în [15], [28], [66].

Formele analitice ale relațiilor [66]:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (4.7)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (4.8)$$

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.

Utilizarea curbelor de aproximație este foarte importantă, deoarece, funcție de forma pe care o are și dispersia punctelor experimentale față de aceasta, se pot face aprecieri despre evoluția comportării și rezistenței pe durata atacului cavitațional.

Pentru construirea curbei de aproximație a valorilor experimentale, obținute pentru cele trei probe, s-a calculat valoarea medie a pierderilor masice, pentru fiecare perioadă intermediară de testare. Cu ajutorul pierderilor masice medii au fost determinate valorile experimentale ale adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii (MDE), cu relația (4.7) și ale vitezelor adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii MDER, cu relația (4.8).

În figura 4.3 sunt date cele două curbe specifice comportării bronzului la eroziunea produsă de cavitația vibratoare.

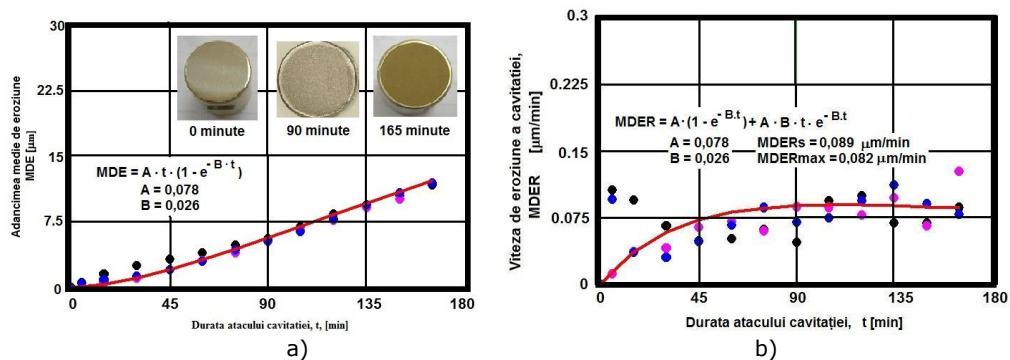


Fig.4.3 Curbe specifice ale evoluției comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație:

- Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
- Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Din cele două imagini se observă o bună aproximare a punctelor experimentale, de către curbele construite analitic.

Pentru evidențierea evoluției eroziunii în suprafața expusă atacului prin cavitație, în imaginea din figura 4.3a sunt redată și fotografiile ale suprafeței uneia din cele trei probe, la trei timpi caracteristici (0, 90 și 165 minute).

4.1.2 Analiza rezultatelor experimentale

Dispersia punctelor experimentale, în ambele diagrame din figura 4.3, arată că eroziunea prin cavitație este un fenomen cu o natură neuniformă. Deoarece, fiecare din cele trei probe, obținute din aceeași bară, are un comportament ușor diferit față de celelalte două probe.

Evoluția curbei adâncimii medii de pătrundere a eroziunii $MDE(t)$, figura 4.3a, arată că, începând cu minutul 45, forma tinde spre una liniară, ceea ce înseamnă că, practic, din acest moment comportarea bronzului este aceeași până la finalizarea testului de cavitație. De altfel, același fenomen se constată, pentru toate cele trei probe și din figura 4.3b.

Diferențele dintre valorile experimentale, fie că ne referim la adâncimea medie de eroziune MDE , fie că ne referim la viteza medie de pătrundere a eroziunii $MDER$, sunt mici, dovedind uniformitatea structurală și distribuția uniformă a caracteristicilor mecanice în suprafața și structura materialului. Acest mod de dispersie este specific materialelor cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație [15], [66], [73], [43]. De asemenea, diferența foarte mică dintre valoarea maximă a parametrului $MDER$ ($0,089 \mu\text{m}/\text{min}$) și cea spre care tinde să se stabilizeze ($0,082 \mu\text{m}/\text{min}$) arată că bronzul cercetat face parte din categoria materialelor cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație și poate fi folosit în fabricarea pieselor puternic solificate prin cavitație, așa cum sunt elicele navale.

Diferența mare dintre punctele experimentale și curba de aproximare, până la minutul 15, figura 4.3b este datorată și prafului abraziv și rugozităților, expulzate în această perioadă, motiv pentru care acest interval de atac prin cavitației, obișnuit [15], [66], [73], nu este analizat din punct de vedere al comportării materialului, el fiind puternic dependent de gradul de spălare și curățire a probei, înainte de începerea testului de eroziune prin cavitație.

Cele trei fotografii, realizate la timpi caracteristici, arată clar intensitatea atacului cavitației, distrugerea producându-se tot mai mult în profunzime.

4.2 Investigarea fenomenologică a microstructurii erodate

Imaginile redată în figurile 4.4 ÷ 4.14 și tabelul 4.4 pun în lumină particularitățile mecanismului de degradare a suprafeței cavitate pentru starea de prelucrare a materialului prin deformare plastică la cald. Conform figurilor 4.4 și 4.8, microstructura materialului de bază este alcătuită în principal dintr-o soluție solidă α și dintr-o proporție redusă de eutectoid $\alpha + \gamma'$. Întrucât soluția solidă imprimă o bună plasticitate, iar eutectoidul mărește caracteristicile de rezistență mecanică, este de așteptat ca inițierea fenomenului de cavitație să se producă pe interfața celor doi constituenți structurali și să se continue cu smulgerea grăunților de soluție solidă. Acest lucru reiese clar din imaginile prezentate în figurile 4.9 și 4.11 și tabelul 4.4. În plus, microscopia electronică cu baleiaj (figura 4.11) evidențiază

formarea maclelor de recoacere și cavitarea cu prioritate a grăunților de soluție solidă.

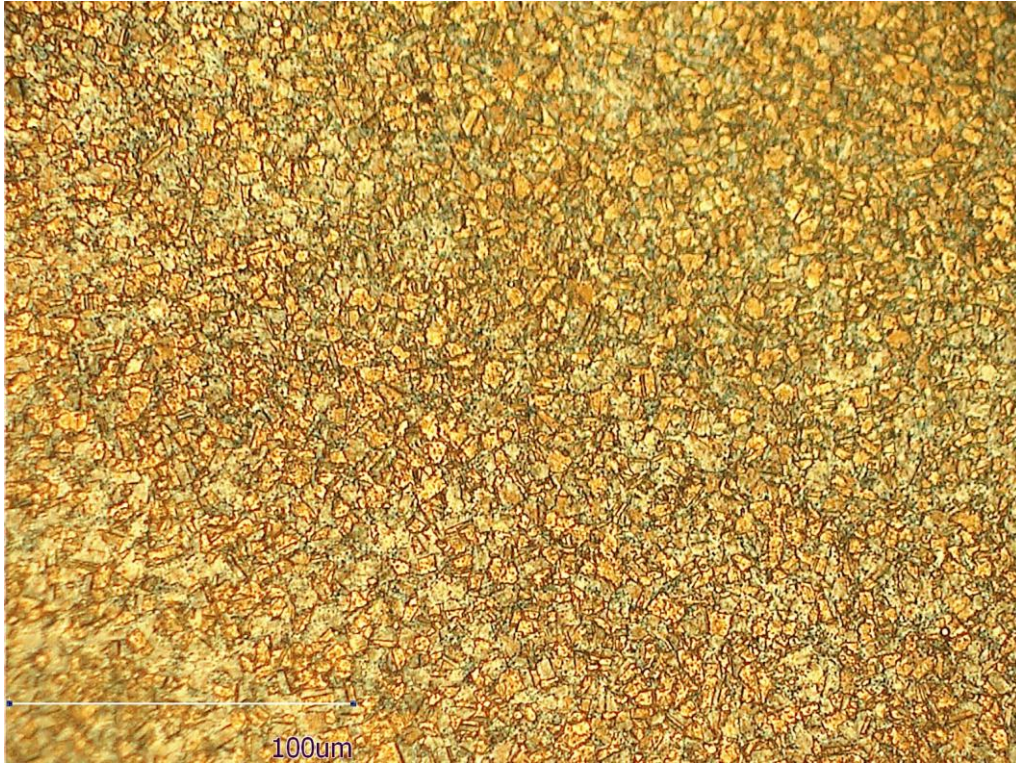


Fig.4.4 Imagine microscopică AMCO 45 in stare livrata(150x)

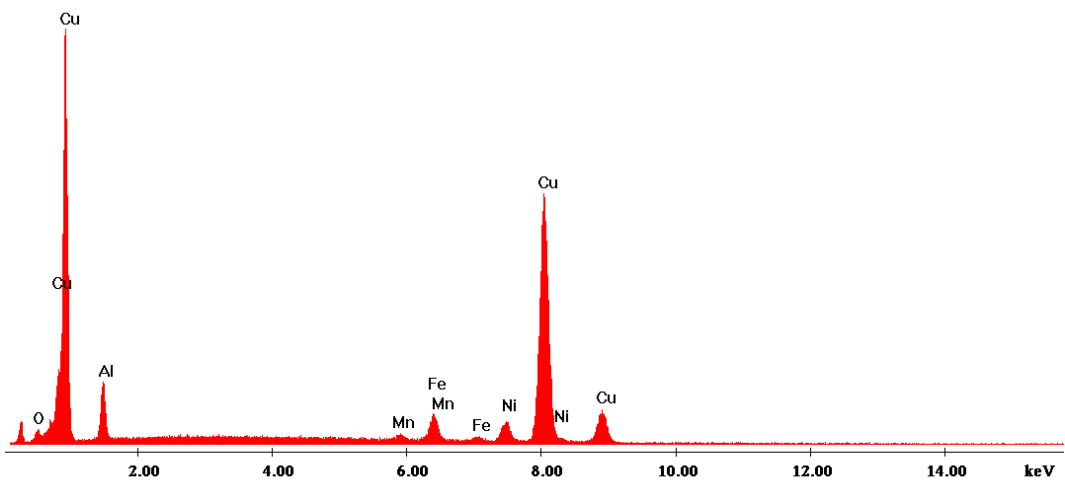
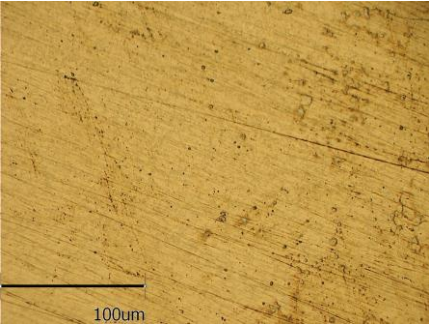
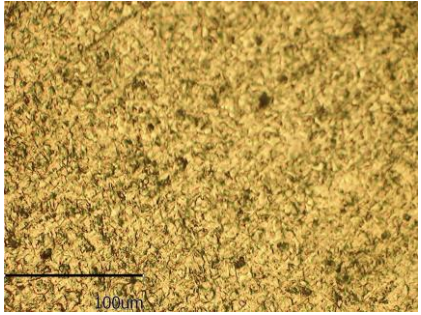
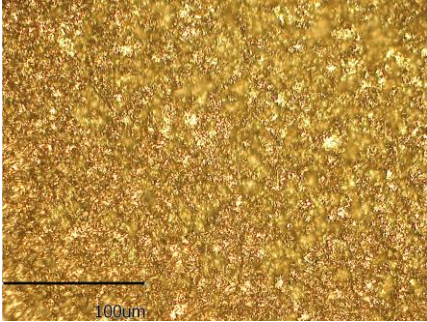
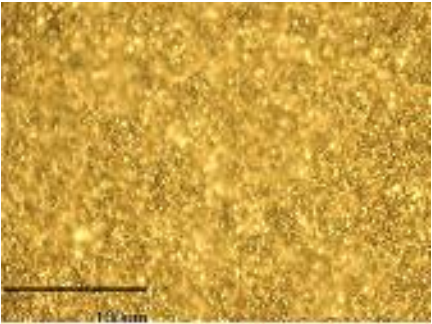


Fig.4.5 Imagine EDAX, AMCO 45 în stare livrată

Tabelul 4.4 (mărire 150x)

Durata atacului prin cavității [min]	Imaginea structurii erodate
0	 a)
30	 b)
90	 c)
165	 d)

Măsurătorile de rugozitate a suprafeței (figurile 4.6 și 4.7) indică o variație lină a acesteia, urmare a microstructurii uniforme și compacte obținută în urma deformării plastice.

Analizele EDX efectuate în materialul de bază (figura 4.5) și în 3 zone distincte ale suprafeței testate la eroziune prin cavitație (figurile 4.12, 4.13 și 4.14) alături de microscopia electronică cu baleiaj, confirmă faptul că degradarea prin cavitație este uniformă și că nu se produc schimbări ale compoziției chimice ale materialului.

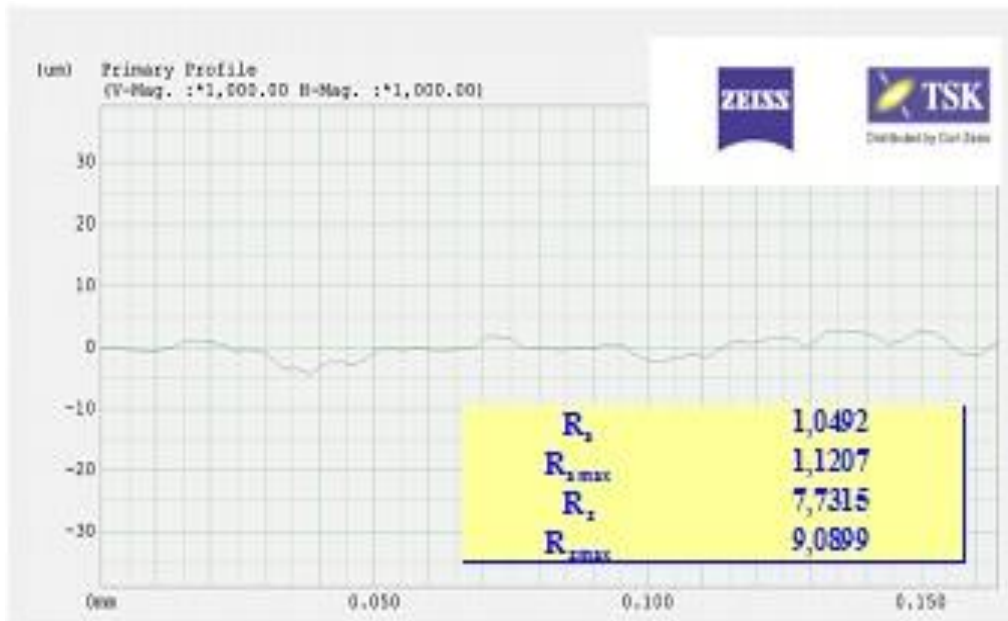


Fig.4.6 Rugozitatea măsurată după 165 de minute de atac al cavitației
- ZEISS SURF COM 2000 SD3

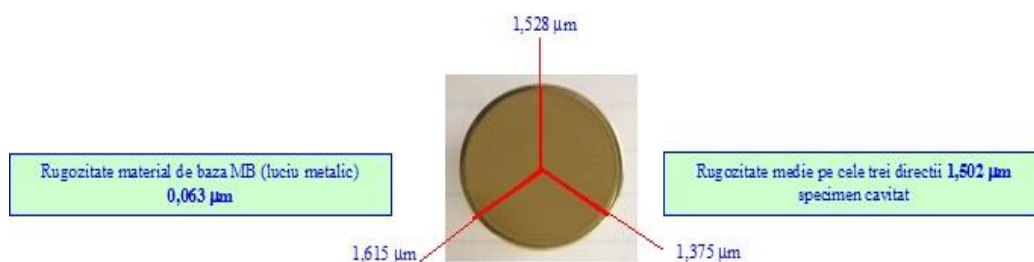


Fig.4.7 Direcții de măsurare pe suprafața erodată prin cavitație (după 165 minute) – aparat MITUTOYO

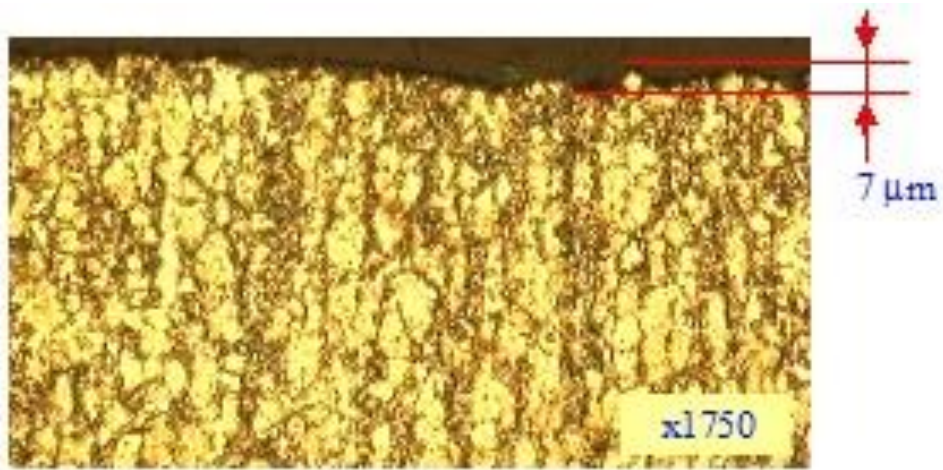


Fig.4.8 Suprafața erodată prin cavitație (165 minute) - microscopie digitală

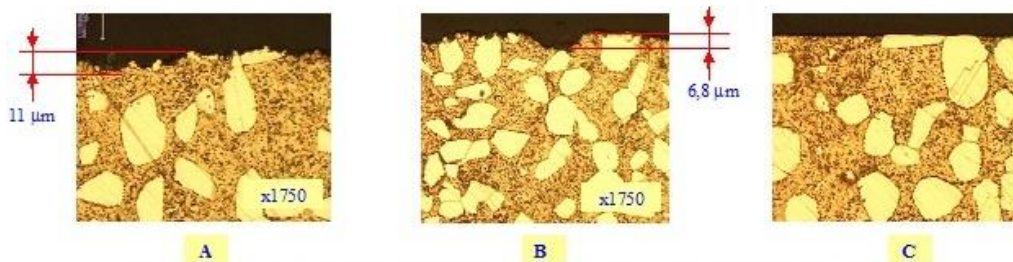


Fig. 4.9 Imagini ale secțiunii transversale la finalul atacului prin cavitației (165 minute) - Microscopie digitală - aparat HIROX 1300
A- zona centrală; B- zona de trecere; C- margine

În cele ce urmează sunt redată imagini SEM.

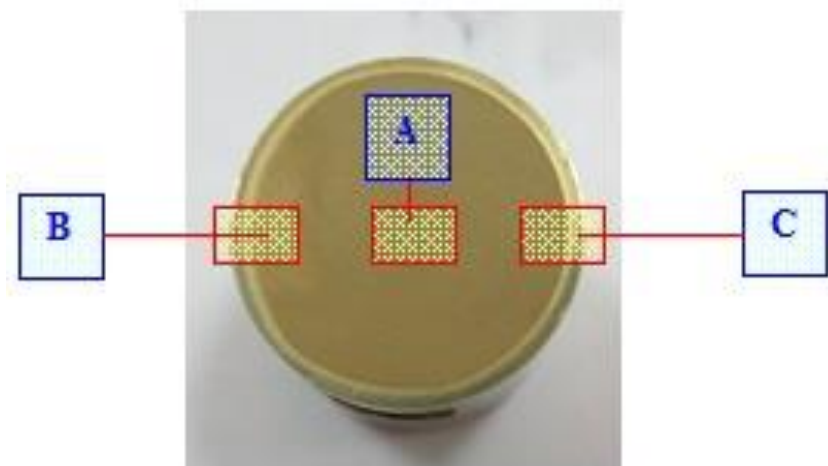


Fig.4.10-Zone de înregistrare

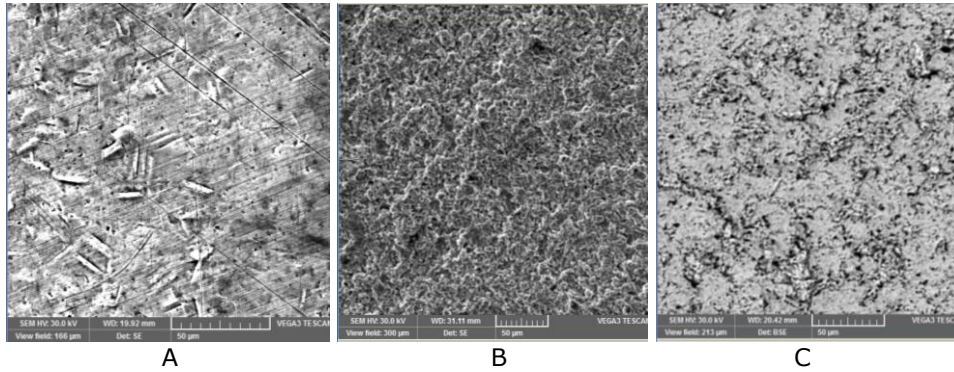
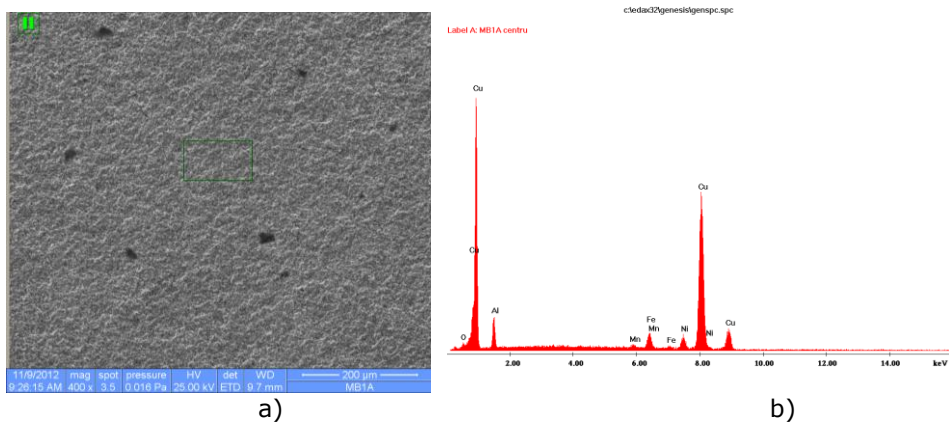


Fig.4.11 Imagini ale zonelor marcate în figura 4.10



EDAX ZAF Quantification (Standardless)
Element Normalized
SEC Table : Default

Elem	Wt %	At %	K-Ratio	Z	A	F
O K	2.29	7.57	0.0072	1.1618	0.2694	1.0026
AlK	9.12	17.86	0.0198	1.0839	0.2005	1.0000
MnK	0.83	0.80	0.0092	0.9863	0.9726	1.1606
FeK	3.68	3.48	0.0452	1.0067	0.9837	1.2395
NiK	5.24	4.72	0.0532	1.0261	0.9880	1.0000
CuK	78.84	65.57	0.7672	0.9794	0.9936	1.0000
Total		100.00	100.00			

Fig.4.12 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX-zona centrală A

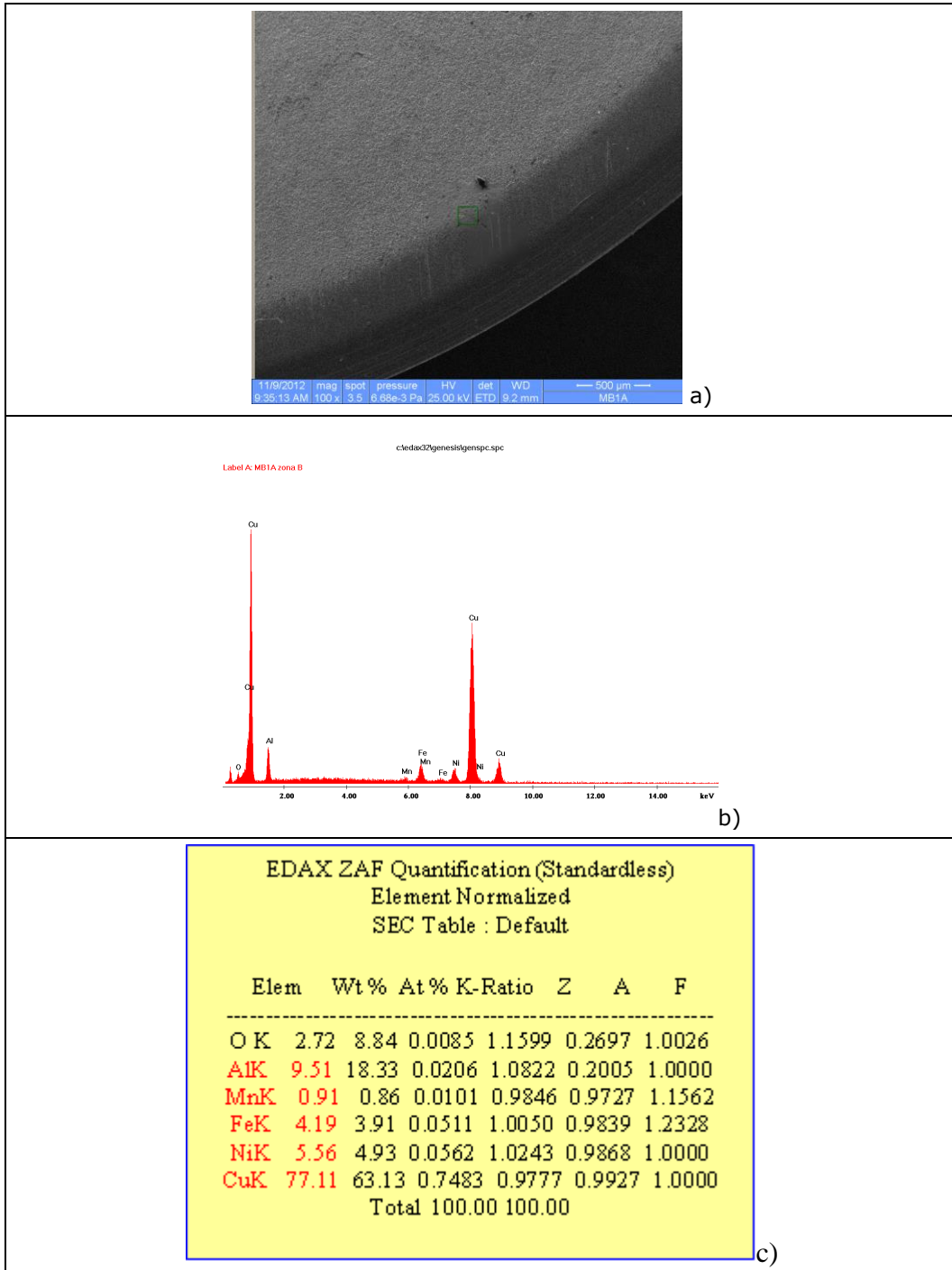


Fig. 4.13 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX-zona de trecere B

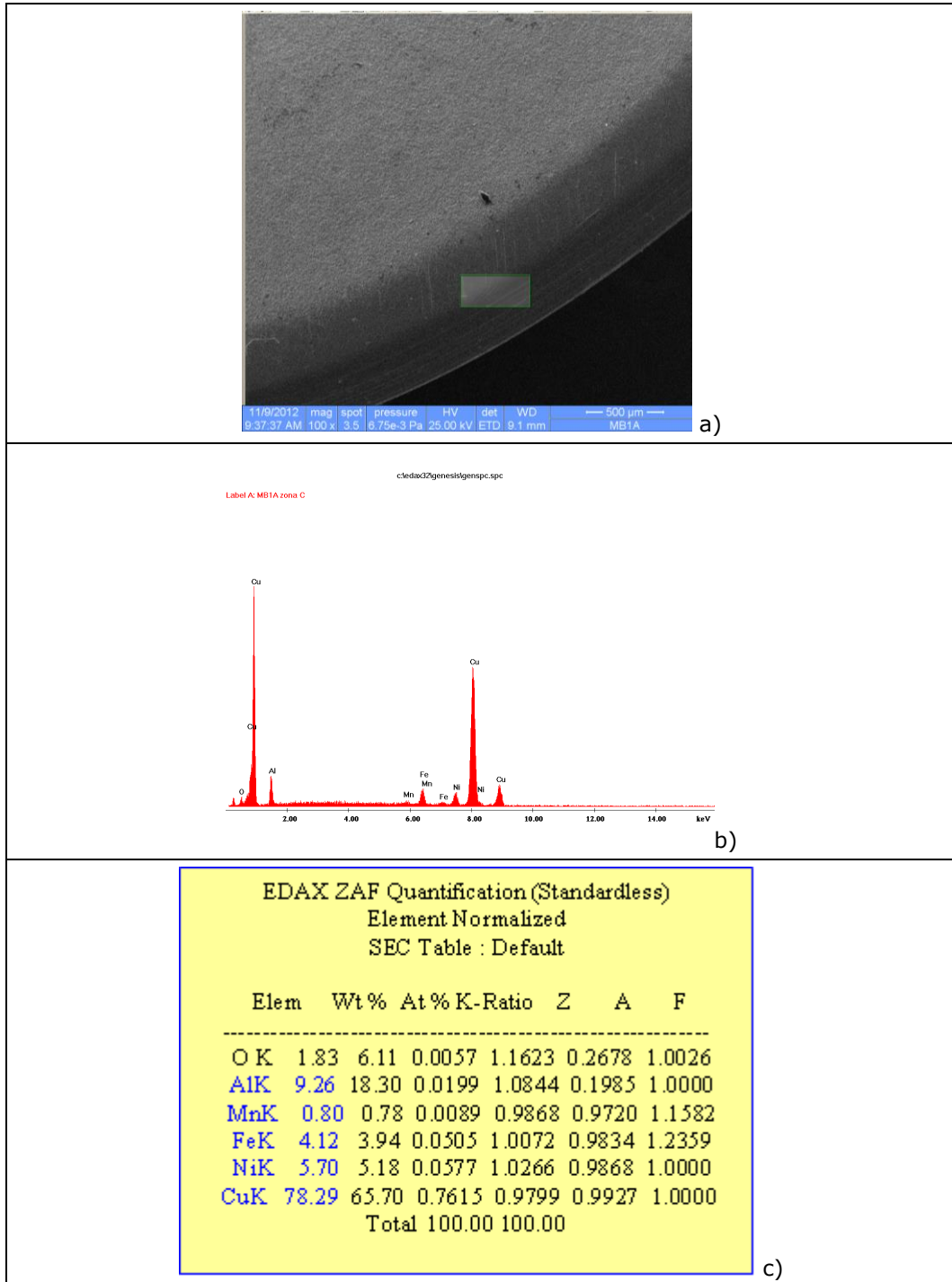


Fig. 4.14 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX-zona de margine C

4.3 Concluzii

Valoarea redusă a abaterii standard, obținută din prelucrarea statistică, arată că bronzul AMPCO 45 s-a comportat aproximativ uniform, pe tot parcursul atacului cavitației.

Modul de evoluție a curbelor de aproximare a punctelor experimentale și dispersia redusă, dintre punctele corespunzătoare celor trei probe, sugerează că bronzul AMPCO 45 este omogen structural, cu comportare și rezistență asemănătoare cu a materialelor cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație vibratoare.

Microstructura de deformare plastică, este alcătuită în principal dintr-o soluție solidă α și dintr-o proporție redusă de eutectoid $\alpha + \gamma'$.

Deoarece soluția solidă α imprimă o bună plasticitate, iar eutectoidul mărește caracteristicile de rezistență mecanică, incipiența fenomenului de eroziune prin cavitație se produce pe interfața celor doi constituenți structurali și continuă cu smulgerea grăunților de soluție solidă.

Capitolul 5

ÎMBUNĂȚIREA PRIN TRATAMENT TERMIC VOLUMIC A REZISTENȚEI LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE

În cadrul acestui capitol este pusă în evidență influența tratamentului termic asupra comportării și rezistenței aliajului AMPCO 45 la eroziunea produsă prin cavitația generată în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2.

5.1. Tratamentul aplicat

Tratamentul termic aplicat, conform diagramei din figura 5.1, constă în:

- Încălzire la 890°C – Menținere 20 min.- Racire apa, urmată de
- Încălzire 520°C – Menținere 60 min.- Răcire în aer.

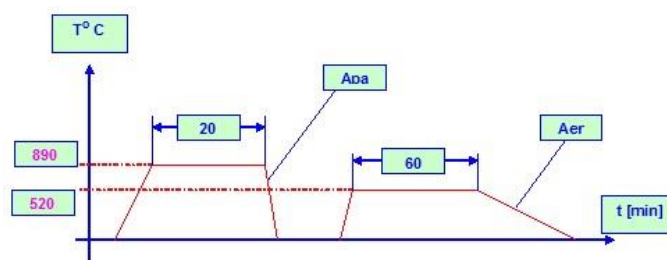


Fig.5.1 Ciclograma de tratament termic

În urma tratamentului termic măsurătorile de duritate, realizate în 8 puncte arată modificarea, importantă, realizată în suprafața expusă cavitației, tabelul 5.1. Pentru evidențierea efectului tratamentului aplicat, tot în acest tabel, au fost introduse și valorile durității măsurate pe suprafața probei netratate.

Tabelul 5.1 Duritatea HV3, daN/mm²

AMPCO 45 tratat termic			AMPCO M45 Stare livrată		
Adâncimea [μm]	HV3	HV3 medie	Adâncimea [μm]	HV3	HV3 medie
161	294	298	145	265	247
159	301		148	254	
159	301		149	251	
159	301		148	254	
159	300		155	232	
158,5	300		152	241	
1161	293		152	241	
165	293		143	238	
			152	241	
			146	261	

După valorile medii, afișate în tabelul 5.1, rezultă că prin tratamentul termic aplicat s-a obținut o creștere a durezzații HV3 cu circa 20,64%.

5.2 Rezultatele experimentului de cavitație

Conform uzanțelor de experiment [15], [66], [73] au fost tratate termic, prin procedura precizată și testate la cavitația vibratoare trei probe.

Testele au fost realizate în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2 (vezi capitolul 2).

Metoda utilizată este cea standard, cu respectarea cerințelor prevăzute în ASTM G32-2010 [121].

Pentru evidențierea acurateții cercetării, repetabilității rezultatelor și modului de erodare prin cavitație, prin metode statistice [39], [41], [66], [73], s-a construit banda de dispersie, figura 5.2 și s-au determinat valorile maxime ale adâncimii medii cumulate de eroziune la finalizarea testului, ale curbilor de regresie și ale eroării standard (s_{xy}), tabelul 5.2.

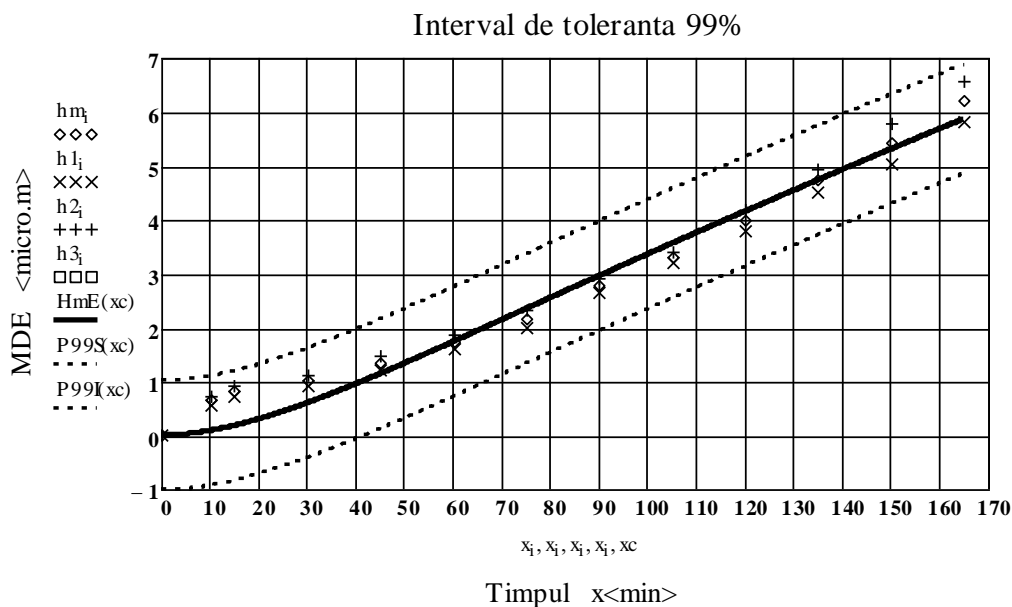


Fig. 5.2 Banda de dispersie

Din figura 5.2 se observă că, și în acest caz, banda de dispersie este redusă, ceea ce arată o comportare similară a celor trei probe testate. Diferențele din banda de erori sunt firești pentru un proces de complexitatea eroziunii prin cavitație [15], [43].

Tabelul 5.2 Valori ale parametrilor statistici

Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii după 165 minute de atac [μm]	6,208
Valoarea maximă conform curbei de regresie [μm]	7,366
Valoarea minimă conform curbei de regresie [μm]	5,05
Eroarea standard de estimare (s_{xy}) [μm]	0,386

Valoarea mică a abaterii standard, sub 0,4, arată, că prin acest tratament termic, s-a obținut omogenitate structurală și de proprietăți în toată suprafața expusă cavitației; eroziunea produsă, în bronzul AMPCO 45 tratat termic, este realizată în mod uniform.

5.2.1 Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație

În figura 5.3 sunt prezentate rezultatele experimentele pentru adâncimea medie cumulată de eroziune MDE și viteza de pătrundere a eroziunii MDER.

Curbele de aproximare a punctelor experimentale au fost construite cu relațiile (4.7) și (4.8).

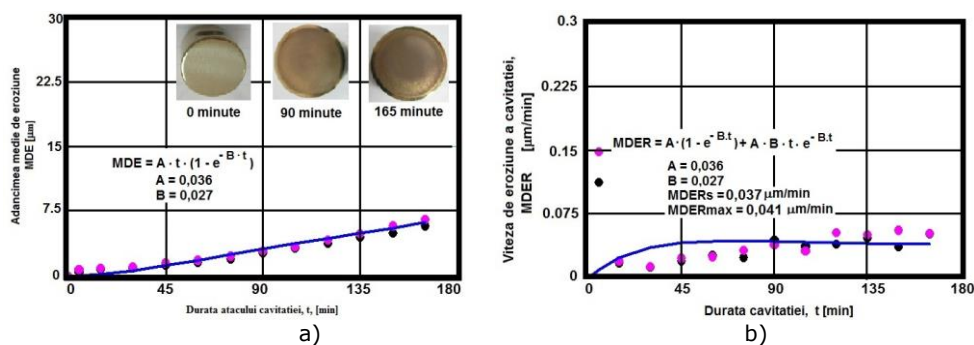


Fig.5.3 Curbe specifice ale evoluției comportamentului și rezistenței la eroziunii prin cavitație:

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Din figura 5.3a se observă că aproximarea este foarte bine realizată în ultimele 30 minute de atac al cavitației.

Din figura 5.3b se constată o foarte bună mediere, realizată de curba de aproximare, pe intervalul 90-165 minute, similara cu aproximarea din fig.5.3a.

Fotografiile realizate, la cei trei timpi caracteristici ilustrează foarte clar rezistența suprafețe atacate la eroziunea prin cavitație.

5.2.2 Analiza rezultatelor experimentale

Disponerea punctelor experimentale, sub curba de aproximare, figura 5.3a, intervalul 45-135 minute, arată rezistența creată de tratamentul aplicat, suprafeței expuse, față de impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate prin implozia bulelor cavitaționale.

Modul de mediere a punctelor experimentale, din figura 5.3b, de curba analitică de aproximare, are explicații în deformațiile, fisurările și masa de bronz expulzată, în timpul perioadelor intermediare de testare. Fenomenul este firesc și poate fi explicat și prin modul de utilizare a energiei dezvoltate în procesul cavitațional [15], [43], [58], [79], [84], [116]. Astfel, în intervalul 45-135 minute, energia este folosită, în mare parte, pentru fisurări și mai puțin pentru expulzări de material. Fenomenul începe să se schimbe, din minutul 90, când fisurile se unesc și apar expulzări mai importante, dar și durificare locală, întrucât, pe intervalul 90 - 165 minute, viteza de eroziune prin cavitație se menține aproximativ constantă, pentru fiecare din probe. Datorită acestui mod de comportare, diferența dintre maximul vitezei de pătrundere a eroziunii ($0,041 \mu\text{m}/\text{min}$) și cel spre care tinde să se stabilizeze ($0,037 \mu\text{m}/\text{min}$) este nesemnificativă.

Diferența dintre curba analitică și punctele experimentale, ale parametrului MDER, din intervalul 15-175 minute, arată rezistența dobândită de bronz și efectul benefic al tratamentului aplicat.

Ca și în cazul aliajului netratat, evoluția curbei de aproximare sugerează o comportare specifică materialelor cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație.

5.2.3 Investigarea fenomenologică a microstructurii erodate

Este cunoscut faptul că aliajele binare Cu-Al cu până la 9,4% Al au o structură monofazică, alcătuită din soluția solidă α de Al dizolvat în Cu. La depășirea limitei de solubilitate, conform diagramei de echilibru Cu-Al [88], în structură apare faza β care este o soluție solidă pe bază de compus electronic Cu_3Al . Aliajele mai bogate în Al sunt constituite la temperatura camerei din faza α și eutectoidul $\alpha + \gamma'$ (γ' este compusul electronic $\text{Cu}_{32}\text{Al}_{19}$).

În condiții industriale de răcire, se constată formarea eutectoidului și în structura bronzurilor cu 6 - 8% Al. Alierea suplimentară cu Ni, Fe, Mn, etc. micșorează solubilitatea maximă a Al în Cu astfel că linia de transformare eutectoidă va fi deplasată spre concentrații mai mici în Al și la temperaturi mai scăzute. Existența transformării eutectoide face ca acest aliaj să fie susceptibil la durificare prin tratamentul termic de călire urmată de îmbătrânire prin dispersie (fig. 5.1). În cursul fazei de încălzire, eutectoidul $\alpha + \gamma'$ se transformă în faza β , iar prin răcire bruscă se declanșează transformarea fără difuzie, cu formarea unei structuri martensitice. Operația finală de tratament termic, care este o îmbătrânire prin revenire, provoacă o durificare prin dispersie sub efectul descompunerii parțiale a martensitei și precipitării unor combinații chimice fin dispersate (figura 5.4). Valorile reduse ale rugozității (figurile 5.5 și 5.6) alături de o degradare fină și uniformă a suprafeței cavitate (tabelul 5.3 și figura 5.10) și de valorile mai scăzute ale mărimilor ce caracterizează eroziunea prin cavitație demonstrează eficiența tratamentului termic aplicat.

Analizele EDX (figurile 5.11 ÷ 5.13) reliefează că doar în zona centrală a probei se constată o ușoară scădere a concentrației în Al, explicabilă probabil prin expulzarea mai pronunțată a unor faze de compuși ai acestuia cu Cu și cu Fe.

Figurile 5.8 ÷ 5.10 arată forța de penetrare a eroziunii în structura bronzului, determinând cratera de diverse dimensiuni, funcție de zona din suprafața erodată, prezentată în figura 5.7.

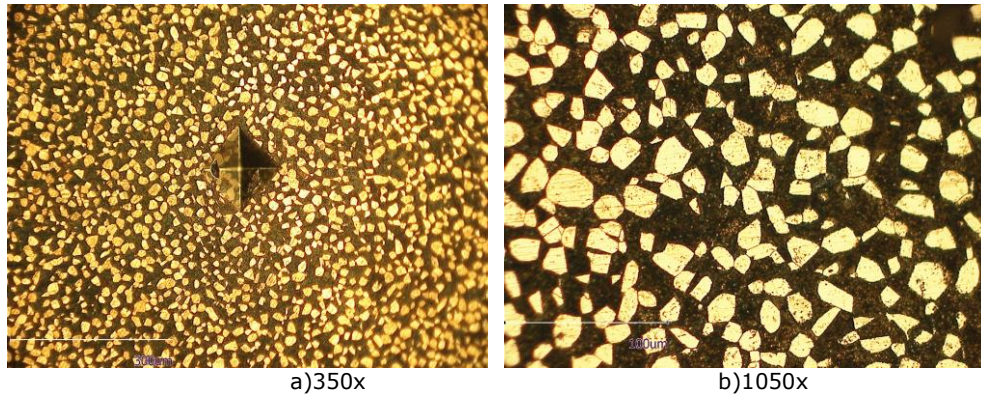
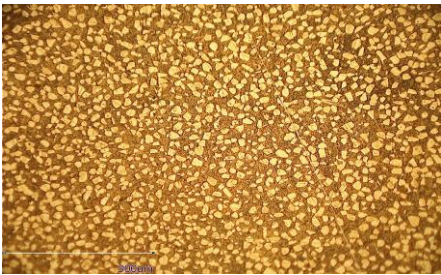

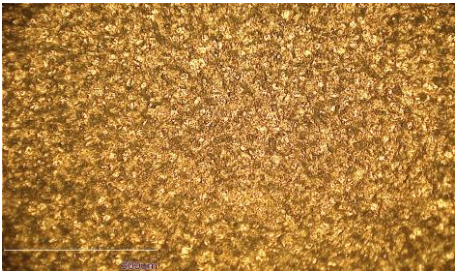
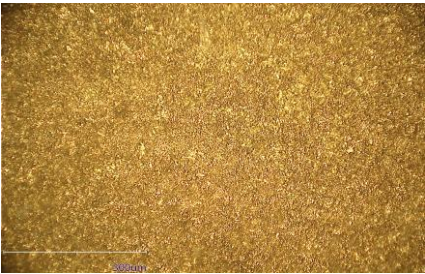


Fig.5.4 Imagini microscopice ale structurii bronzului AMPCO 45 tratat termic

Tabelul 5.3 Imaginea structurii erodate (x150)

Durata atacului cavitației [min]	
0	30
 <p>a)</p>	 <p>b)</p>
Durata atacului cavitației [min]	
90	165
 <p>c)</p>	 <p>d)</p>

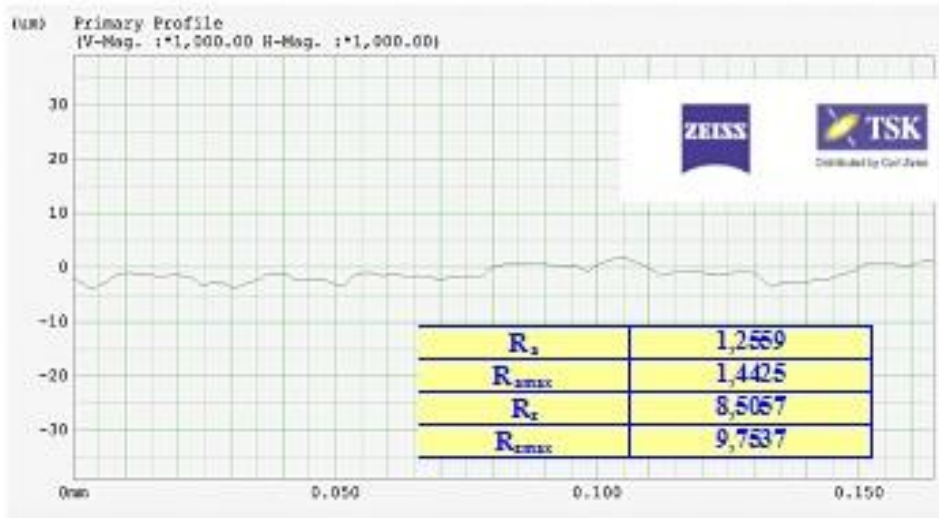


Fig.5.5 Rugozitatea măsurată după 165 minute de atac al cavitației - ZEISS SURF COM 2000 SD3



Fig.5.6 Direcții de măsurare pe suprafața erodată prin cavitație (după 165 minute) – aparat MITUTOYO

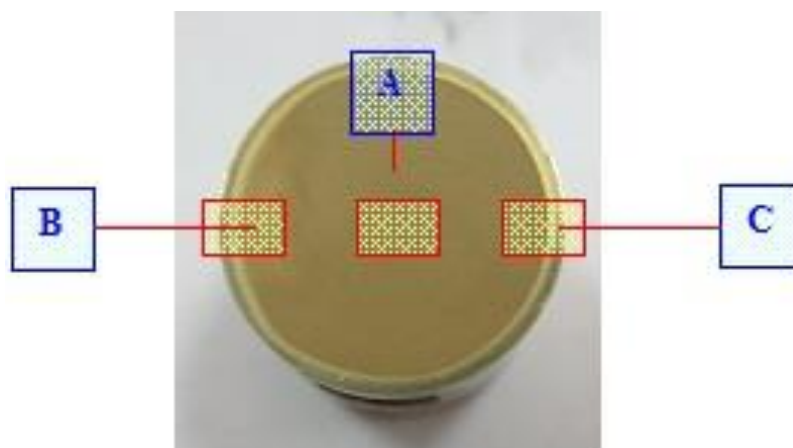


Fig.5.7 Zone de înregistrare

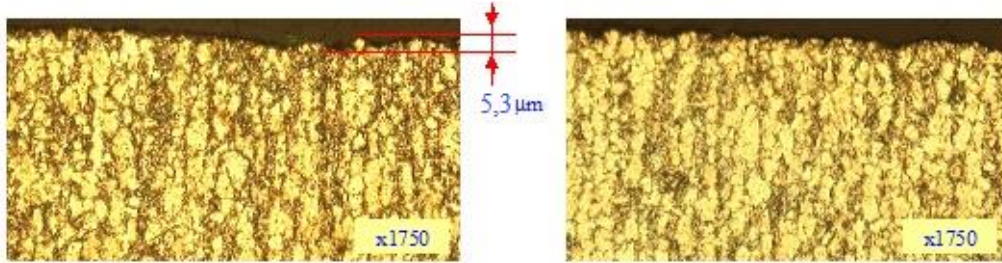


Fig.5.8 Suprafața erodată prin cavitație (165 minute)-microscopie digitală
A- Zona centrală; C - Marginea inelul cavitațional

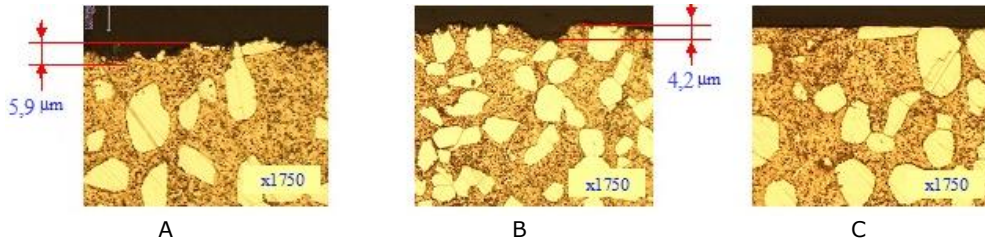


Fig. 5.9 Imagini ale secțiunii transversale la finalul atacului cavitației (165 minute) Microscopie digitală - aparat HIROX 1300
A- Zona centrală; B- Zona de trecere ; C- marginea probei, neerodată

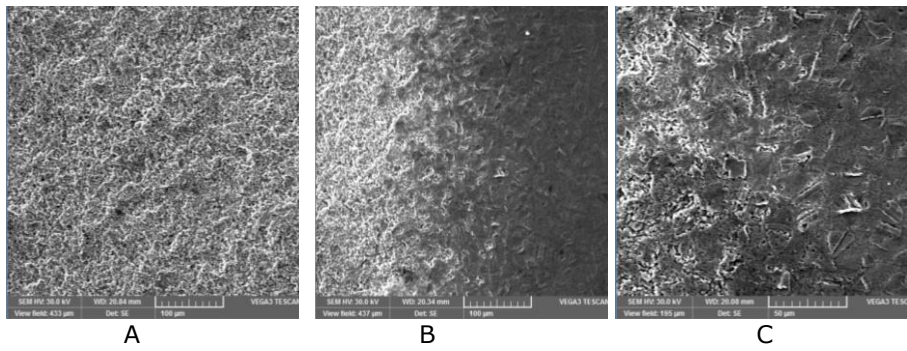


Fig.5.10 Imagini ale zonelor marcate în figura 5.7

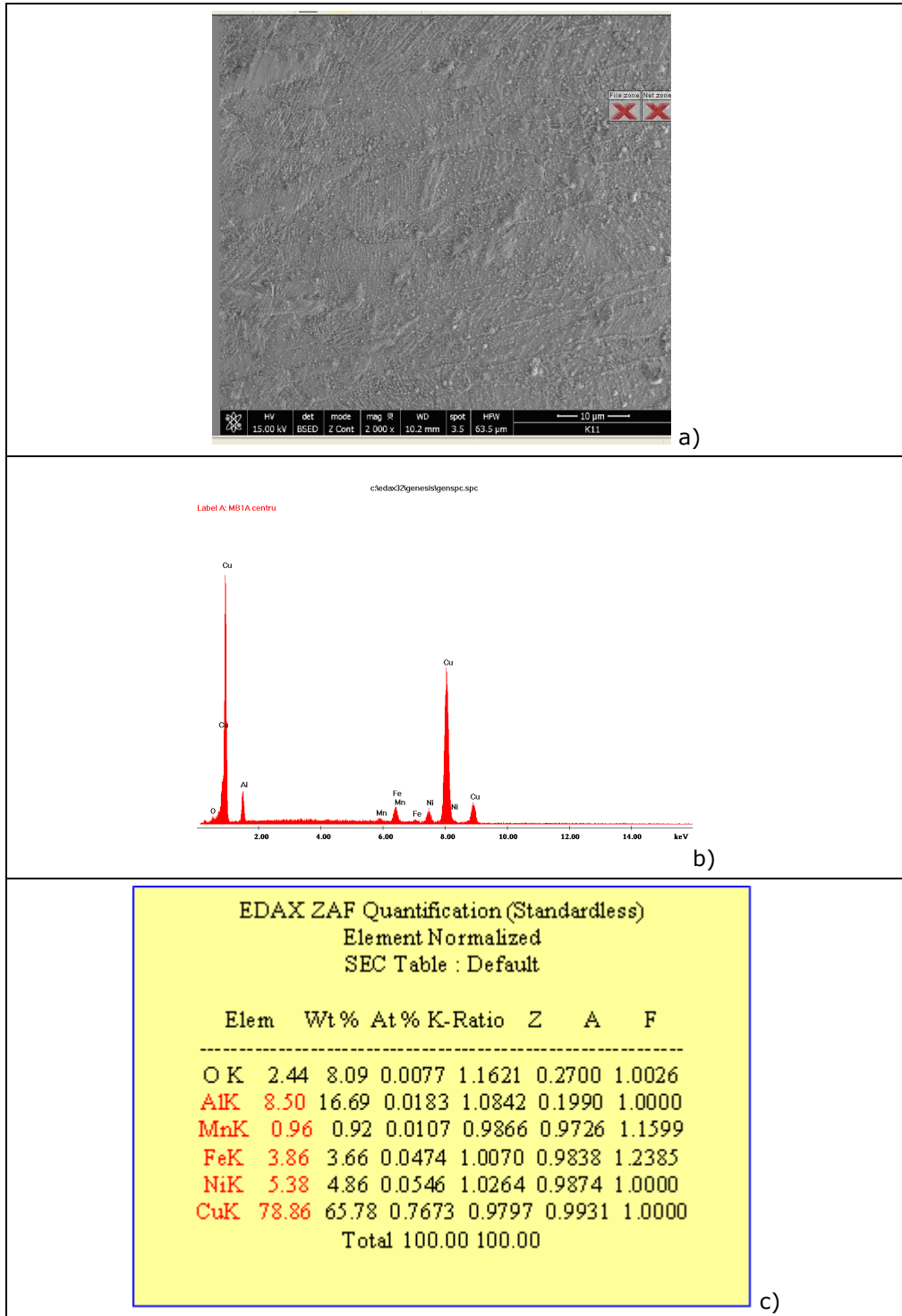


Fig.5.11 Microscopie SEM și spectroscopie EDX, Zona centrală A

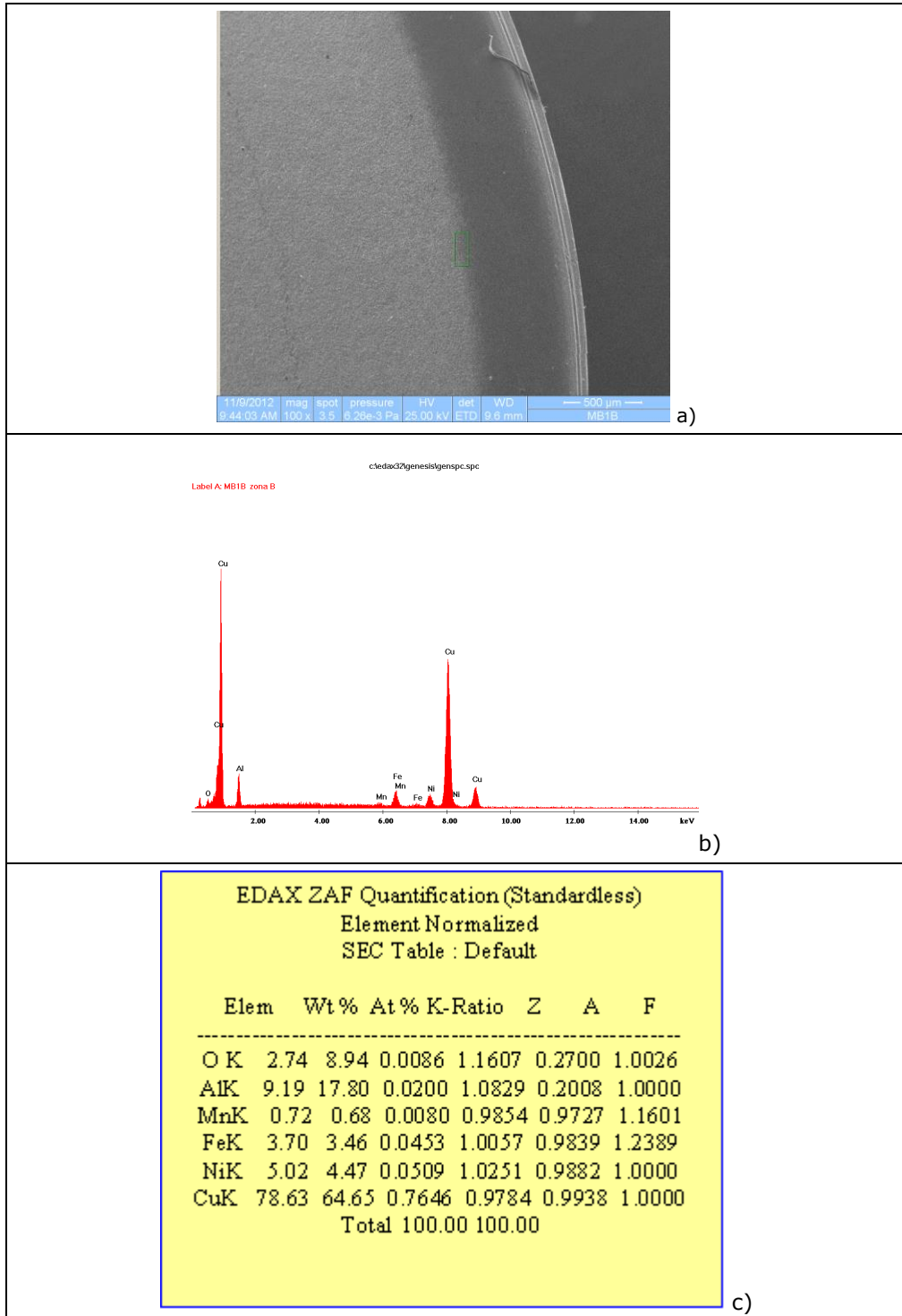


Fig. 5.12 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX-zona de trecere B

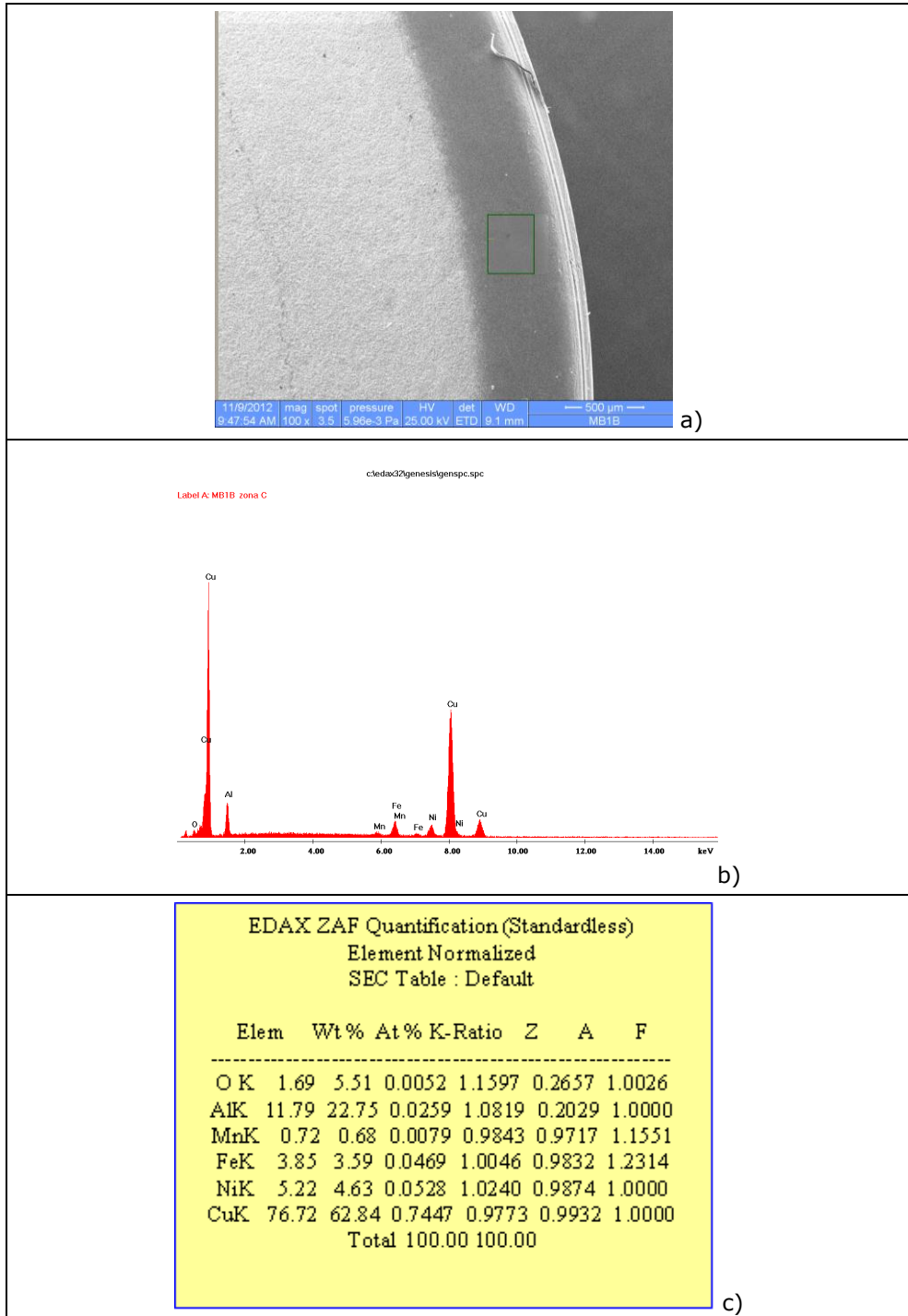


Fig. 5.13 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX-zona de margine C

5.3 Concluzii

Dimensiunea redusă a bandei de erori certifică corectitudinea derulării experimentului, pe toate cele trei probe.

Comportarea aproape identică, a celor trei probe, arată omogenitatea realizată prin tratamentul termic aplicat, în structura suprafeței atacate.

Valoarea redusă a abaterii standard, obținută din prelucrarea statistică, arată că prin tratamentul termic aplicat aliajului AMPCO 45 s-au obținut durități ce au determinat un comportament aproximativ uniform, pe tot parcursul atacului prin cavitație.

Forma curbelor de aproximare a punctelor experimentale și dispersia redusă, dintre punctele corespunzătoare celor trei probe, permite să afirm că utilizarea tratamentului termic, pentru bronzul AMPCO 45, este benefică și recomandată, dacă condițiile practice și de dimensiune ale elicei navale permit acest lucru.

Valorile reduse ale rugozității suprafeței cavitate, ale adâncimii de pătrundere a eroziunii și uniformitatea ridicată a procesului de degradare sunt o consecință a durificării prin dispersie a aliajului în urma tratamentului termic aplicat, și reprezintă un criteriu de evaluare a rezistenței la eroziunea cavitațională prin microduritate.

6. TRATAMENTUL DE SUPRAFAȚĂ CU FASCICUL LASER ȘI REZISTENȚA LA CAVITAȚIE

6.1. Tratamentul aplicat

Tratarea suprafeței probelor, supusă eroziunii prin cavitație vibratoare, s-a realizat cu fascicul laser, în trei regimuri, la care durata pulsului, frecvența de repetiție pulsuri și viteza de prelucrare au avut aceleași valori.

În cadrul experimentărilor a fost utilizată o instalație pentru sudare-tăiere cu laser Nd-YAG, marca Trumpf HL 124 P LCU, prezentată în figura 6.1, instalație existentă în laboratorul Institutului National de Cercetare Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale (ISIM), pusă la dispoziția activităților de cercetare.



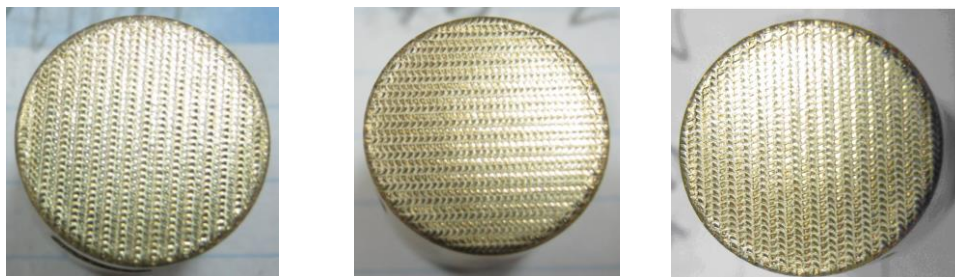
Fig.6.1 Instalația laser (Nd-YAG, Trumpf HL 124 P) folosită pentru tratarea probelor

Specimenele au fost poziționate pe dispozitive de așezare pe platoul instalației cu deplasare în coordonate x,y , fiind baleate de fasciculul laser programat la parametri de proces. Diferența dintre cele trei regimuri constă în puterea în impuls.

Parametri specifici razei laserului, folosită în tratamentul suprafețelor probelor, sunt:

- durata puls: 5ms;
- frecvența de repetiție pulsuri: 10Hz;
- viteza de prelucrare: 4.07mm/s;
- puterea în impuls: 160W, 180W, 220W.

După prelucrare/tratare cu fascicul laser, suprafețele tuturor probelor, indiferent de regim, au prezentat cruste de forme similare, vălurite și uniform distribuite, figura 6.2.



Puterea în impuls 160W

Puterea în impuls 180W

Puterea în impuls 220W

Fig.6.2 Forma suprafețelor după tratamentul cu laser
(înainte de începerea atacului - minutul 0)

În tabelele 6.1 - 6.3 sunt date microduritățile HV0,5, măsurate, în 7 puncte diferite, atât în stratul tratat, ce urma a fi supus eroziunii cavitației, cât și în materialul de bază.

Tabelul 6.1 Microduritate HV0,5- Putere impuls 160W

Zona măsurată	Adâncimea μm	HV0,5	HV0,5 medie
Zona pulverizată termic și retopită cu fascicul laser	57,5	280	314
	53	330	
	52	243	
	53	330	
	52,5	336	
	52	343	
	52,5	336	
Material de bază	61,5	245	246
	61	249	
	61	249	
	62,5	237	
	61,5	245	
	61	249	

Tabelul 6.2 Microduritate HV0,5- Putere impuls 180W

Zona măsurată	Adâncimea μm	HV0,5	HV0,5 medie
Zona pulverizată termic și retopită cu fascicul laser	52,5	336	347
	51,5	350	
	51,5	350	
	50	371	
	51,5	350	
	51	357	
	54	318	
Material de bază	61	249	245
	62	241	
	62,5	237	
	61	249	
	62	241	
	61	249	

Tabelul 6.3 Microduritate HV0,5- Putere impuls 220W

Zona măsurată	Adâncimea μm	HV0,5	HV0,5 medie
Zona pulverizată termic și retopită cu fascicul laser	52	343	352
	53	330	
	51	357	
	50	371	
	50,5	364	
	51,5	350	
	51,5	350	
Material de bază	60	258	249
	60,6	253	
	61,5	245	
	61	249	
	61,5	245	
	61	249	
	61,5	245	

Din tabelele 6.1, 6.2 și 6.3 rezultă creșteri medii importante de microduritate ale materialului suprafeței, ce urma a fi supusă cavitației, obținute în urma tratării cu fascicul laser, față de a materialului de bază (41,6% pentru puterea în impuls de 160 W, 41,6 % pentru puterea în impuls de 180 W, 41,3% pentru puterea în impuls de 220 W). Se constată că, prin mărirea puterii în impuls, a fascicului laser, creșterile de microduritate, în stratul suprafeței tratate, realizate față de materialul de bază, sunt foarte apropiate valoric.

Deoarece, microduritățile medii ale materialului de bază prezintă diferențe nesemnificative, de la 245 HV0,5 la 249 HV0,5, cu valori identice la aceleași adâncimi de măsurare (249 HV0,5 la 61 μm), așa cum se va vedea și din microfotografiile, de la paragraful 6.2.3, stratul tratat se diferențiază de materialului de bază, oferindu-i, astfel, posibilitatea evidențierii rezistenței la cavitație, pentru fiecare dintre cele trei regimuri. Pe măsură ce adâncimea de măsurare a microdurității crește, cum este firesc, microduritatea stratului tratat scade.

6.2 Rezultatele experimentul de cavitație

Pentru certificarea experimentului au fost testate trei probe.

Similar procedurii de la paragraful 4.1, pentru evidențierea acurateții cercetării și modului de erodare prin cavitație, s-au construit benzile de dispersie, fig. 6.3-6.5 și s-au determinat valorile maxime ale adâncimii medii cumulate de eroziune la finalizarea testului, ale curbelor de regresie și eroarea standard (s_{xy}), tabelul 6.4

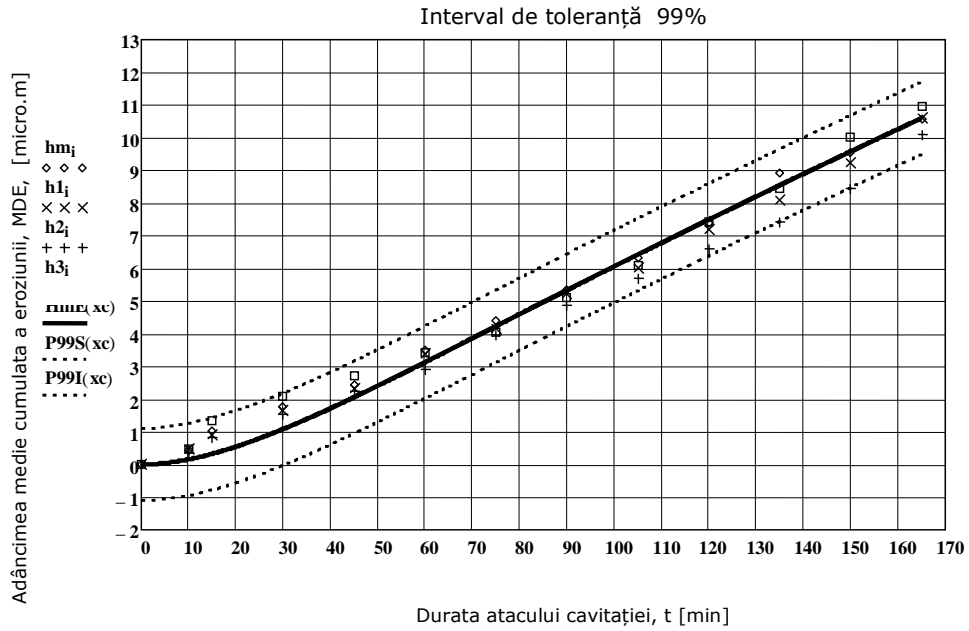


Fig. 6.3 Banda de dispersie -160W

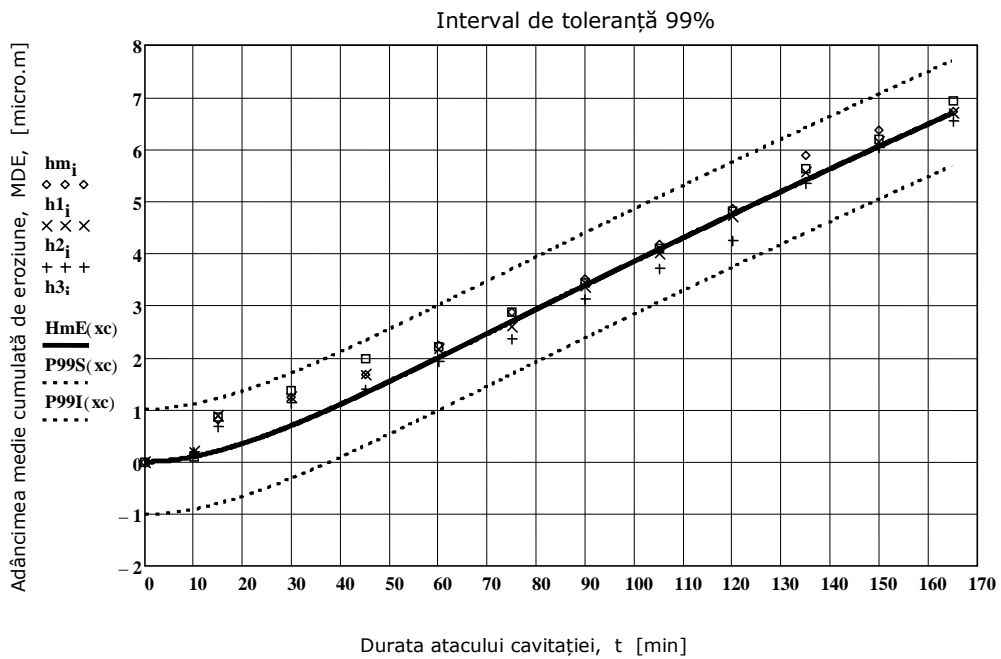


Fig. 6.4 Banda de dispersie-180W

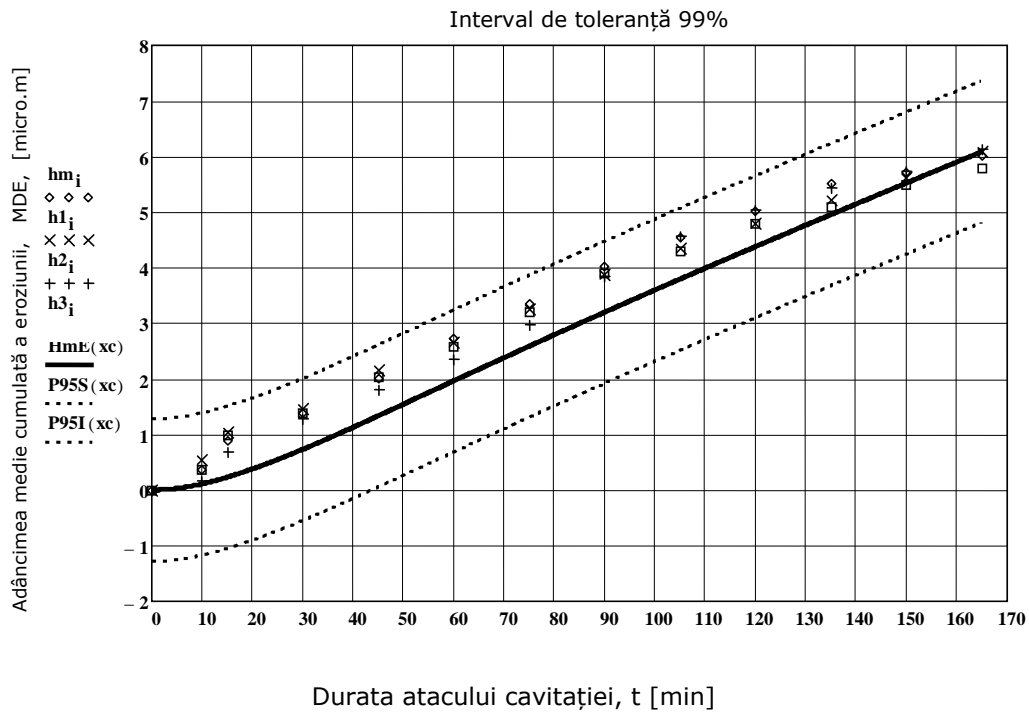


Fig. 6.5 Banda de dispersie – 220W

Banda de dispersie, foarte redusă, arată comportarea similară a celor trei probe testate, pentru oricare dintre cele trei regimuri. Diferențe sunt mici, din banda de erori, dar firești pentru un proces de complexitatea eroziunii prin cavitație [39], [43], [66], [73].

Tabel 6.4 Valori ale parametrilor statistici

Puterea în impuls a fasciculului laser	160W	180W	220W
Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii după 165 minute de atac [μm]	10,6	6,699	6,089
Valoarea maximă conform curbei de regresie [μm]	11,707	7,71	7,181
Valoarea minimă conform curbei de regresie [μm]	9,493	5,688	4,997
Eroarea standard de estimare (s_{xy}) [μm]	0,369	0,337	0,364

Valorile mici, ale abaterii standard, indiferent de puterea impulsului laser, sub 0,4, arată uniformitatea distrugerii produsă prin eroziune, în suprafețele atacate, respectiv rezistența omogenă din toată suprafața.

6.2.1 Curbe și parametri caracteristici eroziunii prin cavitație

În figurile 6.6, 6.7 și 6.8 sunt prezentate rezultatele experimentele pentru adâncimea medie cumulată de eroziune MDE și viteza de pătrundere a eroziunii MDER, precum și trei fotografii, realizate la timpi caracteristici, care arată evoluția distrugerii în suprafața probei.

Curbele de aproximare a punctelor experimentale au fost construite cu relațiile (4.7) și (4.8).

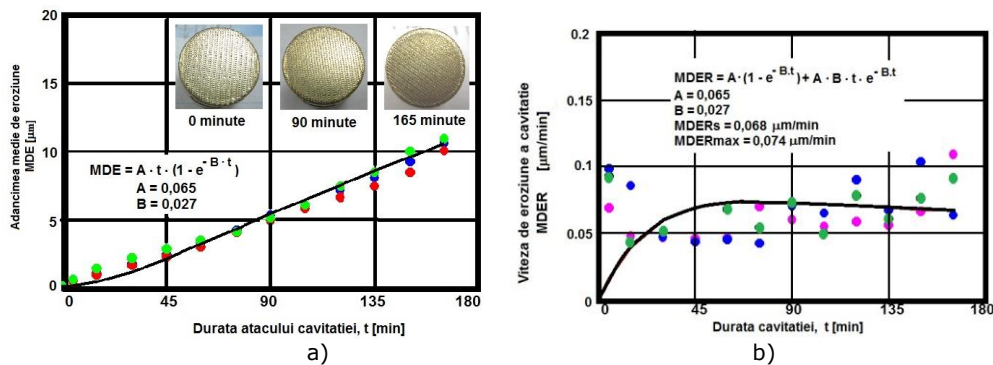


Fig.6.6 Curbe specifice evoluției comportamentului și rezistenței la cavitație (160 W):

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

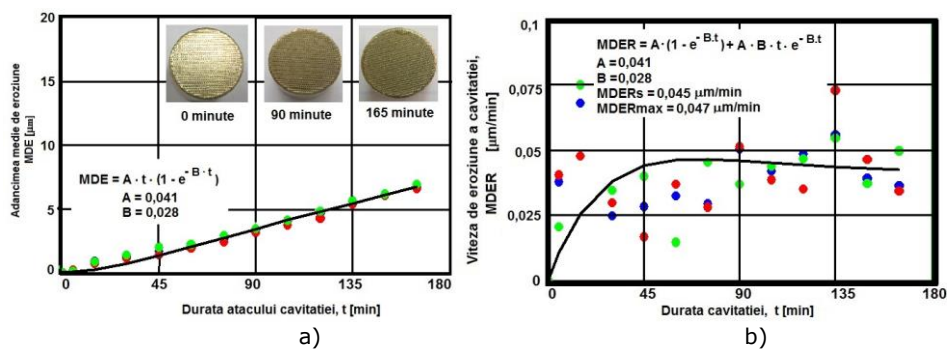


Fig.6.7 Curbe specifice evoluției comportamentului și rezistenței la cavitație (180 W):

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

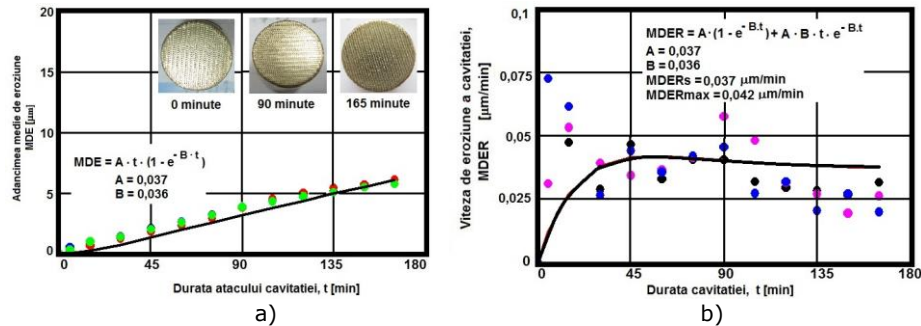


Fig.6.8 Curbe specifice evoluției comportamentului și rezistenței la cavitație (220 W):
 a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
 b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Aproximarea punctelor experimentale, de curbele construite analitic, este foarte bine realizată pentru probele supuse regimului cu o putere în fasciculului laser de 180W, figura 6.7. Pentru celelalte aproximații, prezentate în figurile 6.6 și 6.8, apar diferențe între intervalul de început și de final al atacului cavitației. Zona de final, este foarte bine vizibilă în diagramele vitezelor (figurile 6.6b și 6.8b), fiind bine mediată, față de prima parte a atacului.

Microfotografiile arată că, cu creșterea duratei de atac, eroziunea afectează tot mai mult crustele vâlurite ale stratului atacat.

6.2.2 Analiza rezultatelor experimentale

Diferențele dintre punctele experimentale, ale adâncimii medii de eroziune, figurile 6.6a, 6.7a și 6.8a arată efectul puterii în impuls. Se observă că, cu creșterea puterii, diferențele dintre punctele experimentale devin tot mai mici (figura 6.8a). Acest aspect este explicat de valoarea microdunității din suprafața erodată, tabelele 6.1, 6.2 și 6.3, care crește cu puterea în impuls, dar și de distribuția omogenă, în suprafață, a acesteia.

Diferențele de aproximare a punctelor experimentale, de către curbele analitice, se datorează și formelor vâlurite, ale suprafețelor, rezultate după tratamentul cu fascicul laser; golurile dintre vârfurile crustelor acționând ca dispersoare și atenuatoare ale presiunilor de impact, dintre microjeturi și undele de șoc.

Pentru regimul cu o putere în impuls de 160W aproximarea punctelor experimentale, de curba MDE(t), este bine realizată în intervalele 60-90 minute și 135-165 minute. Pentru același regim, curba MDER(t) realizează o bună mediere pe intervalul 120-165 minute. Valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza este $MDER_s = 0,068 \mu\text{m}/\text{min}$.

Pentru regimul cu o putere în impuls de 180W aproximarea punctelor experimentale de curba MDE(t) este bine realizată pe intervalul de 45-165 minute. Curba MDER(t) realizează o bună mediere pe intervalul 90-165 minute. Valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza este $MDER_s = 0,045 \mu\text{m}/\text{min}$.

Pentru regimul cu o putere în impuls de 220W aproximarea punctelor experimentale de curba MDE(t) este bine realizată în ultima parte a cavitației, 135-165 minute și 135-165 minute. Pentru același regim, curba MDER(t) realizează o bună mediere pe intervalul 30-120 minute. Valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza este $MDER_s = 0,037 \mu\text{m}/\text{min}$.

Pentru toate regimurile de tratament cu fascicul laser, curbele de aproximație $MDER(t)$, prezintă un maxim ($MDER_{max} = 0,074\mu\text{m}/\text{min}$, pentru regimul cu o putere în impuls de 160W, $MDER_{max} = 0,047\mu\text{m}/\text{min}$, pentru regimul cu o putere în impuls de 180W, $MDER_{max} = 0,042\mu\text{m}/\text{min}$, pentru regimul cu o putere în impuls de 220W), atins după 60 minute de atac, ca o dovadă a efectului crustelor; dincolo de praful ce nu a putut fi îndepărtat prin spălarea dinainte începerii testelor, greu eliminat în primele 30-45 minute de eroziune prin cavitație.

Diferențele foarte mici dintre valorile parametrului $MDER$, maxime și cele spre care tind să se stabilizeze, sunt caracteristice materialelor care și-au îmbunătățit comportamentele la eroziune prin cavitație, în urma unor tratamente de modificare a caracteristicilor mecanice ale suprafețelor atacate [15], [21], [24].

6.2.3 Investigarea fenomenologică a microstructurii erodate

Imaginile micrografice prezentate în figurile 6.9, 6.10, 6.11, 6.13, 6.14, 6.15, 6.17, 6.18 și 6.19 vin să confirme rezultatele favorabile obținute la testele de eroziune prin cavitație, reliefând creșterea epitaxială a grăunților în stratul de suprafață și formarea unei microstructuri martensitice fine care asigură o creștere semnificativă a rezistenței la eroziune cavitațională. Pe interfața strat – substrat nu se semnalează defecte de tipul porozităților și microfisurilor, iar zona influențată termic este puțin extinsă.

Analizele EDX, figurile 6.12, 6.16 și 6.20, în care sunt prezentate și imagini SEM ale structurii erodate, scot în evidență scăderea conținutului în aluminiu, probabil prin evaporare și expulzare de combinații chimice ale acestuia, precum și creșteri semnificative ale concentrațiilor în carbon și oxigen urmare a particularităților procesului laser (acoperirea suprafeței cu straturi absorbante).

Tabelul 6.5 Dimensiunile stratului retopit, după cavitație

PARAMETRUL	160W	180W	220W
Grosime strat retopit, după cavitație [mm]	0,2056	0,2069	0,2125

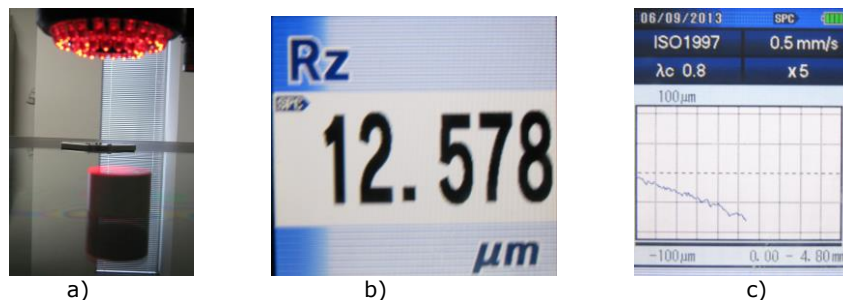


Fig.6.9 Măsurarea adâncimii cavernelor generate de cavitație în suprafața atacată cu aparat Mytutoyo 246 (fascicul laser 160W)

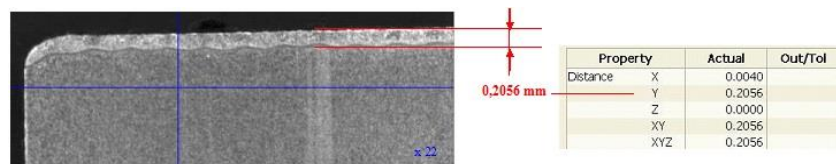


Fig.6.10 Structura scanată - Laser MICRO VU- Excel 664-UM (160W)

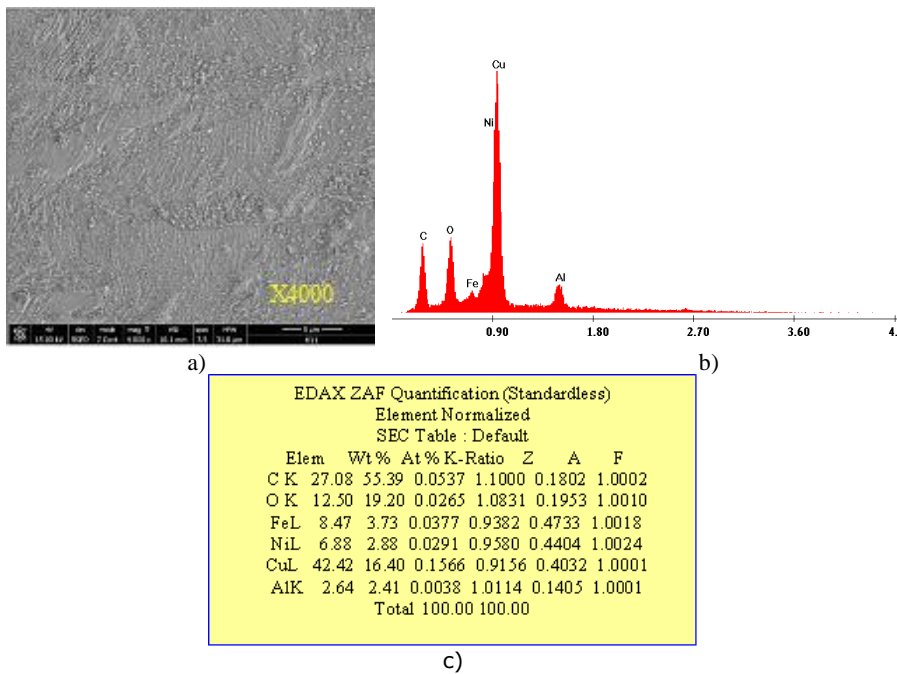
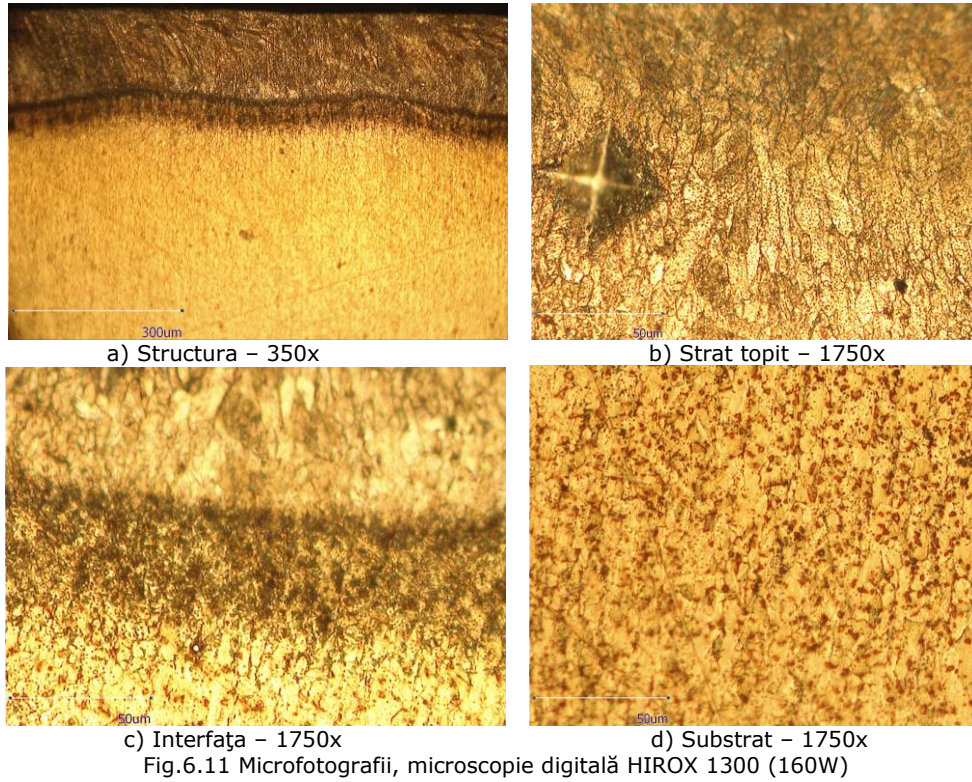


Fig.6.12 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX (160W)

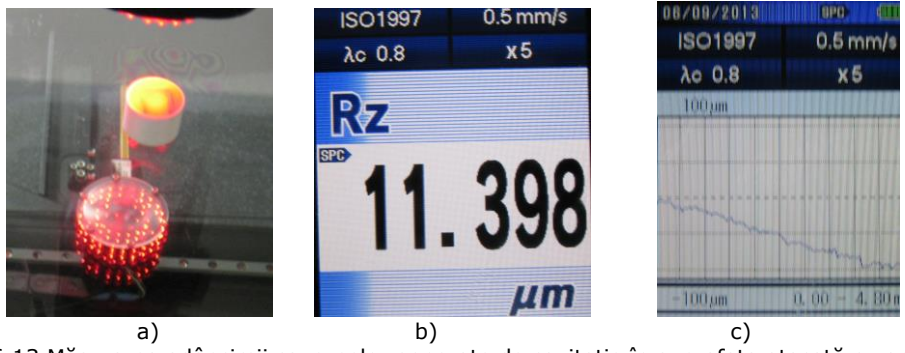


Fig.6.13 Măsurarea adâncimii cavernelor generate de cavitație în suprafața atacată cu aparat Mytutoyo 246 (fascicul laser 180W)

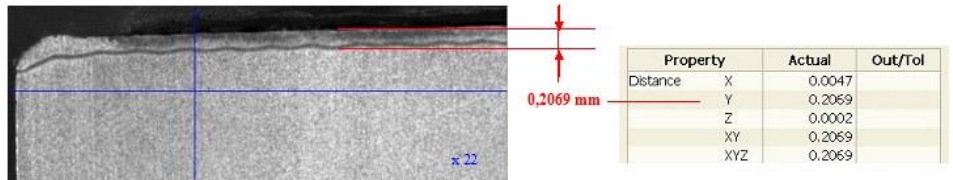


Fig.6.14 Structura scanată - Laser MICRO VU- Excel 664-UM (180W)

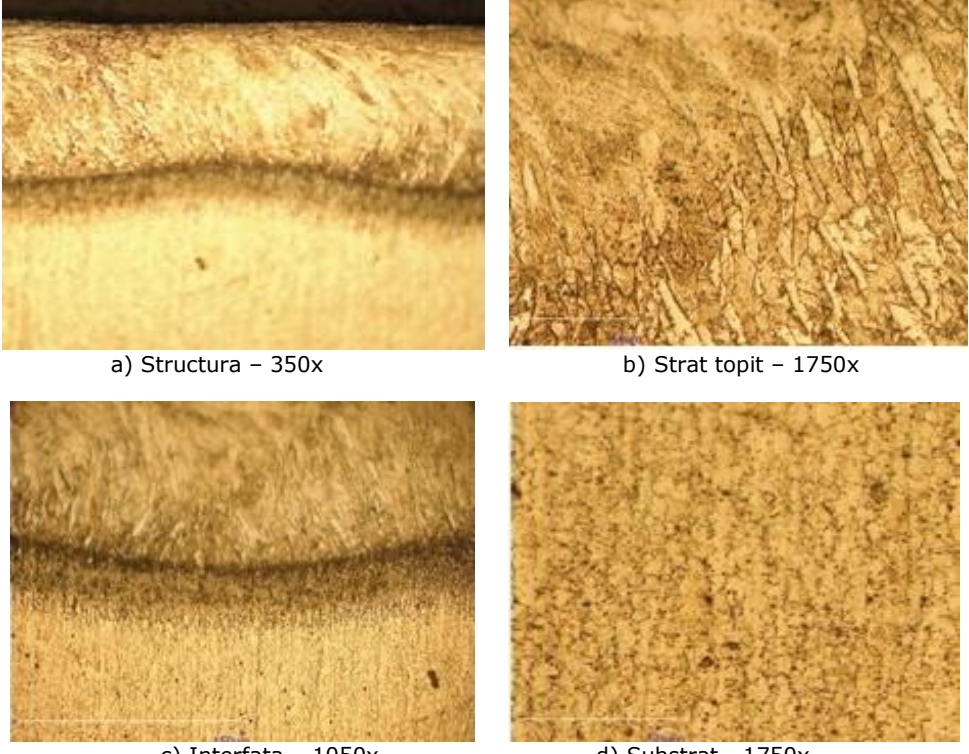


Fig.6.15 Microfotografii, microscopie digitală HIROX 1300 (180W)

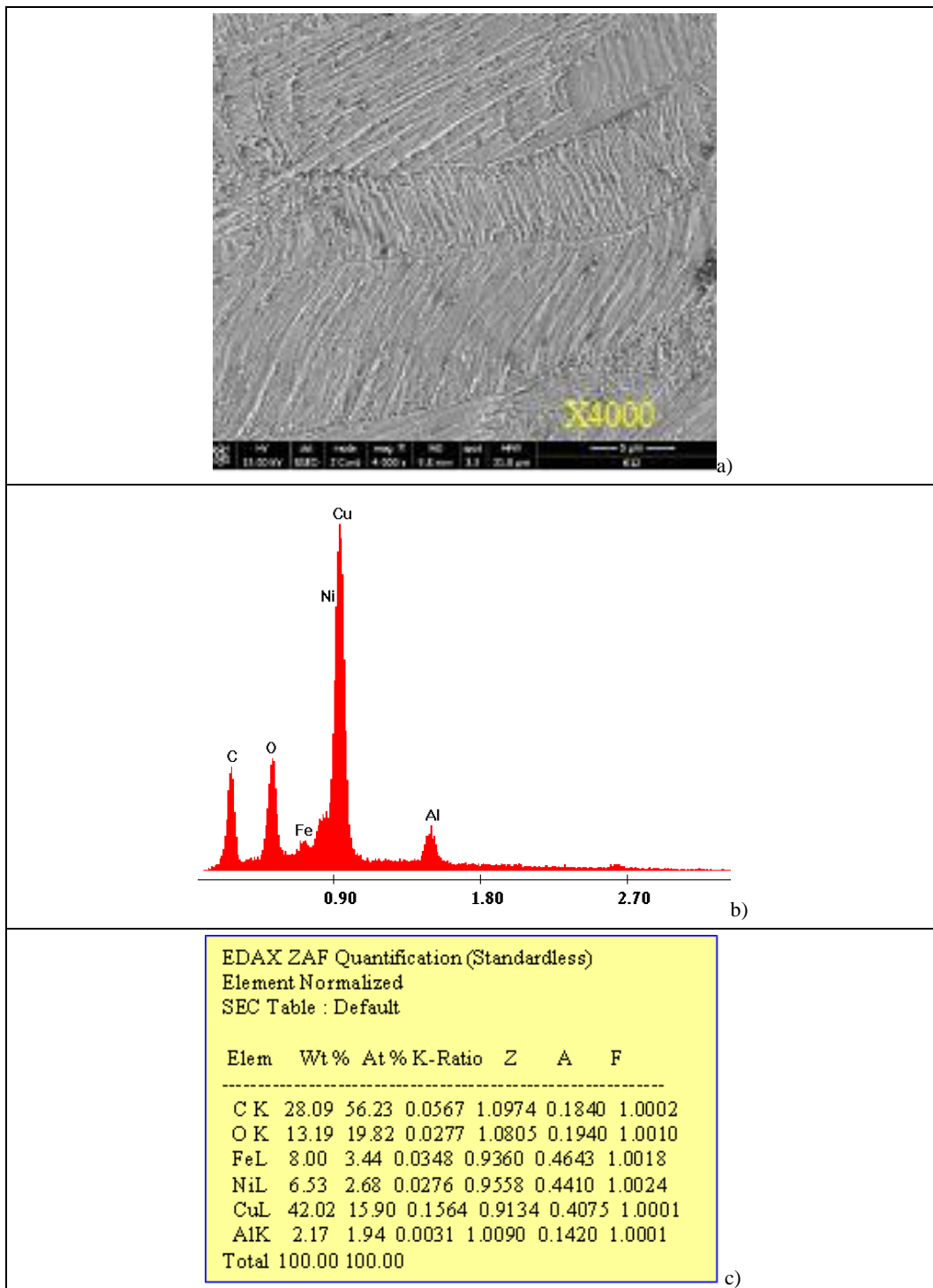


Fig.6.16 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX (180W)

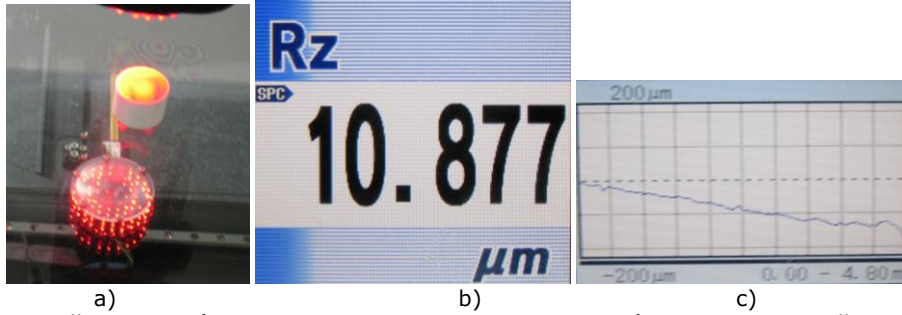


Fig.6.17 Măsurarea adâncimii cavernelor generate de cavitație în suprafața atacată cu aparat Mytutoyo 246 (fascicul laser 220W)

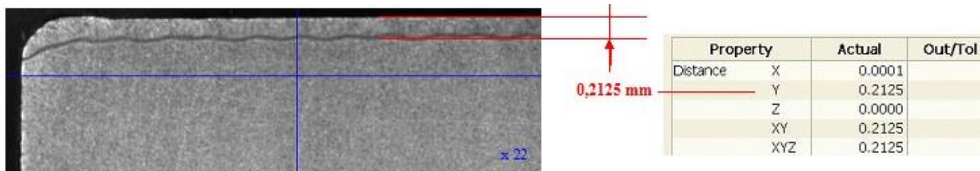
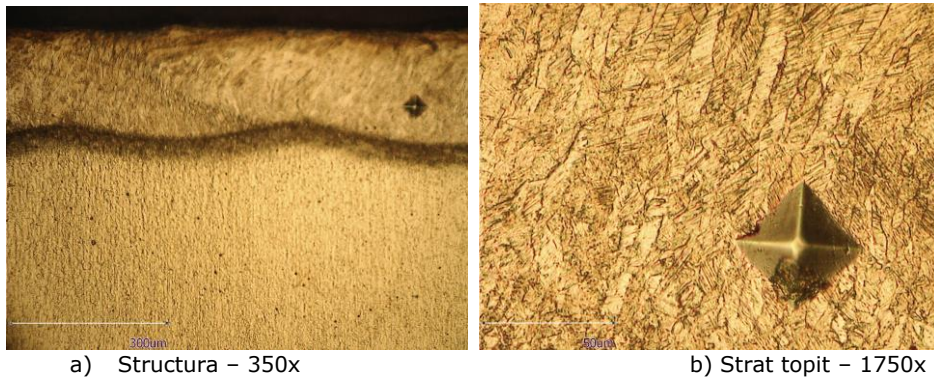
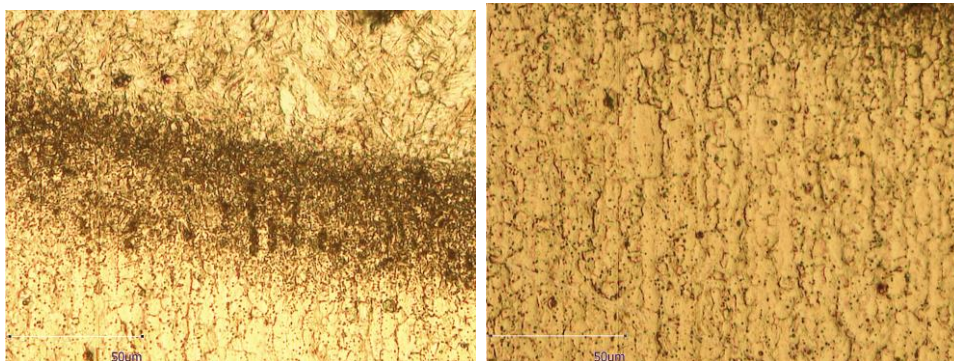


Fig.6.18 Structura scanată - Laser MICRO VU- Excel 664-UM (220W)



a) Structura - 350x

b) Strat topit - 1750x



c) Interfața - 1750x

d) Substrat - 1750x

Fig.6.19 Microfotografii, microscopie digitală HIROX 1300 (220W)

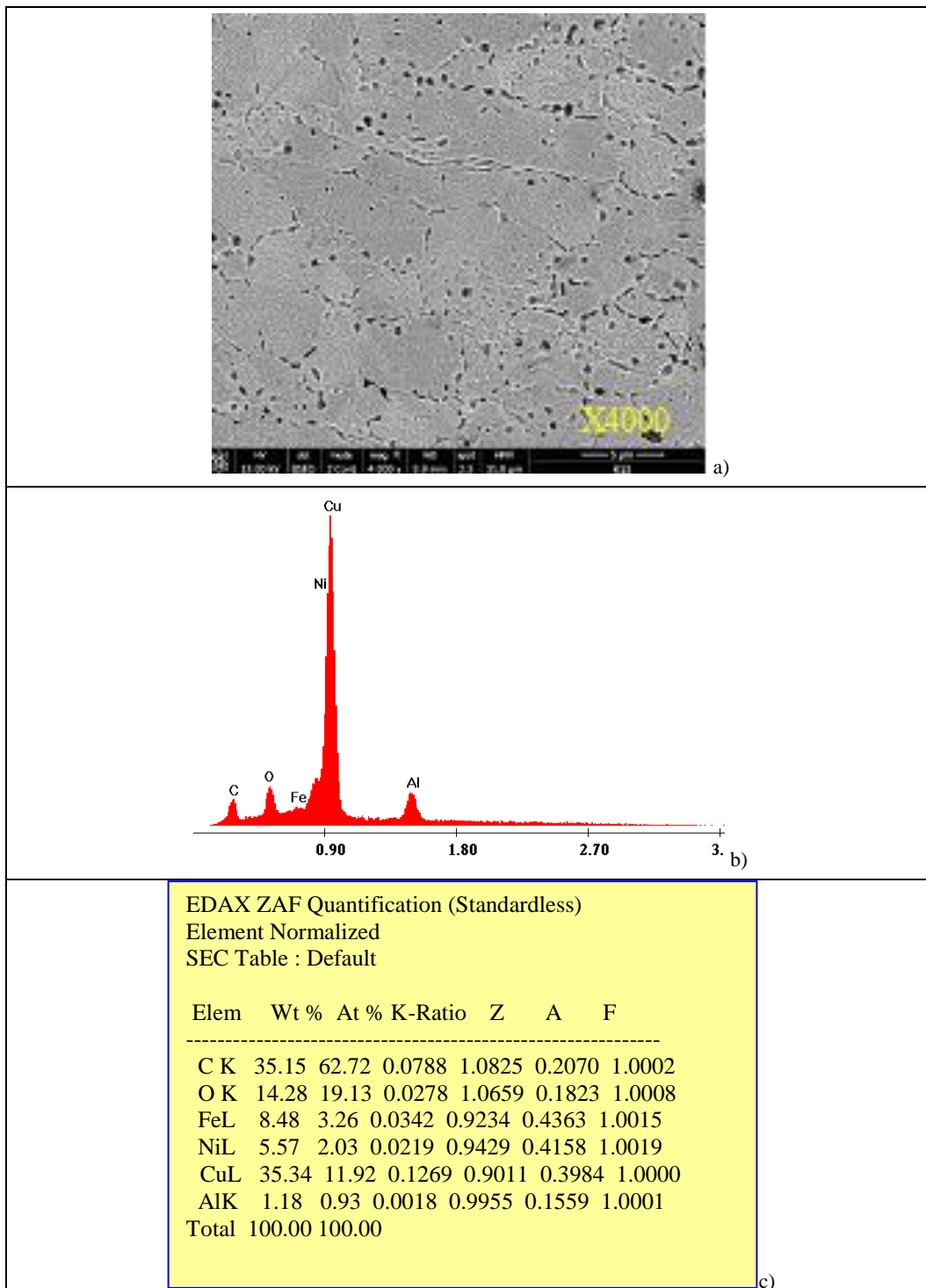


Fig.6.20 Microscopie SEM și spectroscopie EDAX (220W)

6.3 Concluzii

Dimensiunea redusă a benzilor de erori confirmă precizia experimentelor derulate pe toate cele trei probe.

Comportarea, aproape identică a celor trei probe, arată omogenitatea realizată prin tratamentul termic aplicat, în structura suprafeței atacate.

Abaterile punctelor experimentale, față de curbele de aproximație, arată efectul formei vălurite dată de crustele rezultate prin folosirea fasciculului laser.

Forma curbelor de aproximare a punctelor experimentale și dispersia redusă, dintre punctele corespunzătoare celor trei probe, evidențiată prin figurile 6.6a, 6.7a și 6.8a, certifică utilizarea fasciculului laser în tratarea bronzului AMPCO 45, în cazul în care acesta este folosit la fabricarea elicelor navale.

Valoarea redusă a abaterii standard, obținută din prelucrarea statistică, arată că prin folosirea fasciculului laser la tratarea suprafețelor probelor aliajului AMPCO 45, supuse eroziunii prin cavitație, se obțin microdurități ce asigură un comportament specific materialelor cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație. Valorile microdurităților cresc cu puterea în impuls a razei laser, pentru aceleași valori ale celorlalți parametri (durata puls, frecvența de repetiție pulsuri și viteza de prelucrare).

Se impune continuarea studiilor pentru stabilirea valorii maxime a puterii în impuls de la care efectul asupra rezistenței metalelor, la eroziunea prin cavitație, nu mai este semnificativ.

Investigațiile metalografice atestă formarea unei microstructuri martensitice fine care justifică creșterea semnificativă a rezistenței la eroziune cavitațională.

Pe interfața strat – substrat nu se semnalează defecte de tipul porozităților și microfisurilor, iar zona influențată termic este puțin extinsă.

Analizele EDX scot în evidență scăderea conținutului în aluminiu, probabil prin evaporare și expulzare de combinații chimice ale acestuia, precum și creșteri semnificative ale concentrațiilor în carbon și oxigen, urmare a particularităților procesului laser (acoperirea suprafeței cu straturi absorbante).

7. STRATURI DE ACOPERIRE PRIN PULVERIZARE ȘI RETOPIRE CU FASCICUL LASER

7.1. Tratamentul aplicat

Pulverizarea termică ca procedeu conex sudării cunoaște o aplicabilitate crescută, datorită numeroaselor avantaje pe care le prezintă. În momentul actual, există ramuri industriale în care utilizarea tehnologiilor de acoperire termică este indispensabilă, pentru obținerea caracteristicilor cerute de proiectanți. Printre domeniile cele mai avansate, în cazul utilizării componentelor din materiale acoperite se amintesc în special industria aero-spațială, industria de autovehicule și industria navală. Există două direcții majore de cercetare și inovare în ceea ce privește acoperirile termice: obținerea de noi materiale cu caracteristici din ce în ce mai performante și utilizarea unor tehnologii de acoperire tot mai sofisticate, în vederea îmbunătățirii caracteristicilor stratului depus. În paralel sunt depuse eforturi pentru creșterea productivității, scăderea costurilor, obținerea unor tehnologii mai robuste și ecologizarea procedurii.

Datorită temperaturilor diferite, atinse de metalul de bază și de microstratul depus, precum și a coeficienților de dilatare/contractie diferiți, în microstratul depus apar tensiuni care pot conduce la apariția fisurilor sau chiar la exfolierea microstratului. Printr-o tehnologie adecvată, retopire superficială cu fascicul laser, acestea pot fi mult diminuate sau chiar eliminate prin realizarea unor microstraturi intermediare (tampon) din alte materiale cu coeficienți de dilatare/contractie intermediari între materialul de bază și materialul depus final, rezistente la eroziunea cavitațională.

Programul experimental de pulverizare termică s-a realizat în laboratoarele Universității Gheorghe Asachi din Iași pe o instalație de pulverizare METCO SULZER, robotizată, cu incintă de insonorizare și protecție operatori, figura 7.1



Fig. 7.1 Instalație de pulverizare termică robotizată METCO SULZER

Parametrii procesului de pulverizare termică sunt:

- Gaz plasmagen, Ar+6%H – presiune 9 bari;
- Gaz transport, Ar, presiune 4 bari ;
- Aer comprimat, presiune 2 bari;

- Debit pulbere METCO 410 NS, 63 grame/minut;
- Tensiune curent 80-85 V;
- Intensitate curent 550 – 600 A

Pentru tratamentul de retopire superficială în cadrul experimentărilor a fost utilizată instalația laser Nd-YAG, marca Trumpf HL 124 P LCU - existentă în laboratorul Institutului National de Cercetare Dezvoltare în Sudura și Încercări de Materiale (ISIM), pusă la dispoziția activităților de cercetare.

Parametrii specifici razei laserului, folosită în retopirea stratului de pulbere depus pe suprafețele probelor, sunt:

- durata puls: 5ms,
- frecvența de repetiție pulsuri: 10Hz,
- viteza de prelucrare: 4.07mm/s
- puterea în impuls: 2400W și 2600W

În tabelul 7.1 sunt afișate caracteristicile pulberii utilizate.

Tabelul 7.1 Compoziția chimică și caracteristicile specifice [130]

PRODUS	Compoziție chimică [%]					
	Al ₂ O ₃	Ni20Al	TiO ₂	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Altele
METCO 410NS	Rest	29-31	< 3	< 1,5	< 0,7	< 1
PRODUS	Dimensiuni particule	Culoare	Morfologie		Metoda de elaborare	
			Ceramica	Metalica	Ceramica	Metalica
METCO 410NS	-90 +10μm	Brownisch Grey	Bloc unghiular	Sferoidal	Fused and Crushed	Chemically Clad Compozite

În figura 7.2 sunt prezentate suprafețele rezultate, după retopirea stratului pulverizat termic cu fascicul laser. Se observă că, indiferent de regim, suprafețele au aspecte reiate, de țesătură, cu straturi de cruste de dimensiuni reduse, comparativ cu formele velurate, rezultate din topirea stratului superficial, cu fascicul laser (vezi figura 6.2). Aceste forme fac dificilă curățirea, prin spălare și influențează mecanismul mecanic de distrugere prin eroziune, în special în primele minute ale atacului cavității [15], [42], [56], [83].



Puterea în impuls 2400 W



Puterea în impuls 2600 W

Fig.7.2 Forma suprafețelor retopite cu fascicul laser (înainte de începerea atacului – minutul 0)

În tabelele 7.2 și 7.3 sunt afișate microdurițiile HV0,5, măsurate, în 6 puncte diferite, atât în stratul pulverizat și retopit termic, înainte de începerea

testului de eroziune prin cavitație, cât și în materialul de bază, de sub stratul de pulbere.

Tabel 7.2 Microdurețea HV0,5 – Putere puls laser 2400W

ZONA măsurată	Adâncimea μm	HV0,5	HV0,5 medie
Stratul de pulbere retopit cu fascicul laser	47	420	416,6
	47	420	
	46,8	423	
	46	438	
	45,6	446	
	51,5	350	
Material de bază	59,5	262	250,5
	61,3	247	
	61,8	243	
	60,8	251	
	61	249	
	60,8	251	

Tabel 7.3 Microdurețea HV0,5 – Putere puls laser 2600 W

ZONA măsurată	Adâncimea μm	HV0,5	HV0,5 medie
Stratul de pulbere retopit cu fascicul laser	46,5	429	424,6
	47,3	414	
	45,8	442	
	45,6	446	
	47	420	
	48,3	397	
Material de bază	61,8	243	254,3
	61	249	
	60,3	255	
	60	258	
	59,8	259	
	59,5	262	

Creșterea de microdurate, în suprafața obținută în urma pulverizării termice urmată de retopire cu laser, față de microdurețea măsurată în materialului de bază, este de 66,3% pentru regimul cu 2400W și de 66,9% pentru regimul cu 2600W.

Asemănător cu situația întâlnită la capitolul 6, unde creșterea de microdurate, rezultată prin topirea stratului de bază, din suprafața probei, la trei puteri diferite, era nesemnificativă, în cazul de față, prin creșterea puterii impulsului razei laserului, și aici diferența de creștere este nesemnificativă. Totuși, creșterile obținute prin retopirea startului pulverizat termic este mare în raport cu cele înregistrate la topirea cu laser a materialului de bază (maxim 41,6%). Apreciez că efectul este microdurețea adusă suplimentar de pulberea depusă termic. Conform cercetărilor, realizate în Laboratorul de Cavitație din U.P Timișoara [15], dar și de alți cercetători, precum Hammitt [52], Garcia [46], Franc [43], Hattori [57], etc

creșterea durtății va avea efect pozitiv asupra comportării și rezistenței la eroziune prin cavitație, atâta timp cât ea nu va duce la fragilizarea stratului atacat, care va ceda foarte repede la impactul cu microjeturile și undele de șoc generate în timpul cavitației.

Distribuția uniformă și omogenă a microdurtății, în straturile de depus și de bază, este confirmată de măsurătorile realizate la aceleași adâncimi, în puncte diferite (vezi datele din tabelele 7.2 și 7.3)

7.2 Rezultatele experimentului de cavitație

În conformitate cu procedurile și cerințele de realizare a experimentelor, în laborator, precizate și în ASTM G-32/2010, au fost testate la cavitația vibratoare trei probe.

Pentru evidențierea acurateții cercetării și modului de erodare prin cavitație, similar procedurii de la paragraful 4.1, s-au construit benzile de dispersie, figurile 7.3 și 7.4 și s-au determinat valorile maxime ale adâncimii medii cumulate de eroziune, la finalizarea testului, ale curbelor de regresie și eroarea standard (s_{xy}), tabelul 7.4.

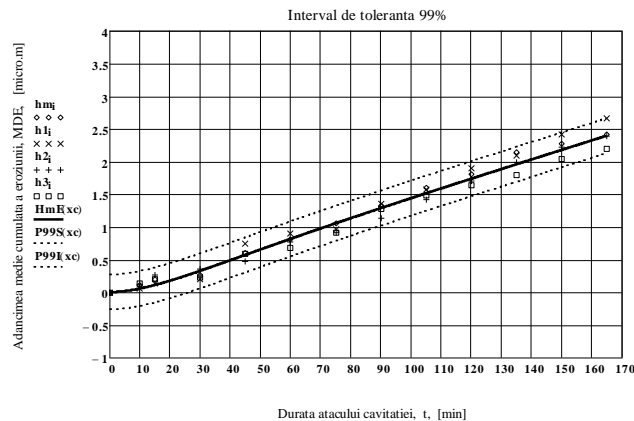


Fig. 7.3 Banda de dispersie-2400 W

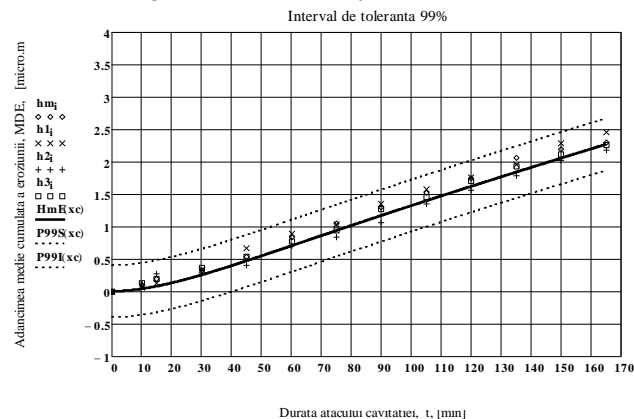


Fig. 7.4 Banda de dispersie -2600 W

Din figurile 7.3 și 7.4 se constată că benzile de dispersie, sunt foarte reduse, arătând comportarea similară a celor trei probe testate, pentru fiecare regim. Diferențe, aflate în banda de erori, sunt normale, având în vedere complexitate procesului hidrodinamic al cavitației și mecanic al eroziunii acestuia [16], [39], [66], [73], [47].

Tabel 7.4 Valori ale parametrilor statistici

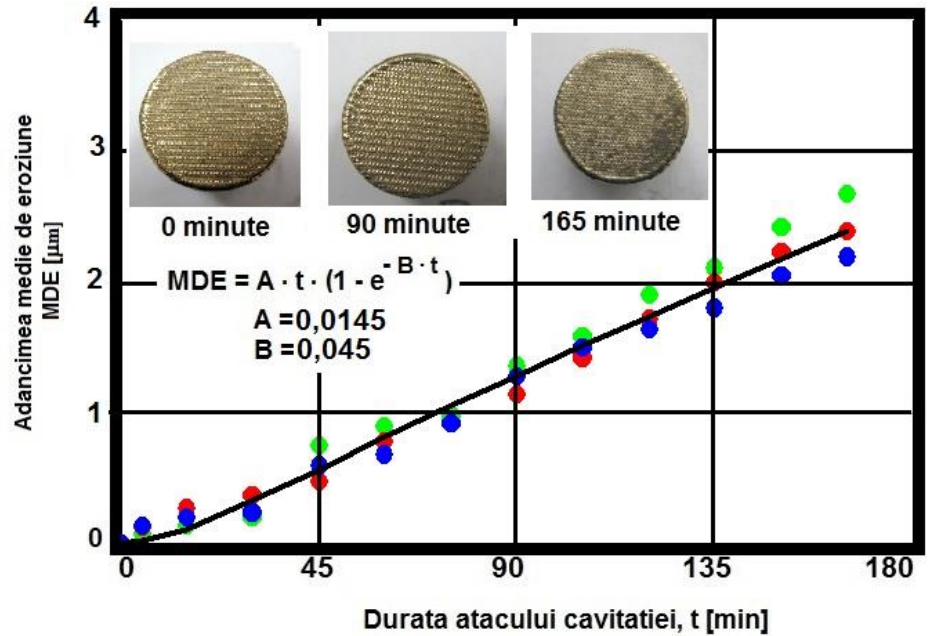
Puterea în impulsul fasciculului laser	2400W	2600W
Adâncimea medie de pătrundere a eroziunii după 165 minute de atac [μm]	2,391	2,262
Valoarea maximă conform curbei de regresie [μm]	2,659	2,663
Valoarea minimă conform curbei de regresie [μm]	2,123	1,861
Eroarea standard de estimare (s_{xy}) [μm]	0,089	0,134

Valoarea mică a abaterii standard, sub 0,2, arată, că și prin acest procedeu de tratare a suprafeței probelor, realizate din bronz AMPCO M45, eroziunea produsă de cavitația generată cu aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, este realizată în mod uniform.

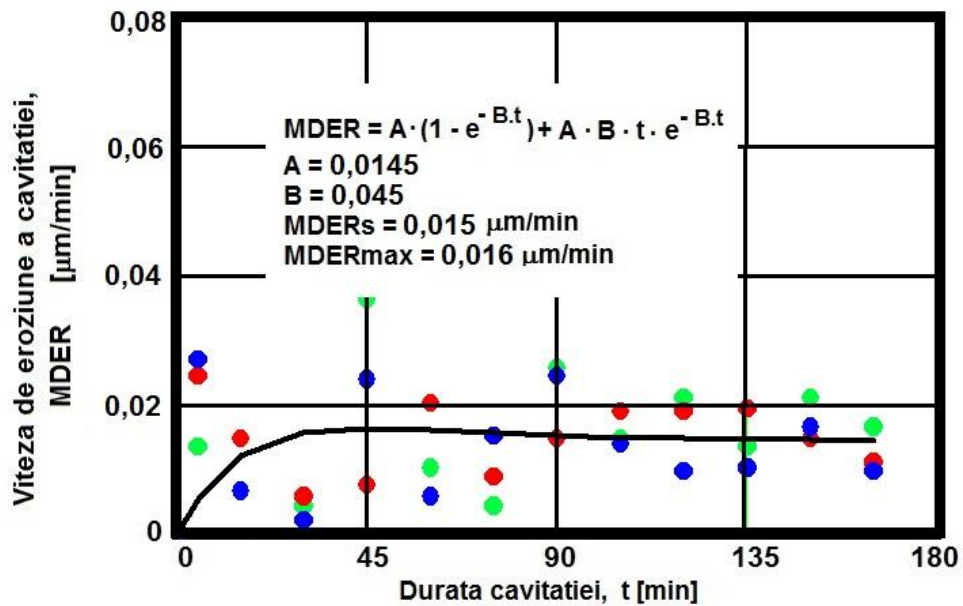
7.2.1 Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație

Pe baza pierderilor masice, folosind relațiile (4.5) și (4.6) s-au determinat valorile experimentale pentru adâncimile medii de pătrundere a eroziunii MDE și vitezei acesteia MDER. Cu relațiile (4.7) și (4.8), sau construit curbele analitice de aproximare/mediere a valorilor obținute prin experiment.

În figurile 7.5 și 7.6 sunt cuprinse valorile experimentale, pentru cele trei probe testate, pentru fiecare regim de putere în impuls (2400W și 2600W) și curbele construite analitic, care oferă imagini cu privire la comportamentul straturilor de pulberi la eroziunea cavitație.



a)



b)

Fig.7.5 Curbele specifice evoluției comportamentului și rezistenței la cavitație (2400W)

a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului

b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

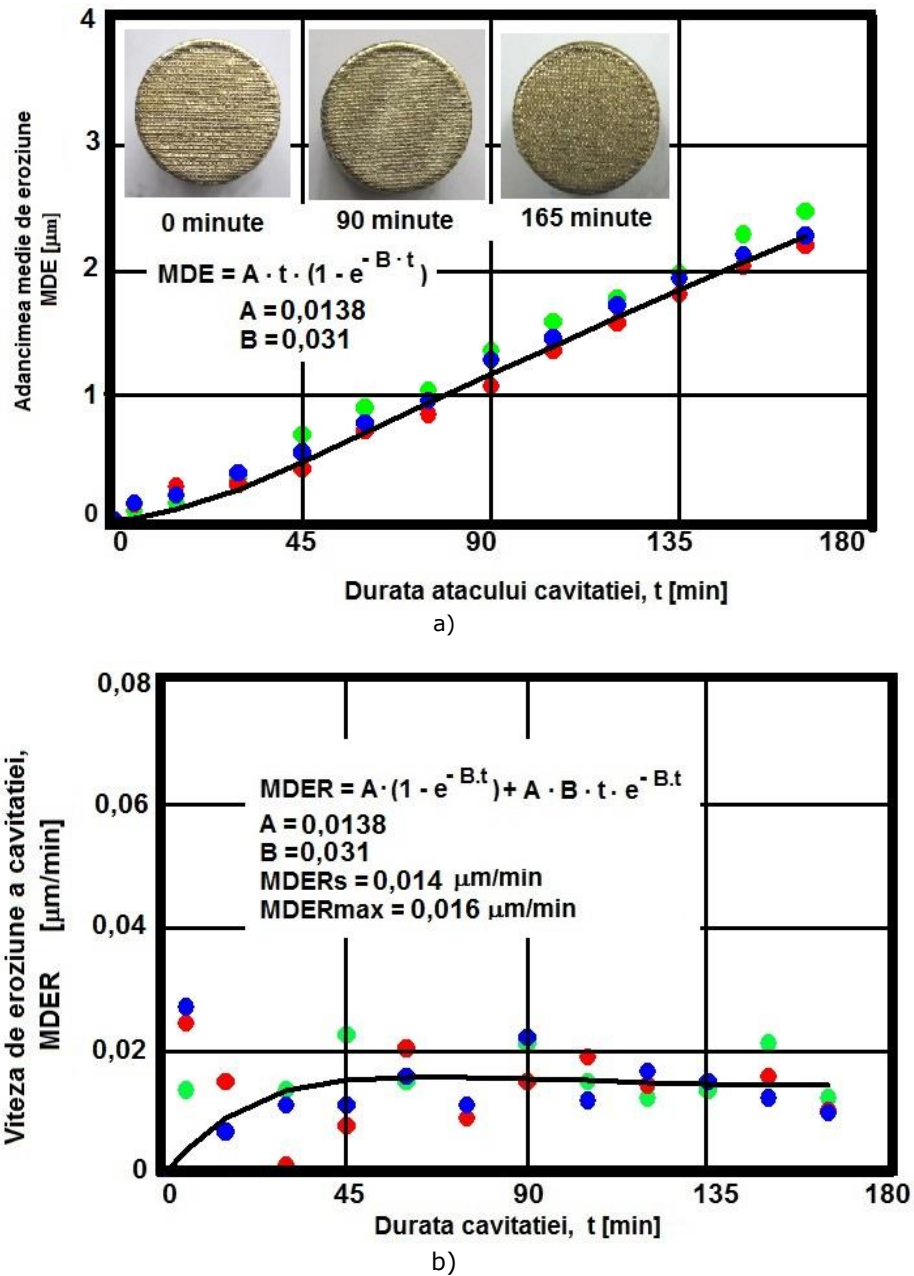


Fig.7.6 Curbele specifice evoluției comportamentului și rezistenței la cavitație (2600W)
 a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
 b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Aproximarea/medierea punctelor experimentale de curbele construite analitic, $MDE(t)$ și $MDER(t)$, comparativ cu cele obținute pentru experimentele realizate pe probele tratate cu fascicul laser (capitolul 6), este foarte bine realizată, indiferent de puterea în impuls.

Dispersia punctelor experimentale, față de curbele de aproximare, indiferent de regim, sugerează comportamente aproximativ similare, ale probelor. Acest aspect arată că prin cele două regimuri, distrugerea produsă de cavitația vibratoare, generată cu aparatul vibrator T2, este identică. Explicația este dată de valoarea ridicată a microdunității din suprafața erodată (tabelele 7.1 și 7.2) și de distribuția omogenă, în această suprafață.

Fotografiile realizate la cei trei timpi caracteristici, arată evoluția distrugerii cu durata atacului, dar nu atât de evident, datorită formei reiate a stratului depus și rezistenței conferite de microdunitate.

7.2.2 Analiza rezultatelor experimentale

Diferențele de valoare dintre punctele experimentale, ale celor trei probe, la diverși timpi de atac, sunt datorate modului în care energia absorbită a fost folosită la producerea deformațiilor, fisurilor, ruperilor și expulzărilor de material. Totodată, medierea foarte bună, realizată prin curbele analitice, arată că mecanismul de distrugere are constanță din punct de vedere al utilizării energiei absorbite de material la impactul cu microjeturile și undele de șoc.

Ca și la suprafețele prelucrate cu fascicul laser, capitolul 6, forma suprafeței, prin golurile dintre vârfurile crustelor, presiunea de impact, dintre microjeturi și undele de șoc, este atenuată de aerul rămas în goluri, dar modul de deformare și fisurare este modificat față de cel realizat pe suprafețele netede și lustruite la o rugozitate $Ra = 0,2\mu\text{m}$ [16], [39], [66], [73], [121].

Comportarea identică a probelor, supuse celor două regimuri de puteri, pe parcursul întregii durate de atac al cavitației, este dovedită de valorile de maxim ale vitezelor de pătrundere a eroziunii de același ordin de mărime ($MDER_{\text{max}} = 0,016\mu\text{m}/\text{min}$), iar diferențele dintre valorile spre care acestea tind să se stabilizeze să fie ne semnificative ($MDER_s = 0,015\mu\text{m}/\text{min}$, pentru regimul cu puterea în impulsul laser de 2400W și $MDER_s = 0,014\mu\text{m}/\text{min}$, pentru regimul cu puterea în impulsul laser de 2600 W). Această constatare solicită continuarea cercetărilor pentru regimuri cu puteri în impuls mai mici de 2400W, dar care să asigure omogenitatea și legătura structurală, a pulberilor depuse și retopite, cu materialul de bază, respectiv mai mari de 2600W. Cum, evoluția curbilor analitice, diferențele dintre valorile punctelor experimentale și dispersia acestora, au caracteristici comportărilor materialelor cu rezistență sporită la eroziunea prin cavitație [16], [39], [43], [63], [66], [73], [90], apreciez că este indicat să se studieze și comportarea straturilor realizate din alte tipuri de pulberi, compatibile cu bronzul CuAlNiFeMn-AMPCO 45.

Datorită formei suprafeței, rezultate în urma retopirii cu fascicul laser, pierderile din primele minute, ca la toate probele, ale căror suprafețe nu au fost lustruite, sunt semnificative și nu caracterizează mecanismul propriu-zis de distrugere.

Diferențele ne semnificative dintre valorile parametrului MDER, maxime și cele spre care tind să se stabilizeze, sunt caracteristice materialelor cu excelentă rezistență la eroziunea prin cavitație, chiar celor superrezistente, ceea ce arată că acest procedeu este unul foarte util pentru tratarea suprafețelor palelor de elice navale.

7.2.3 Investigarea fenomenologică a microstructurii erodate

Analizele efectuate la microscopul optic în lumină reflectată și la microscopul electronic cu baleiaj (figurile 7.7 ÷ 7.10, respectiv 7.15 ÷ 7.19) asupra suprafețelor

acoperite prin pulverizare cu un amestec de pulberi oxidice și apoi retopite cu fascicul laser vin să confirme comportarea excelentă la eroziunea prin cavitație, evidențiind formarea unui strat depus, lipsit de fisuri și de alte defecte de continuitate, cu o bună legătură cu substratul de aliaj neferos. În plus, fenomenul poate fi explicat prin tipul de rețea cristalină a matricei de bază, care posedă un număr mare de sisteme de alunecare și deci sunt mai puțin fragile. Cercetarea la microscopul electronic cu baleiaj a suprafețelor deteriorate ca efect al procesului de cavitație reliefează o degradare uniformă a materialului, craterele formate având dimensiuni extrem de mici.

Imaginile microstructurale ale secțiunilor longitudinale prin probele testate la eroziune prin cavitație atestă faptul că inițierea fisurilor are loc pe interfața dintre particulele de pulberi rămase în stare solidă și matrice, iar îndepărtarea de material cuprinde în principal fazele dure și fragile de compuși chimici.

Așa cum era de așteptat, compoziția chimică a stratului de suprafață se modifică sensibil (figurile 7.15 și 7.16) în sensul că apar creșteri ale concentrațiilor în Al, Fe și O₂ datorate pe de o parte particularităților procesului de prelucrare cu fascicul laser, iar pe de altă parte, formării unui nou aliaj la interacțiunea dintre stratul depus și metalul de bază – proces tehnologic.

În consecință, se face aprecierea că tehnologia propusă conduce la obținerea unor straturi cu compactitate mare, rezistență ridicată la deformare plastică și o microstructură de material compozit, care justifică excelentele caracteristici de rezistență la eroziune prin cavitație.

În figurile 7.11 ÷ 7.14 se prezintă detalii ale formei reiate, obținute prin microscopie digitală, rezultate prin retopirea cu fascicul laser a stratului pulverizat termic, care explică comportarea și rezistența la eroziune prin cavitație, analizată la paragraful 7.2.2.

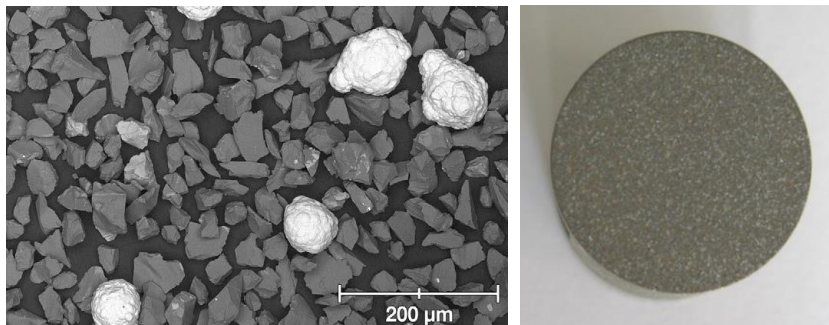


Fig. 7.7 Imagine SEM (Photomicrograph of Metco 410NS) și imaginea suprafeței probei pulverizate, înainte de atacul prin cavitație

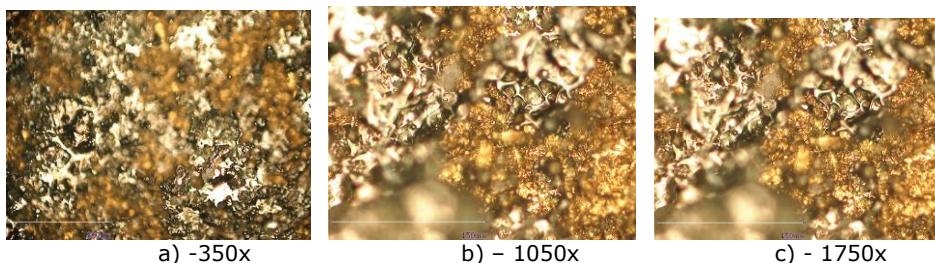
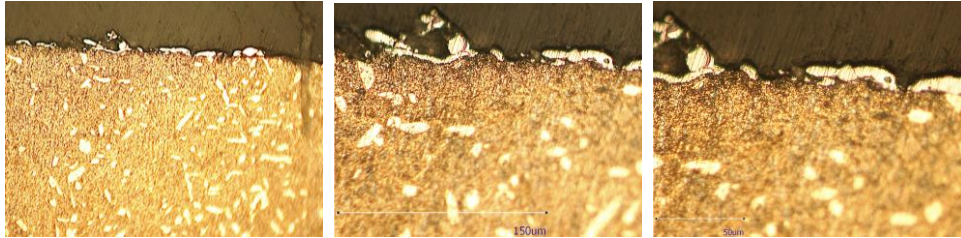


Fig.7. 8 Microscopie digitală – imagini din suprafața pulverizată termic, înainte de atacul prin cavitație



a) -350x

b) - 1050x

c) - 1750x

Fig.7.9 Microscopie digitală – imagini ale secțiunii realizate perpendicular pe suprafața probei, cu stratul pulverizat termic, înainte de atacul prin cavitație

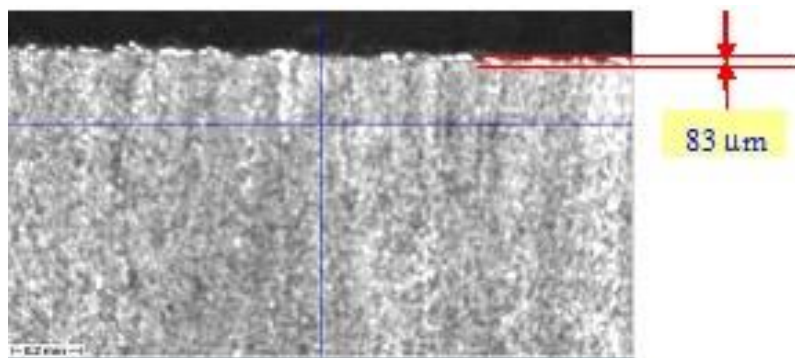


Fig.7.10 Structura scanată - Laser MICRO VU- Excel 664-UM (88x)

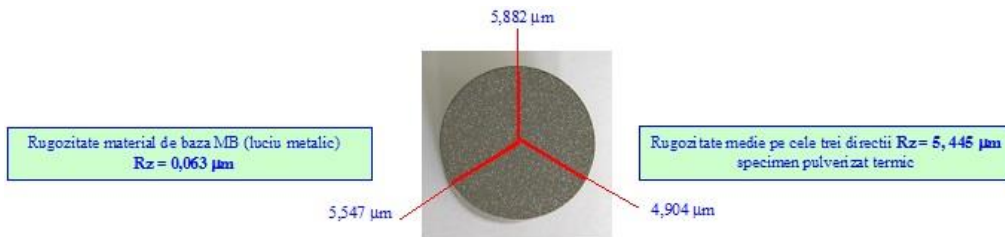
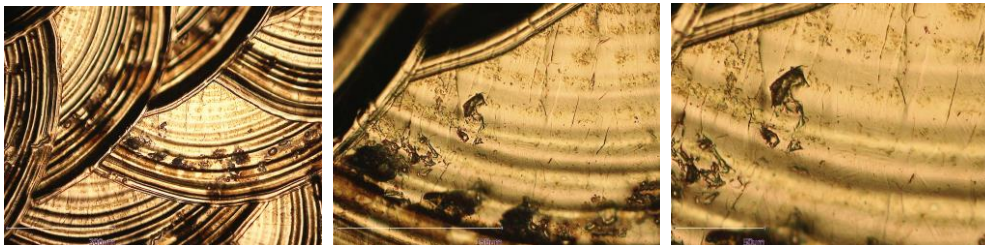


Fig. 7.11 Direcțiile de măsurare a rugozității pe suprafața erodată prin cavitație (după 165 minute) – aparat MITUTOYO



a) -350x

b) - 1050

c) - 1750x

Fig.7.12 Microscopie digitală, imagini ale suprafeței pulverizată termic și retopită cu fasciculul laser, cu o putere în impuls de 2400W (înainte de atacul prin cavitație)



a) -350x

b) - 1050x

c) - 1750x

Fig. 7.13 Microscopie digitală, imagini ale suprafeței pulverizată termic și retopită cu fascicul laser, cu o putere în impuls de 2600W (înainte de atacul prin cavitației)



a)2400W



b) 2600W

Fig. 7.14 Imagini macroscopice ale suprafețelor după pulverizare termic și retopire cu fascicul laser

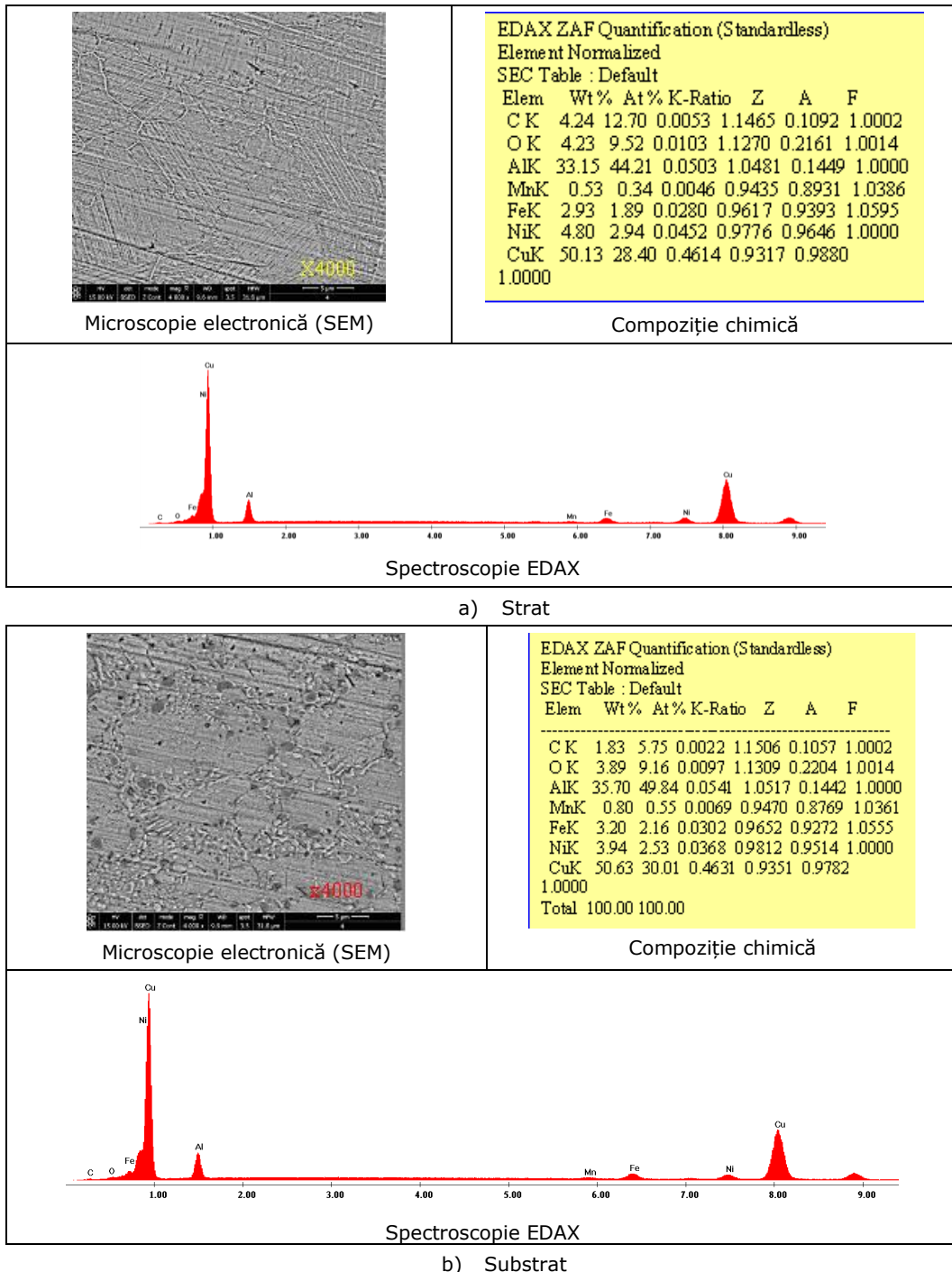
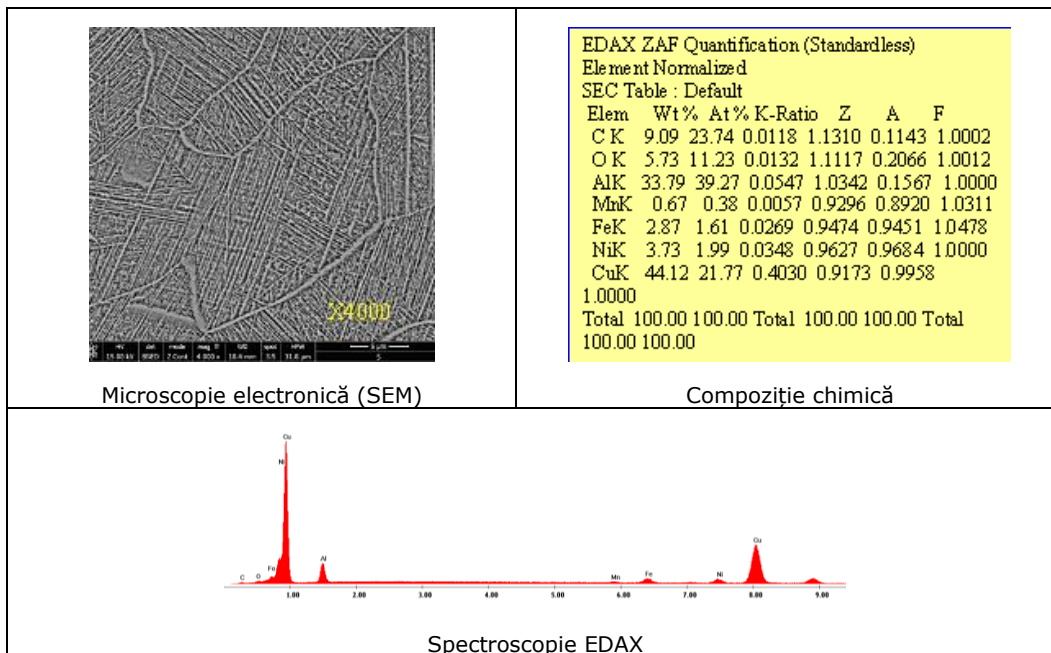
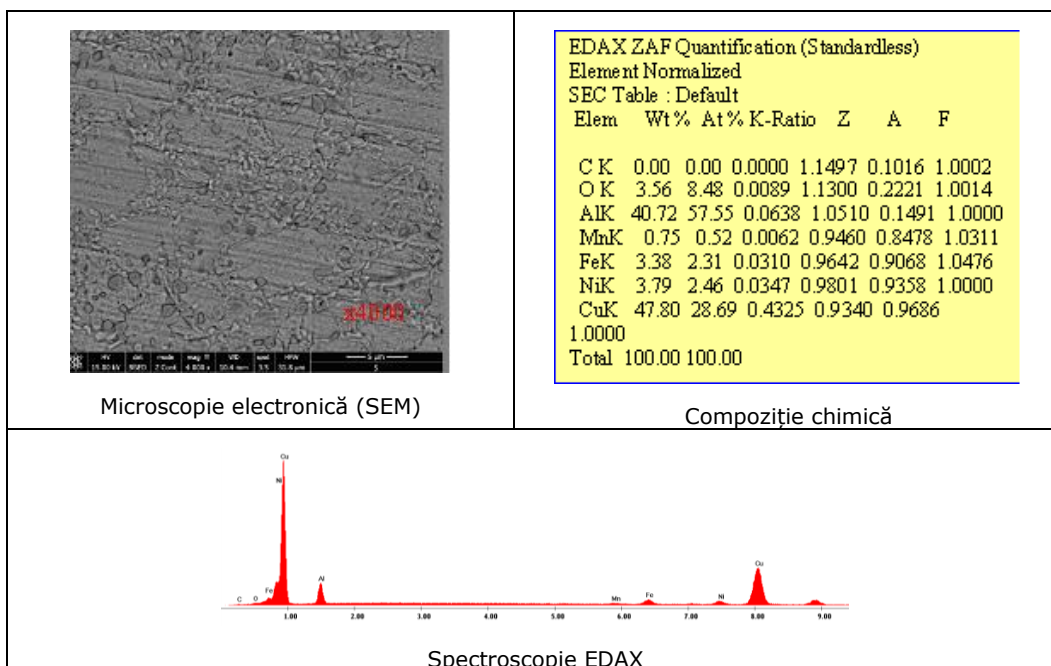


Fig. 7.15 Puterea în impulsul fascicului laser 2400W (înainte de începerea cavitației)



a) Strat



a) Substrat

Fig. 7.16 Puterea în impulsul fasciculului laser 2600W (înainte de începerea cavitației)

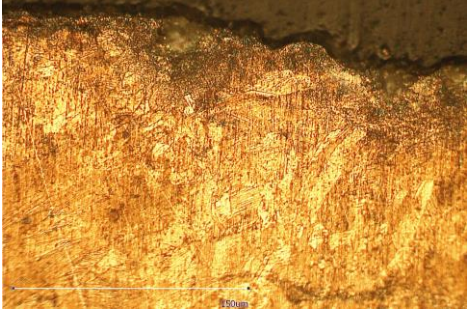

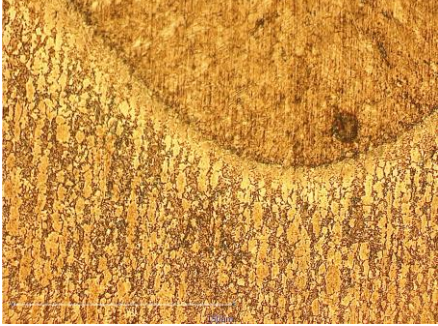

structura	 <p>350x</p>
strat	 <p>350x</p>
Interfata	 <p>1050x</p>
substrat	 <p>1750x</p>

Fig. 7.17 Micrografii, după 165 minute de atac al cavitației - 2400W


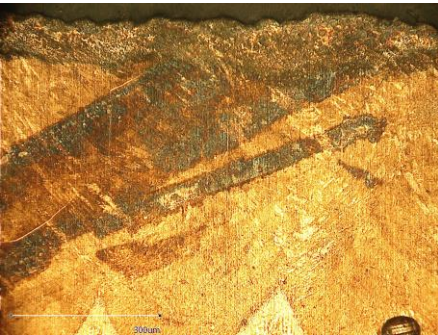
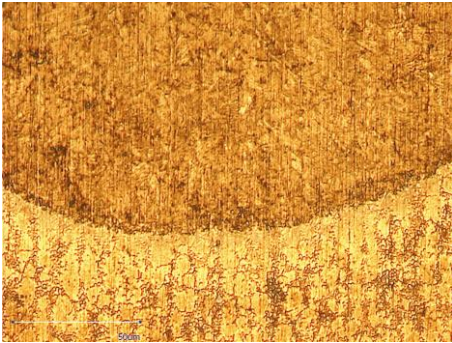

structura	 <p>350x</p>
strat	 <p>350x</p>
Interfata	 <p>1750x</p>
substrat	 <p>1750x</p>

Fig. 7.18 Micrografii, după 165 minute de atac al cavitației - 2600W

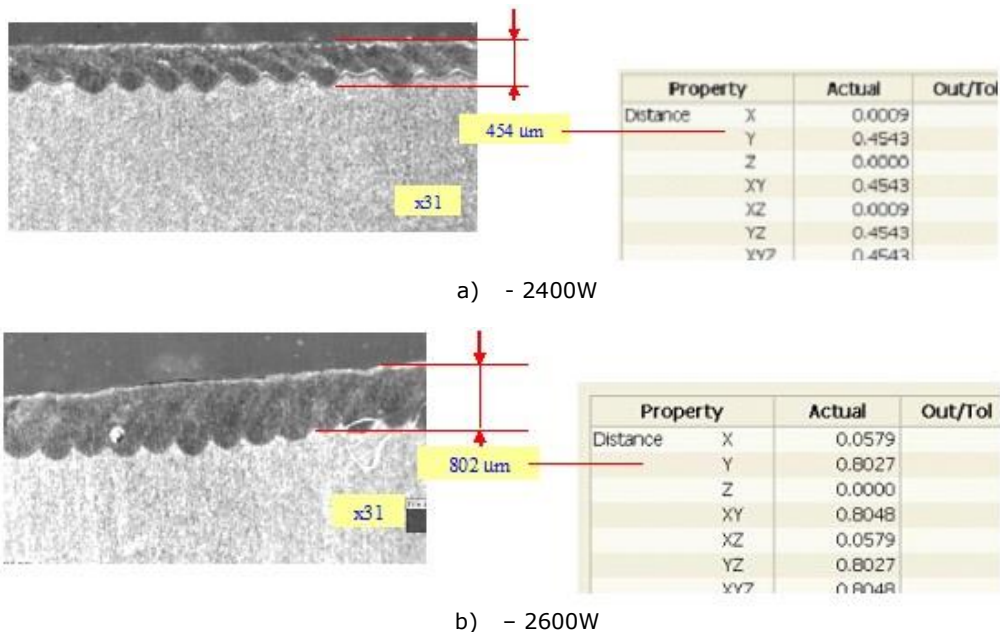


Fig. 7.19 Structura scanată - Laser MICRO VU- Excel 664-UM
(după 165 minute de atac al cavitației)

7.3 Concluzii

Datorită dimensiunii reduse a benzilor de erori și valorilor mici ale parametrilor statistici (eroarea standard de estimare) certifică corectitudinea derulării experimentelor, pe toate cele trei probe, pentru fiecare din cele două regimuri de putere în impuls.

Comportările, aproape identice, ale celor trei probe, arată omogenitatea proprietăților rezultate în stratul de pulberi, după retopirea cu fascicul laser, pe toată suprafața expusă eroziunii prin cavitație, indiferent de puterea în impuls.

Valoarea redusă a abaterii standard, obținută din prelucrarea statistică, arată că prin retopirea cu laser a pulberilor pulverizate termic, pe suprafețele expuse cavitației, generează straturi cu microdurități ce conferă un comportament aproximativ uniform, cu foarte mare rezistență, pe tot parcursul atacului prin cavitație.

Forma curbilor de aproximare a punctelor experimentale și dispersia redusă, dintre punctele corespunzătoare celor trei probe, duc la concluzia că pulverizarea termică, urmată de retopirea cu fascicul laser, cu puteri în impuls de 2400W sau 2600W, pe aliaj de tip CuAlNiFeMn-AMPCO 45, este benefică și recomandată în tratarea paletelor de elice navale dacă condițiile practice și de dimensiune ale elicelor permit acest lucru.

Microstructura fină și omogenă a stratului de material compozit format la suprafață justifică rezistența mare la deformare plastică și implicit deteriorarea uniformă și lentă a acestuia în timpul atacului prin cavitație.

8. COMPARAȚII ALE REZULTATELOR CERCETĂRII

Pentru evidențierea diferențelor de comportare pe durata atacului prin cavitație, precum și a celor de rezistență la solicitările mecanice, specifice oboselii locale generate de impactul suprafeței cu undele de șoc și microjeturile rezultate din implozia bulelor cavitaționale, în subcapitolele de mai jos sunt realizate analize și discuții pe baza comparării curbelor caracteristice și a valorilor parametrilor specifici de referință, conform normelor ASTM G32-2010 [121] și cutumelor diferitelor laboratoare de cercetare, exprimate prin rapoartele și lucrările făcute publice [55], [63], [76], [111], [114]. Comparația este realizată, pentru fiecare tip stare, prin raportare la materialele de referință (oțelul inoxidabil OH12NDL - cu foarte bună rezistență la eroziune prin cavitație și etalon pentru paletele și rotoarele turbinelor hidraulice din România și respectiv bronzul naval CuNiAl III RNR - cu excelentă rezistență la eroziune prin cavitație și etalon, în România, pentru elicele navale).

8.1 Influența parametrilor fasciculului laser asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

a) Topirea stratului superficial cu fascicul laser

Evidențierea influenței parametrilor fasciculului laser, în speță a puterii în impulsul acestuia, asupra comportării și rezistenței la eroziune prin cavitație generată de aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2, se va face prin compararea curbelor specifice, obținute pentru cele trei, respectiv două regimuri, și prin compararea rezultatelor cu ale materialelor etalon, din cadrul Laboratorului de Cavitație.

În figura 8.1 sunt comparate curbele MDE(t) și MDER(t) ce caracterizează comportarea și rezistența probelor din aliaj AMPCO 45, ale căror suprafețe atacate de cavitația vibratoare, au fost prelucrate cu trei regimuri de fascicul laser, diferențiate prin puterea în impuls.

Comparația evidențiază efectul puterii în impuls asupra caracteristicilor de eroziune prin cavitație a bronzului.

Se observă că probele prelucrate cu fascicul cu puteri în impuls de 180W și 220W se comportă și rezistă aproximativ la fel. Având în vedere, complexitatea fenomenului cavitațional, sub aspect hidrodinamic și mecanic [2], [42], [43], [79], [117], [119], putem spune că cele două probe au chiar aceleași comportamente și rezistențe.

Din punct de vedere al comportamentului, evoluțiile curbelor MDER(t), figura 8.1b, sunt similare, cu maxime și tendință de stabilizare la valori sub aceste maxime.

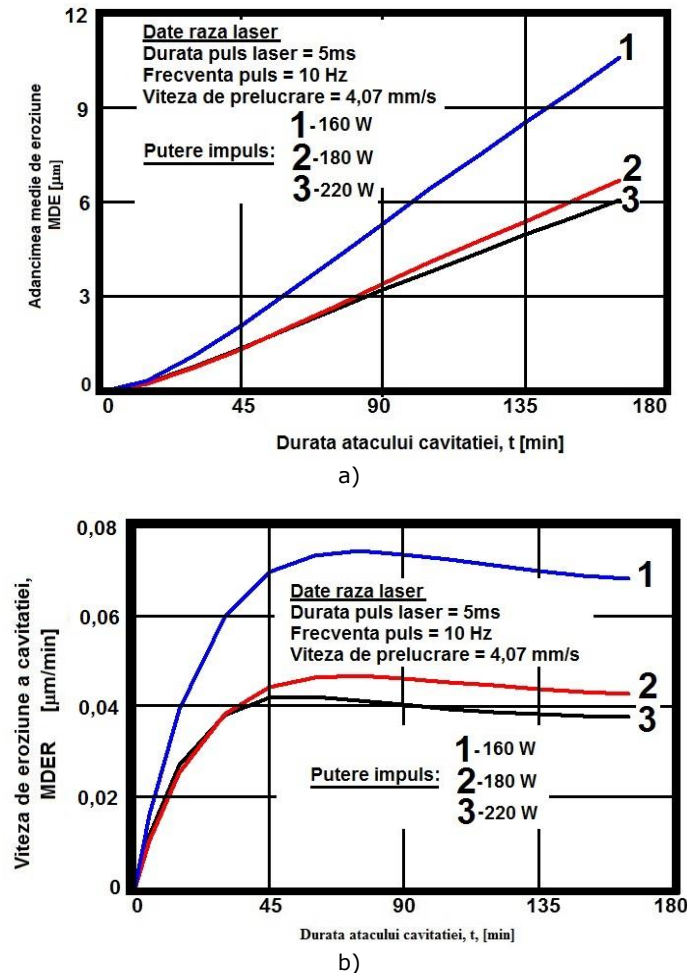


Fig.8.1 Graficele evoluției comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație:
a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Dintre cele trei regimuri, cel cu o putere în impuls de 160W conferă cea mai scăzută rezistență la eroziune prin cavitație, cu circa 51% mai scăzută decât a probelor tratate cu laser cu o putere în impuls de 180W și cu circa 83% mai mică decât a probelor tratate cu laser cu o putere în impuls de 220W.

Din aceste comparații rezultă concluzia că prin creșterea puterii în impulsul fascicului laser se îmbunătățesc comportamentele și rezistențele suprafețelor atacate prin cavitație, în primul rând datorită creșterii valorilor durtății.

b) Efectul fascicului laser folosit la retopirea stratului pulverizat termic

Compararea rezultatelor, obținute la testarea acestui bronz (aliaj AMPCO 45), pentru cele două regimuri ale fascicului laser folosit la topirea stratului pulverizat termic, are drept scop punerea în evidență a efectului puterii în impuls a fascicului laser (de 2400W, respectiv 2600W) asupra comportării și rezistenței

stratului, ca urmare a faptului că doar aceasta se modifică, restul parametrilor păstrând aceeași valoare.

Diagramele din figura 8.2 arată, prin comparație, efectul parametrilor fasciculului laser, respectiv puterii în impuls, folosit pentru retopirea stratului pulverizat termic, asupra comportării și rezistenței stratului la eroziunea prin cavitație.

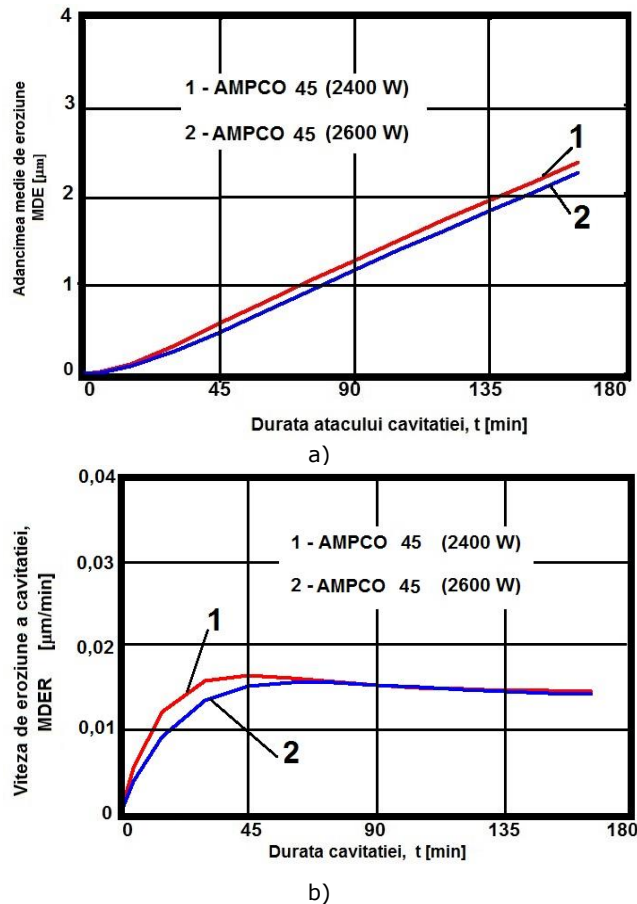


Fig.8.2 Graficele comportamentului și rezistenței la cavitație pe baza curbelor specifice:

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Din evoluțiile curbelor $MDE(t)$, figura 8.2a și $MDER(t)$, figura 8.2b, rezultă că straturile pulverizate termic, aplicate probelor, realizate din bronz AMPCO 45 au, practic, rezistențe și comportări identice, pe întreaga perioadă a cavitației.

Comportările și rezistențele, foarte bune, se datorează, în primul rând, microdunității foarte mari din stratul atacat prin cavitație (aproximativ 416, respectiv 424 HV0,5).

Așadar, pulverizarea termică a pieselor, fabricate din aliaj CuAlNiFeMn-AMPCO 45, cum sunt elicele navale, urmată de retopire cu fascicul laser, cu o putere în impuls de 2400W sau 2600W, duce la creșterea substanțială a rezistenței și comportării la eroziunea cavitației.

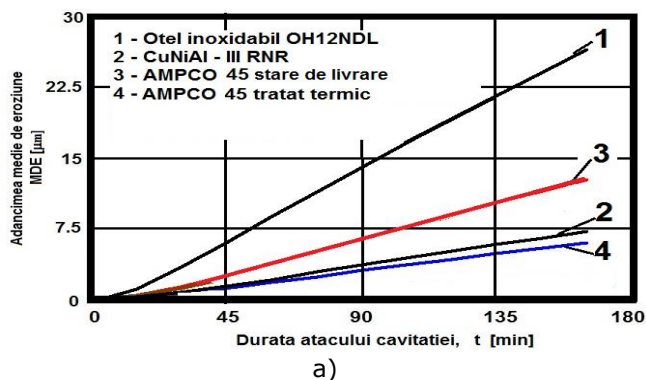
8.2 Influența tratamentului termic volumic asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

În cadrul acestui subcapitol se evaluează comportarea și rezistența bronzului AMPCO 45, pentru toate stările analizate în capitolele anterioare (capitolele 4, 5, 6 și 7), prin compararea curbelor caracteristice eroziunii prin cavitație și a principalilor parametri: adâncimea medie cumulată de pătrundere a eroziunii, MDE, după 165 minute de atac și rezistența la eroziune prin cavitație, definită prin parametrul 1/MDER, unde MDER este valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza de pătrundere a eroziunii. Evaluarea se face prin comparare cu curbele caracteristice ale materialelor etalon OH12NDL (marcă rusească, folosit la turnarea paletelor turbinelor Kaplan de la Porțile de Fier I și II [2], [3], [4], [15], [66], [73] și luat ca referință în fabricarea paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice din România, datorită rezistenței foarte bune la eroziunea prin cavitație [15], [66], [73]) și ale bronzului naval CuNiAl III-RNR (cu excelentă rezistență la eroziunea prin cavitație [16], [17], [102], și recomandat de normele RNR [127] și fostul Institut ICEPRONAV în fabricarea elicelor navale).

În figura 8.3 este pusă în evidență comportarea și rezistența bronzului, pentru starea de livrare (curba 3 și tratat termic (curba 4). Compararea cu oțelul etalon OH12NDL, curba 1, arată că, indiferent de stare, bronzul AMPCO 45 are o rezistență foarte bună la eroziunea prin cavitație.

Evoluțiile curbelor MDER(t), cu maxime reduse și tendințe de stabilizare la valori apropiate de valorile maxime, sunt specifice oțelurilor cu rezistențe și comportamente sporite la eroziunea prin cavitație [16], [66], [73], [43]. După valorile parametrului MDER, din zona de stabilizare, comparativ cu cea a oțelului OH12NDL, rezistența bronzului AMPCO 45 este de circa 1,8 ori mai mare, pentru starea livrată și de circa 4,4 ori, pentru starea tratată termic.

Comparând cu valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza de pătrundere a eroziunii (parametrul MDER) a aliajului CuNiAl III-RNR, figura 8.3b ($\cong 0,046 \mu\text{m}/\text{min}$), curba 2, rezultă că, în stare livrată, bronzul (AMPCO 45) are o rezistență mai mică de circa 1,8 ori. Însă, prin tratament termic, rezistențele la eroziune prin cavitației vibratoare, a aliajului AMPCO 45 crește, peste rezistența aliajului tradițional utilizat în turnarea elicelor navale, CuNiAl III-RNR, de circa 1,2 ori.



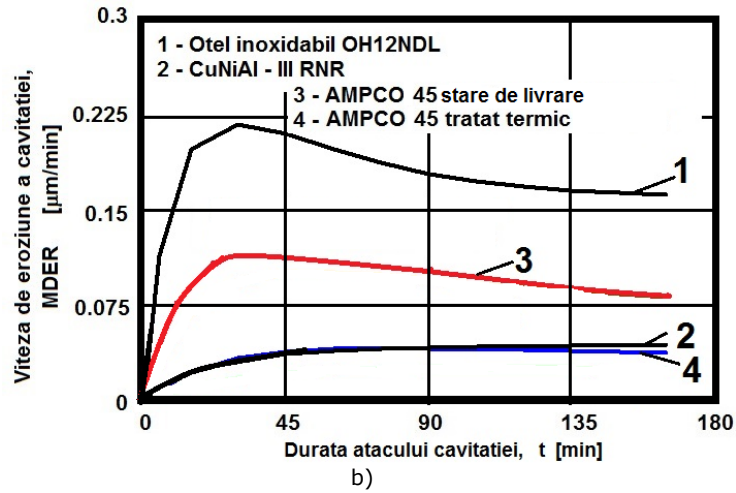
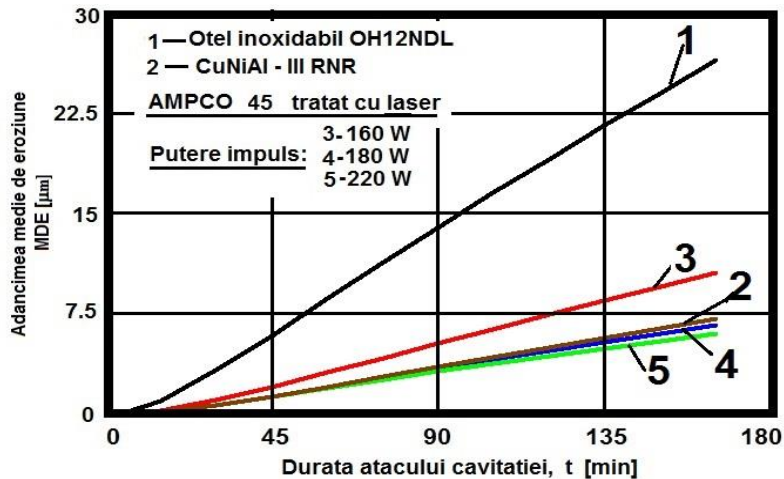


Fig.8.3 Curbele specifice de evoluție ale comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație (comparația bronzului AMPCO 45 cu materialele etalon)
 a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
 b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

În figura 8.4 sunt puse în evidență comportamentele și rezistențele bronzului AMPCO 45, rezultate din prelucrarea/tratarea suprafeței expuse atacului prin cavitație, prin folosirea razei laser cu trei tipuri de puteri în impulsul fasciculului (curbele 3, 4 și 5). Atât pantele curbelor, figura 8.4a, precum și modul de atenuare, evoluție spre stabilizare, figura 8.4b, caracterizează comportamente și rezistențe deosebite la eroziunea prin cavitație [16], [43], [64], [66], [73].



a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului

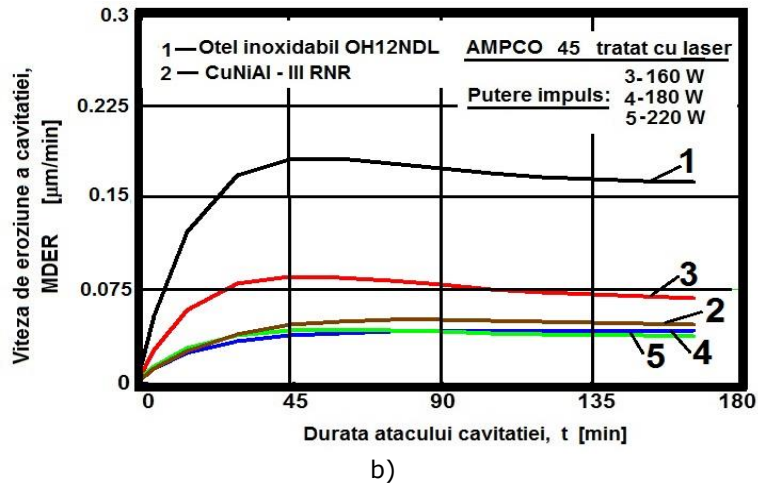


Fig.8.4 Curbele specifice de evoluției ale comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație (comparația bronzului AMPCO 45, tratat cu laser, cu materialele etalon)

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
 b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Compararea cu oțelul etalon OH12NDL, curba 1 arată, că, indiferent de puterea în impuls, utilizarea fasciculului laser, în tratarea suprafețelor probelor realizate din bronz AMPCO 45, este benefică, asigurând sporuri importante de rezistență la eroziune prin cavitație. Astfel, se obțin creșteri de circa 2,4 ori, pentru o putere în impuls de 160W, de circa 3,6 ori, pentru o putere în impuls de 180W și de circa 4,4 ori, pentru o putere în impuls de 220W.

Din comparația cu bronzul naval de înaltă rezistență CuNiAl III-RNR, curba 2, rezultă că rezistențele dobândite prin folosirea unor puteri de 180W și 220W sunt de același ordin (pentru puterea de 180W) și cu ceva mai ridicate (de circa 1,3 ori pentru puterea de 220W); în schimb, prin folosirea puterii de 160W creșterea asigurată nu duce la depășirea celei avute de aliajul CuNiAl III-RNR, fiind mai mică cu circa 47 %.

Concluzia, ce se poate deduce, din comparațiile realizate prin curbele caracteristice eroziunii prin cavitație, figura 8.4, este că prin utilizarea fasciculului laser, cu puteri în impuls de ordinul a 160W, 180W și 220W, la tratarea suprafețelor bronzurilor, de tip **CuAlNiFeMn** se obțin rezistențe ce pot asigura creșterea duratei de viață, în condiții de cavitație intensă, așa cum este cel creat în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice T2.

În figura 8.5 se arată creșterile de rezistență, la eroziune prin cavitație vibratoare, conferite de pulberile depuse termic pe suprafețele probelor de bronz AMPCO 45, retopite cu fascicul laser, folosind două puteri în impuls (2400W și 2600W).

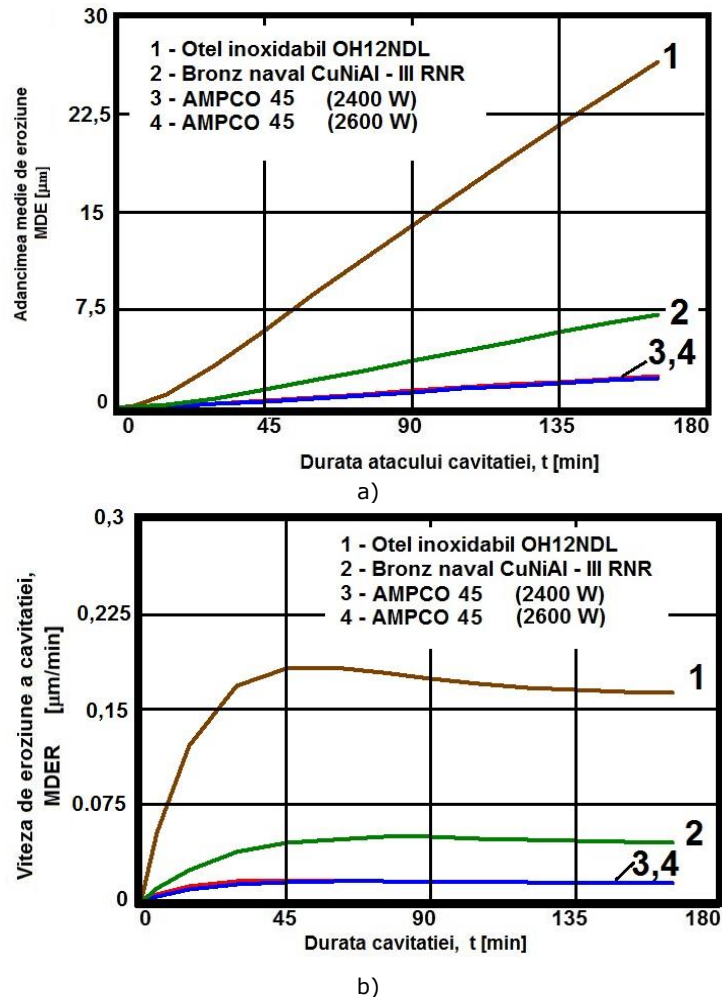


Fig.8.5 Curbele specifice de evoluție ale comportamentului și rezistenței la eroziune prin cavitație (comparația bronzului AMPCO 45 pulverizat termic și retopit cu laser, cu materialele etalon):

- a) Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului
 b) Evoluția vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului

Se observă că, indiferent de puterea în impuls și cu ce material etalon se compară, comportarea și rezistența la eroziune cresc foarte mult, și practic, de același ordin.

Comparând valorile parametrului MDER, figura 8.5b, dinspre finalul stabilizării, creșterea de rezistență față de a oțelului etalon OH12NDL este de circa 11 ori și de circa 3 ori, față de a aliajului CuNiAl.

În concluzie, pulverizarea termică, urmată de retopire cu fascicul laser, crește foarte mult rezistența la eroziunea prin cavitație.

În figura 8.6 sunt comparate adâncimile medii cumulate de pătrundere a eroziunii, MDE, iar în figura 8.7 rezistențele la eroziune, exprimate prin parametrul $1/\text{MDER}$, pentru toate stările testate la cavitația vibratoare produsă în aparatul T2.

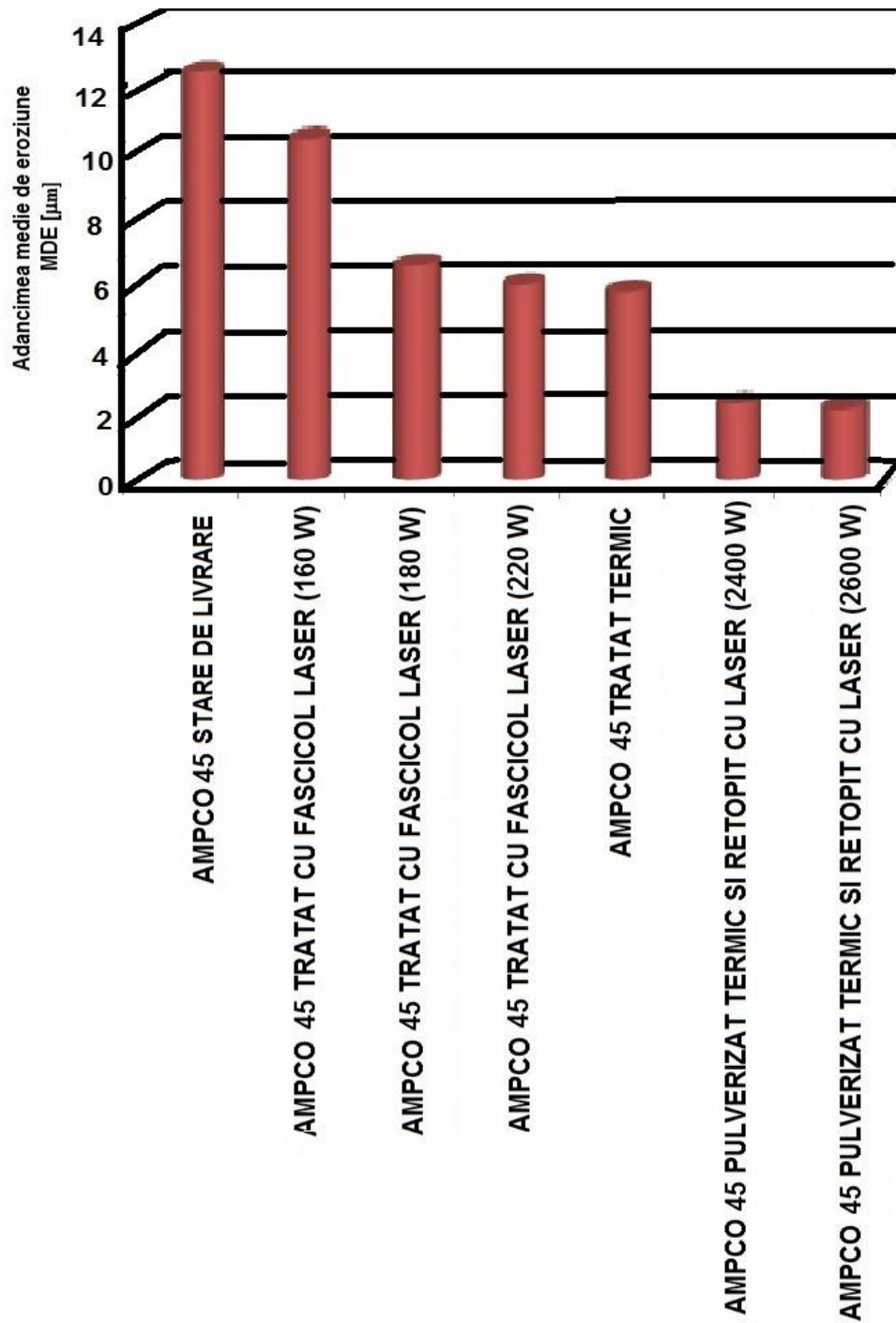


Fig. 8.6 Evoluția adâncimii medii de eroziune la finalul atacului prin cavitație (165 minute)

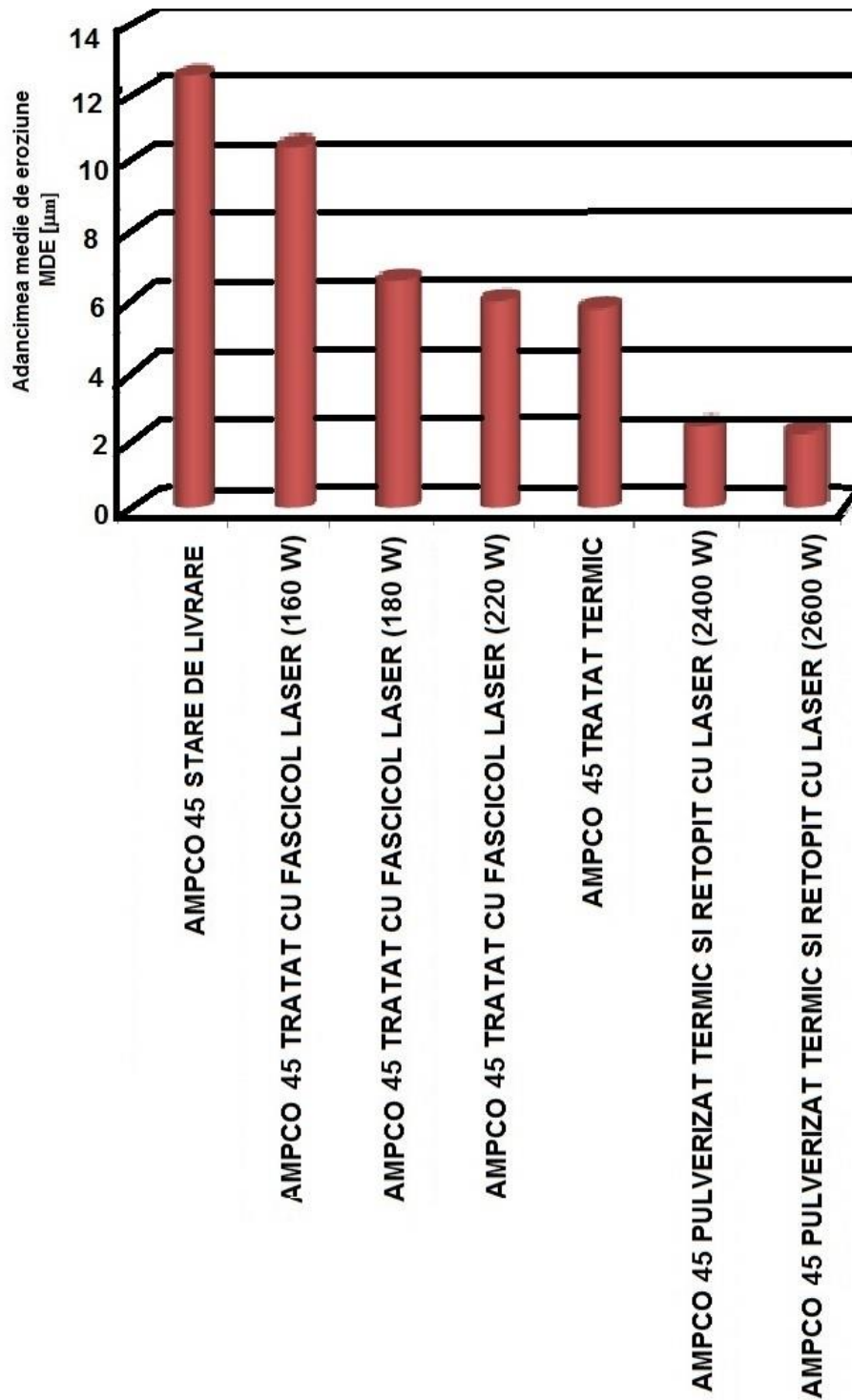


Fig. 8.7 Rezistența la eroziunea prin cavitație

Concluzia este că rezistența la cavitație este foarte mult dependentă de procedeul aplicat. Cea mai mare rezistență este realizată, prin pulverizare termică, urmată de retopire cu fascicul laser cu o putere în impuls de 220W. Luând în comparație materialele cu cea mai bună rezistență, oferită de fiecare procedeu, rezultă că prin pulverizarea termică a bronzului AMPCO 45 se obțin creșteri de circa (2,6 ÷ 4,8) ori față de simpla folosire a fasciculului laser și de circa 2,5 ori față de utilizarea tratamentului termic clasic.

8.3 Influența durtății suprafeței asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

Diagramele din figura 8.8 arată foarte clar influența procedeei de creștere a durtății, respectiv microdurtății suprafeței, asupra rezistenței acesteia la eroziunea prin cavitație vibratoare. Se observă că atât tratamentul termic, figura 8.8a, cât și utilizarea fasciculului laser, sau a pulberilor retopite cu laser, figura 8.8b, rezistența la eroziunea prin cavitație tinde să crească exponențial cu valoarea durtății/microdurtății generate.

În diagramele din figurile 8.8a și 8.9a s-au utilizat și rezultatele obținute pe un bronz, din aceeași categorie, AMPCO M4 cu 10,5% Al, 5,0% Ni, 4,8% Fe, 1,5 % Mn și restul Cu, testat în condițiile normei ASTM G32- 2010, în Laboratorul de Cavitație din U.P. Timișoara.

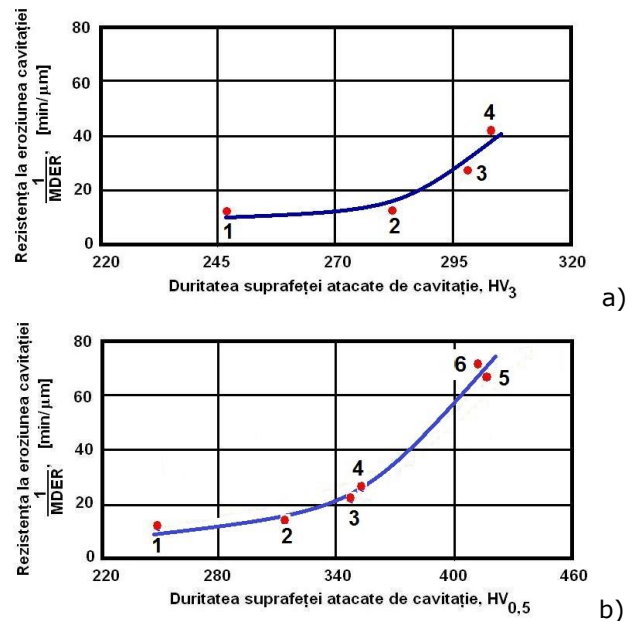


Fig.8.8 Influența durtății stratului superficial al bronzurilor asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

- a) 1- AMPCO 45 stare de livrare; 2- AMPCO M4 fără tratament;
3 - AMPCO 45 tratat termic; 4 - AMPCO M4 tratat termic;
- b) 1- AMPCO M45 stare de livrare; 2 - AMPCO 45 tratat laser 160W; 3 - AMPCO 45 tratat laser 180W; 4- AMPCO 45 tratat laser 220W; 5 - AMPCO 45 pulverizat termic și retopit cu laser 2400W; 6- AMPCO 45 pulverizat termic și retopit cu Laser 2600W; ;

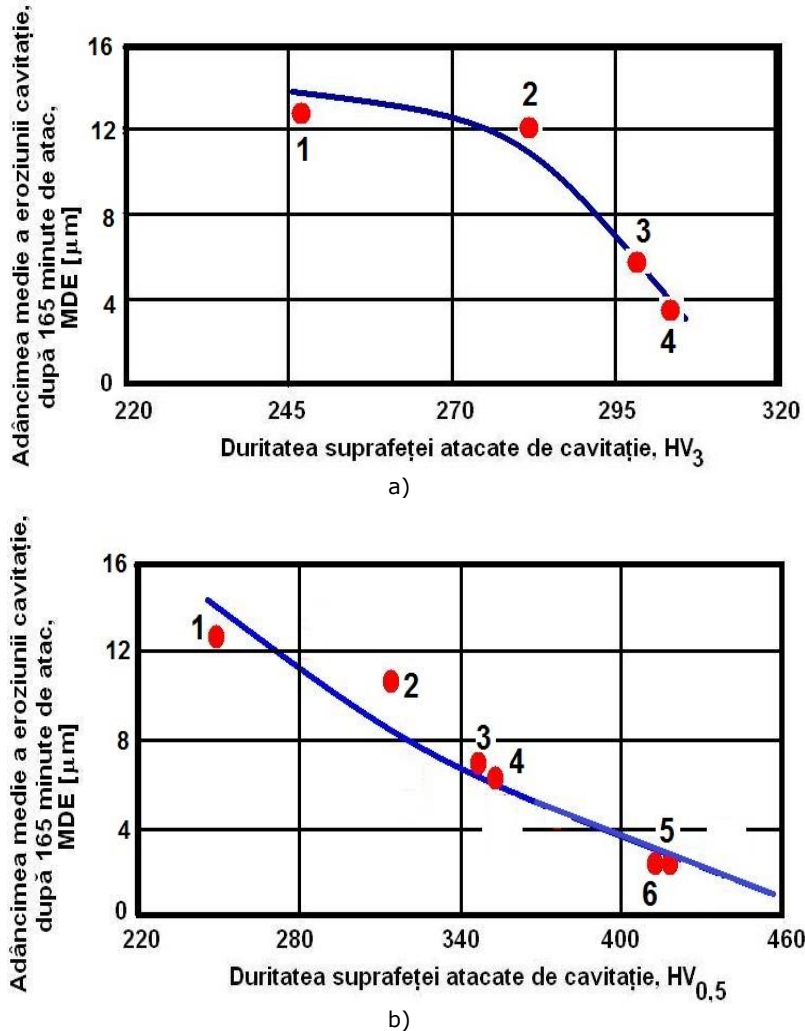


Fig.8.9 Influența durității stratului superficial al bronzurilor asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

- a) 1- AMPCO 45 stare de livrare; 2- AMPCO M4 fără tratament;
3 - AMPCO 45 tratat termic; 4 - AMPCO M4 tratat termic;
- b) 1- AMPCO M45 stare de livrare; 2 - AMPCO 45 tratat laser 160W; 3 - AMPCO 45 tratat laser 180W; 4- AMPCO 45 tratat laser 220W; 5 - AMPCO 45 pulverizat termic și retopit cu laser 2400W; 6- AMPCO 45 pulverizat termic și retopit cu Laser 2600W;

Diagramele din figura 8.9 arată influența procedului de creștere a durității, respectiv microdurității suprafeței, asupra adâncimii medii cumulate produsă prin cavitație vibratoare, după 165 minute de atac. Și din aceste diagrame rezultă că tratamentul termic, figura 8.9a și utilizarea fasciculului laser, sau a pulberilor retopite cu laser, figura 8.9b, duc la valori ale durității/microdurității suprafeței ce fac ca forța de pătrundere a eroziunii să scadă substanțial cu creșterea acestora.

8.4 Concluzii

1. Aliajul CuAlNiFeMn – AMPCO 45, în stare livrată, are comportare și rezistență specifică materialelor cu foarte bună rezistență, superioare oțelului OH12NDL, etalon pentru rotoarele și paletele rotoarelor turbinelor din România.
2. Prin tratamente termice, clasice, de tipul celor folosite în cadrul tezei, rezistența la eroziunea prin cavitație vibratoare crește substanțial, depășind rezistența bronzului naval CuNiAl- III RNR, folosit în fabricarea elicelor navale.
3. Procedeele de prelucrare/tratare a suprafețelor cu fascicule laser, expuse eroziunii prin cavitației, cu puteri în impuls de 160W, 180W și 220W, respectiv procedeele de acoperire prin pulverizare termică, urmate de retopire cu fascicul laser, cu puteri în impulsul laser de 2400W și 2600W, oferă creșteri foarte mari, ale rezistenței la atacul prin cavitație, cu mult peste cele ale stării de livrare.
4. Bronzul cercetat în cadrul tezei, AMPCO M45, indiferent de starea suprafeței probei, satisface cerințele de comportare și rezistență la eroziune prin cavitație, cerute pentru piese de tipul elicelor navale.

9. EVALUAREA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE ȘI IERARHIZAREA BRONZURILOR CERCETATE

DUPĂ DURABILITATEA MEDIE $\bar{\delta}_{cav}$ ȘI REZISTENȚA NORMALIZATĂ R_{ns}

9.1 Evaluarea și irerahizarea după durabilitatea medie

$\bar{\delta}_{cav}$

În 1983 K.Steller, [2], [16], [113], [114] pe baza mai multor rezultate experimentale, obținute în Laboratorul Institutului de Mașini cu Curent de Fluid, din cadrul Academiei de Științe Poloneze din Gdansk, a construit un model de evaluare a comportării materialelor la eroziunea prin cavitație. La baza acestuia stau o serie de ipoteze, legate de natura solicitărilor hidrodinamice din timpul distrugerii cavitaționale, respectiv de natura și structura materialului.

Ipoteza de bază este asemănarea dintre evoluția rezistenței materialului, la atacul prin cavitație, cu rezistența la oboseală, după o curbă de tip Wöhler, figura 9.1.

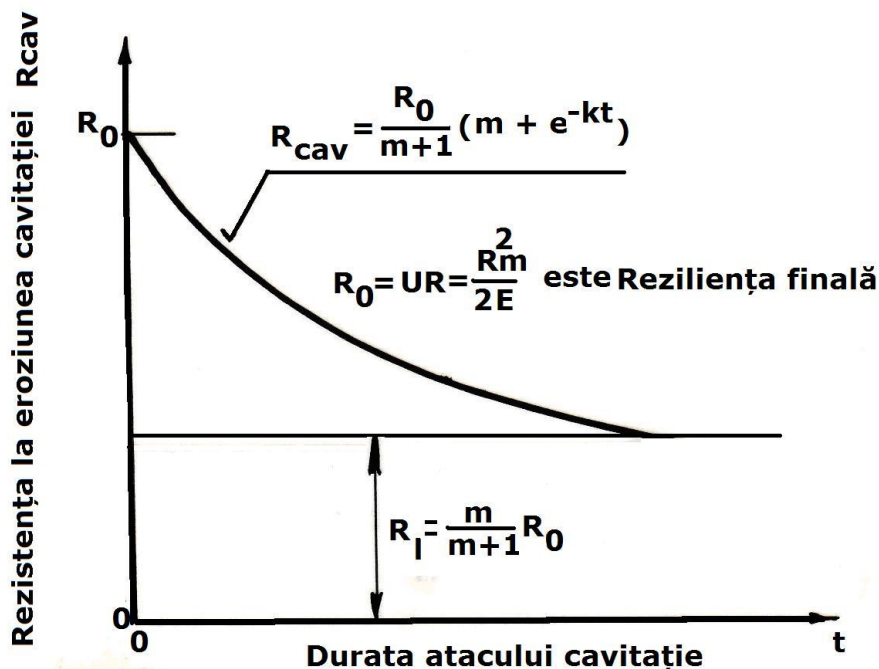


Fig.9.1 Variația rezistenței materialului la eroziunea prin cavitație funcție de timpul de atac [2], [114]

Pe considerentul că energia dezvoltată prin surparea bulelor de cavitație și transmisă suprafeței materialului, de microjeturile și undele de șoc, este egală cu cea absorbită de materialul din suprafață, pentru generarea deformațiilor elasto-plastice, fisurilor și ruperii diverselor legăturilor (interne și externe ale grăunților), culminând cu expulzarea unui volum de părți sau grupuri de grăunți [15], [43], [64] și în baza tipului de variație a rezistenței, figura 9.1, K. Steller definește durabilitatea cavitațională medie:

$$\bar{\delta}_{cav} = \frac{1 + mk\tau - e^{-k\tau}}{kV_{\tau}(m + e^{-k\tau})} \quad (9.1)$$

unde:

τ - este durata totală a atacului prin cavitație;

V_{τ} - este volumul de material erodat în timpul τ .

Relația (9.1) este recomandată, de Steller, în evaluarea practică a comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitație, prin faptul că parametrul $\bar{\delta}_{cav}$ caracterizează, oarecum, transformările interne și superficiale suferite de material în timpul distrugerii, respectiv efectele cavitației și lichidului în timpul eroziunii.

Cum lichidele, în care funcționează majoritatea mașinilor hidraulice, sunt și corozive, rezultă că rezistența la eroziune prin cavitație prezintă o scădere monotonă. Prin urmare nu va exista o rezistență limită, R_l , ca în figura 9.1, ci aceasta va tinde spre zero, ceea ce implică $m \rightarrow 0$. În acest caz durabilitatea cavitațională medie capătă forma:

$$\bar{\delta}_{cav} = \frac{1 - e^{-k\tau}}{kV_{\tau}e^{-k\tau}} \quad (9.2)$$

Pentru constanta k , ca parametru ce exprimă utilizarea energiei absorbite de material, pentru realizarea diverselor transformări, din suprafața expusă eroziunii (deformații, fisurări, ruperi, transformări de faze, etc), Steller [2], [114], definește forma:

$$k = \frac{3}{\tau} \frac{V_{\tau}\tau - \int_0^{\tau} V dt}{V_{\tau}\tau} \quad (9.3)$$

în care V este volumul erodat la un moment dat.

Deși, relațiile termenilor ce intervin în durabilitatea cavitațională medie, stabilite de K. Steller, nu conțin în mod explicit influența factorilor cu pondere importantă pentru rezistența materialului la eroziunea prin cavitație (natura constituenților structurali, proprietățile mecanice (altele decât reziliența finală), elementele chimice ale componentelor, tehnologia de elaborare și prelucrare, parametrii tehnici și funcționali ai stațiunii de testare, etc.), în practică parametrul $\bar{\delta}_{cav}$ este folosit pentru compararea rezistenței materialului la eroziunea prin cavitație cu a unui material de referință, așa cum, pentru Laboratorul de

Cavitație din Politehnica Timișoara, sunt oțelul OH12NDL și aliajul CuNiAl III-RNR [16], [39], [66], [73].

Deoarece, în cadrul tezei s-au folosit adâncimile medii de pătrundere a eroziunii, MDE, calculate cu relația (4.7), volumul de material erodat V , este dat de relația:

$$V = \pi \cdot \frac{d_p^2}{4 \cdot 10^6} \cdot A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (9.4)$$

Cum durata totală a atacului cavitației, este $\tau = 165$ minute, relația (9.3) de calcul a constantei k , capătă forma:

$$k = \frac{3}{165} \cdot \frac{165 \cdot V1 - \pi \cdot \frac{2 \cdot d_p^2}{4 \cdot 10^6} \int_0^{165} A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \cdot dt}{165 \cdot V1} \quad (9.5)$$

Unde:

- d_p - este diametrul suprafeței probei, atacată de cavitație ($d_p = 15,8$ mm);
- $V1$ - este volumul maxim erodat, ce se poate calcula din diagramele MDE(t), prezentate la capitolele 4.7, cu relația:

$$V1 = \frac{165 \cdot \pi \cdot d_p^2 \cdot MDE_{max}}{4 \cdot 10^6} \quad (9.6)$$

unde MDE_{max} - reprezintă valoarea adâncimii medii de eroziune la finalul celor 165 minute de atac al cavitației.

Forma finală a relației de calcul a durabilității medii a cavitației, pentru materialele testate în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, T2, pentru o durată totală de atac $\tau = 165$ minute devine:

$$\bar{\delta}_{CAV} = \frac{(1 - e^{-165k})}{k \cdot V1 \cdot e^{-165k}} \quad (9.7)$$

Valorile obținute pentru cele două aliaje CuAlNiFeMn- AMPCO M45, pentru toate tipurile de stări de tratament, ale suprafeței erodate, sunt prezentate în tabelul 9.1

Tabel 9.1 Durabilitatea cavitațională a aliajelor cercetate

Nr. crt.	Material	$\bar{\delta}_{cav}$
1	AMPCO 45 FT	2496
2	AMPCO 45 TT	5103
3	AMPCO 45 TL 160	2987
4	AMPCO 45 TL 180	4726
5	AMPCO 45 TL 220	5197
6	AMPCO 45 PT+TL 2400	13230
7	AMPCO 45 PT+TL 2600	13990

Valorile din tabelul 9.1 sugerează și o ierarhizare a aliajelor în funcție de rezistența la eroziune prin cavitație. Cu cât valorile sunt mai mari, cu atât materialul se comportă și rezistă mai bine testelor de cavitație.

Raportat la valoarea stării netratate, indiferent de tipul aliajului, cele mai mari diferențe sunt obținute pentru suprafețele pulverizate termic și retopite cu laser (creșteri de circa 5 ori). Importante creșteri, evident, sunt obținute și prin tratarea termică (de circa 2 ori) sau cu fascicul laser (de maxim 2,4 ori, la aliajul AMPCO tratat cu fascicul laser cu o putere de 220W), dar mult sub valorile înregistrate pentru pulverizarea termică și retopirea cu fascicul laser.

9.2 Evaluarea și ierarhizarea după rezistența normalizată la cavitație R_{ns}

Evaluarea rezistenței la cavitație a aliajelor cercetate, pentru toate stările, după valoarea parametrului rezistență normalizată la cavitație (R_{ns}) constă în stabilirea clasei definite în tabelul 9.2 (cu oțelul OH12NDL etalon) construite de dr.ing. Alin Dan Jurchela [66], ale căror limitele au fost verificate pentru o gamă foarte largă de oțeluri cercetate în Laboratorul de Cavitație, din Universitatea Politehnica Timișoara [15], [64], [66], [73], [100].

Tabelul 9.2 Limitele domeniilor de rezistență la eroziune prin cavitație (material etalon OH12NDL), [73]

Clasa	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
R _{ns}	< 0,2	(0,2 , 0,4]	(0,4 , 0,8]	(0,8 , 1,6]

Relația de calcul a parametrului R_{nsr}, conform ASTM G32-2010, este:

$$R_{ns} = \frac{MDER_s}{MDER_{se}} \quad (9.8)$$

unde: MDER_s și MDER_{se}, (mărimile cu indicele "e" se referă la oțelul etalon OH12NDL) - reprezintă valorile de stabilizare spre care tind vitezele de pătrundere a eroziunii, definite de curbele de aproximare MDE(t) (vezi capitolele 4, 5, 6, 7 și 8).

Precizare: Oțelul etalon OH12NDL este considerat cu bună rezistență la eroziunea prin cavitație, în baza rezultatelor oferite de durata lungă de exploatare, cu reparații nesemnificative, a paletelor turbinelor hidraulice de la Porțile de Fier I și II, turnate din această marcă de oțel.

Valorile parametrului R_{nsr}, afișate în tabelul 9.3, evidențiază foarte bine efectul tratamentelor aplicate suprafețelor celor două aliaje, expuse la atacul prin cavitație vibratoare. Concluzia desprinsă este că, prin astfel de tratamente, se poate mări substanțial rezistența la atacurile prin cavitație, de la o stare foarte bună la una excelentă, prin tratamente termice și cu fascicul laser, respectiv la super-rezistență, prin folosirea straturilor pulverizate termic și retopite cu laser.

Tabelul 9.3 Rezistența normalizată la eroziunea prin cavitație (etalon OH12NDL)

Nr. crt.	Material	R_{ns}	Clasa de rezistență
1	AMPCO 45 FT	0,546	Foarte bună
2	AMPCO 45 TT	0,226	Excelentă
3	AMPCO 45 TL 160	0,417	Foarte bună
4	AMPCO 45 TL 180	0,276	Excelentă
5	AMPCO 45 TL 220	0,226	Excelentă
6	AMPCO 45 PT+TL 2400	0,092	Superrezistență
7	AMPCO 45 PT+TL 2600	0,085	Superrezistență

9.3 Concluzii

Similar curbelor specifice eroziunii prin cavitație (vezi capitolele 4, 5, 6, 7 și 8), parametrii durabilitatea cavitațională, $\bar{\delta}_{cav}$, și rezistență normalizată la cavitație, R_{ns} , pun în evidență rezistența la eroziunea prin cavitație, dacă există material de comparație, așa cum este OH12NDL (pentru Laboratorul de Cavitație din Universitatea Politehnică Timișoara). Cei doi parametri permit aprecierea rezistenței la eroziune prin cavitație, doar prin compararea rezultatelor obținute la testele realizate în același aparat sau în aparate similare, cu parametri de funcționare identici.

Pentru compararea rezultatelor obținute în aparate cu parametri funcționali diferiți, care funcționează pe aceleași principii (cazul aparatelor vibratoare) este obligatorie utilizarea unei relații de efect de scară [16], [47], [106], [111].

Valorilor ambilor parametri, $\bar{\delta}_{cav}$ și R_{ns} , arată că prin diverse tratamente de modificarea a structurii sau caracteristicilor mecanice, ale suprafețelor solicitate la eroziune prin cavitație, se pot aduce îmbunătățiri substanțiale ale rezistenței la atacul cavitației.

Dintre procedeele studiate în lucrare, pulverizarea termică urmată de retopire cu fascicul laser, asigură cea mai mare rezistență la eroziunea prin cavitație vibratoare.

După valorile parametrului $\bar{\delta}_{cav}$ și clasa de ierarhizare, după valoarea parametrului R_{ns} , rezultă că toate procedeele de tratament, studiate în teză, se pot aplica bronzurilor utilizate la turnarea elicelor navale, în scopul creșterii duratei de viață, în regim de exploatare.

10. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. PERSPECTIVE NOI DE CERCETARE

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

- cercetarea eroziunii elicelor navale, prin cavitație, continuă să fie o problemă de actualitate și este mult amplificată în ultimii ani, ca urmare a ritmului ascendent de dezvoltare și exploatarea a navelor maritime și fluviale;
- cercetarea fenomenului de eroziune prin cavitație continuă să fie o preocupare atentă a oamenilor de știință ca urmare a multitudinii factorilor ce definesc hidrodinamica curgerii și materialul solid adiacent;
- investigarea eroziunii produsă prin cavitație, în laborator, este necesară deoarece se reduce timpul de analiză și arată influența factorilor ce definesc tipul de material și tratamentul aplicat asupra comportării și rezistenței la eroziune prin cavitație;
- evaluarea comportării materialelor la eroziunea prin cavitație este indicat să se facă atât pe baza curbelor și parametrilor caracteristici cât și pe baza microfotografiilor suprafețelor degradate, realizate la diverși timpi intermediari și final ai atacului prin cavitație;
- mecanismul eroziunii prin cavitație, al bronzurilor navale, este similar aliajelor feroase [15], specific propagării fisurilor de oboseală, la scară microscopică, în toată suprafața. Cercetările realizate în cadrul tezei arată că erodarea se manifestă simultan prin mecanismele de rupere ductilă și fisurare prin oboseală, formându-se cratere izolate și dispersate pe toată suprafața;
- prin aplicarea procedeelelor de durificare structurală și superficială (termic, cu laser și pulverizare termică urmată de tratare cu laser) rezistența bronzurilor de tip CuAlNiFeMn, la atacurile prin cavitație, se îmbunătățește simțitor. Evident, aplicarea în practică, a unuia dintre procedeele studiate depinde de dimensiunile elicei.
- toate formele de stare a bronzului cercetat (CuAlNiFeMn – AMPCO M45) pot fi utilizate la elicele navelor maritime și fluviale;
- prin tratamentele termice, cu laser sau pulverizare termică urmată de tratare cu laser, microduritatea suprafeței expusă atacului prin cavitație crește și are efect benefic asupra rezistenței la eroziunea prin cavitație;
- conținutul de mangan influențează comportarea și rezistența bronzurilor la eroziunea prin cavitație;
- se reconfirmă că rezistența și comportarea bronzurilor, în timpul atacului prin cavitație, sunt dependente de constituția structurală, proprietățile mecanice și elementele chimice constitutive;
- rezistența la eroziune prin cavitație este foarte redusă în primele faze de atac prin cavitație, datorită distrugerii vârfurilor asperităților generate prin acest procedeu. După îndepărtarea asperităților viteza de eroziune se reduce; rezistența la cavitație crescând ca urmare a durificării;
- evoluția în timp a curbelor specifice (adâncimea medie cumulată de pătrundere a eroziunii MDE și viteza medie de pătrundere a eroziunii MDER) este similară materialelor cu foarte bună și excelentă rezistență la eroziune prin cavitație [15], [43]. La bronzul cercetat vitezele de eroziune tind să se stabilizeze la valoarea

maximă, care, conform cercetărilor anterioare, acest mod de evoluție al comportamentului, în timpul atacului prin cavitație, se datorează durificării stratului superficial pe parcursul atacului prin cavitație. Diferențele fiind de valoare a vitezelor, ca urmare a intensităților erozive diferite;

- cea mai ridicată rezistență la eroziune prin cavitația vibratoare, dintre cele patru stări este obținută prin pulverizarea termică urmată de tratarea cu laser;
- pentru cele două regimuri de pulverizarea termică, urmate de tratare cu laser, diferențele de comportare și rezistența la eroziunea produsă prin cavitația vibratoare sunt ne semnificative, motiv pentru care se impune extinderea cercetărilor și la alte regimuri;
- se impune lărgirea bazei de date de materiale, testate la eroziune prin cavitație și utilizate în fabricarea elicelor navale (bronzuri, alame, fonte, oțeluri, aliaje de aluminiu);
- investigațiile realizate la nivel macro și microstructural au permis realizarea unor corelații între constituția fazică a materialelor investigate și comportarea la eroziune prin cavitație în condiții de laborator.
- caracterizarea complexă a distrugerii prin eroziunea cavitației din punct de vedere al mecanicii, care a implicat acțiunea simultană a principalelor caracteristici mecanice ale materialului (valorile de microduritate, rezistența mecanică la tracțiune și limita de curgere).

Contribuții personale și originale

Apreciez că cele mai semnificative contribuții, cu elemente de noutate și originalitate, dincolo de cele arătate în cadrul fiecărui capitol, sunt:

- ampla documentare, care mi-a permis să cunosc modul de manifestare a mecanismului mecanic al cavitației și să explic, comparativ cu rezultatele din literatură, comportarea și rezistența bronzului AMPCO 45 la eroziunea prin cavitație, generată în aparatul vibrator;
- împreună cu colectivul Laboratorului de Cavitație al UPT, coordonat de prof.dr.ing. Ilare Bordeasu am proiectat și realizat aparatul T2, cu cristale piezoceramice (amplitudinea vibrațiilor = 50 μ m, frecvența vibrațiilor = 20kHz, diametrul epruvetă – 15,9mm), care respectă cerințele ASTM G32-2010 și este dotat cu dispozitive pentru controlul și menținerea constantă a valorilor parametrilor funcționali, pe toată durata atacului prin cavitație vibratoare. Urmărirea întregului proces cu ajutorul calculatorului, datorită sistemului de interfațare face ca aparatul să fie unic în domeniu ca dotare și automatizare;
- am arătat că rezistența și comportarea bronzurilor de tip CuAlNiFeMn, la eroziunea prin cavitație, sunt influențate de compoziția chimică și proprietățile mecanice, în special de microduritate;
- am arătat că modelul analitic, stabilit pentru curbele de pierdere masică cumulată $m(t)$ și viteza sa de eroziune $v(t)$, folosit, în cadrul Laboratorului de Cavitație poate fi utilizat și la descrierea curbelor adâncimii medii de pătrundere a eroziunii MDE(t) și vitezei adâncimii medii de eroziune MDER(t), indiferent de tipul de material testat la eroziune prin cavitație vibratoare;
- am investigat modul în care procedeele moderne de tratament a bronzurilor (tratarea cu laser și acoperirea prin pulverizarea termică, urmata de tratare cu laser a suprafețelor expuse la cavitație) pot asigura îmbunătățirea comportamentului și rezistenței la eroziunea prin cavitație;

- am arătat că aplicarea tratamentelor termice rămâne, în continuare, soluție de creștere a rezistenței la cavitație, prin modificările structurale și de proprietăți create;
- s-a justificat necesitatea folosirii metodelor și aparatelor performante moderne de investigație structurală a comportării la eroziune prin cavitație. Prin investigațiile realizate la nivel macro și microstructural au putut fi realizate corelații între constituția fazică a materialelor investigate și comportarea la eroziune prin cavitație în condiții de laborator.

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 și asigură creșterea rezistenței la eroziunea prin cavitație;
- lărgirea bazei de date de aliaje de cupru, cercetate în aparate vibratorii cu alți parametri funcționali, pentru realizarea unei clasificări după rezistența la eroziunea prin cavitație;
- cercetarea degradării structurale, în perioada de incipiență a procesului de eroziune prin cavitație, pentru alte aliaje metalice, de cupru, sau diferite, folosite în fabricarea și repararea elicelor navale;
- cercetarea metodelor de reparare a elicelor turnate din aliaje de cupru, degradate ca urmare a eroziunii prin cavitație;
- studierea variației microdurității suprafeței atacate cu durata cavitației vibratorii;
- construirea unor metode energetice de evaluare a comportamentului și rezistenței bronzurilor la eroziunea prin cavitație vibratoare;
- utilizarea programelor profesionale și a metodelor numerice în evaluarea distrugerilor produse prin cavitație;
- oportunități de îmbunătățire a rezistenței la eroziunea prin cavitație a aliajelor de cupru prin procedee de sudare și acoperiri cu diverse pulberi;
- studiul corelației dintre mărimile de influență oferite de analiza fractală și datele testelor de eroziune prin cavitație.

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

Ing. Octavian Victor OANĂ

1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate ISI

1. Dehelean, D., Oanca, O., Toma, C., Dorohoi, C., Budau, V., Craciunescu, CM., ADVANCED MATERIALS JOINING USING A HYBRID ULTRASONIC-ELECTRIC RESISTANCE TECHNIQUE, JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS, Volume: 12 Issue: 9, SEP 2010, ISSN: 1454-4164, Pp: 1935-1941

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

1. Oanca O., Pasca, N., Bordeasu, I., Mitelea, I., HORN FAILURE ANALYSIS FROM TITANIUM ALLOY USED IN ULTRASONIC CAVITATIONAL PROCESS, 21st International Conference on Metallurgy and Materials Location: Brno, CZECH REPUBLIC Date: MAY 23-25, 2012, ISBN: 978-80-87294-31-4, pp. 1541-1546

2. TURC C, TULCAN A, OANCA O V, STAN D V., TOOL HOLDING DEVICE WITH INCORPORATED ULTRASOUND ACTIVATION SYSTEM FOR MACHINING BY CHIP REMOVAL, GRINDING AND ULTRASONIC EROSION, Patent Number(s): RO128369-A0, 30 May 2013

3. Dehelean, D., Oanca, O., IMPROVING PRODUCTIVITY AND QUALITY IN PLASTIC AND THIN METALLIC PLATES MANUFACTURING BY USING ULTRASONIC WELDING PROCESSES, SOLDAGEM & INSPECAO Volume: 14 Issue: 4 OCT-DEC 2009, ISSN: 0104-9224, Pp: 344-351

4. Belgiu, G., Oanca, O., Ruset, V., Sirbu, NA., THE GEOMETRY INFLUENCE OF THE ACTIVE SONOTORDE SURFACES OVER THE QUALITY OF ULTRASONIC WELDING FOR THE PLASTIC MATERIALS Book Series: Annals of DAAAM and Proceedings, Vienna, AUSTRIA, NOV 25-28, 2009, Volume: 20, ISSN: 1726-9679, ISBN: 978-3-901509-70-4, Pp: 1213-1214

5. Apetrei, L., Oanca, O., Toma, C., Sirbu, A., Munteanu, A., THE INFLUENCE OF ENTRANCE PARAMETERS ABOVE THE ALUMINIUM ULTRASONIC WELDING RESISTANCE, 13th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2009), Iasi, ROMANIA, MAY 21-23, 2009, ISSN: 2066-3919, Pp.15-18

6. Craciunescu, C. M.; Oanca, O., Dehelean, D. SHAPE MEMORY ASSEMBLIES USING ULTRASONIC WELDING, Symposium on Smart Materials for Smart Devices and Structures held at the Fall Meeting of the European-Materials-Research-Society, Warsaw Univ Technol, Warsaw, POLAND, SEP 15-19, 2008, ISSN: 1012-0394, Pp.71-76

3. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI

1. Bordeasu, I., Oanca, O.V., CONSIDERATIONS REGARDING THE CAVITATIONAL 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

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

5. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice internaționale (Proceedings) din străinătate

1. Jurchela A.D., Bordeășu I., Karabenciov A., Oancă O., CAVITATION RESISTANCE OF STAINLESS STEELS WITH CONSTANT CHROMIUM AND CARBON CONTENT, Cavitation resistance of stainless steels with constant nickel and carbon content, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech mai 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. I, pp. 549-552, 2011

2. Karabenciov A., Dimian M.E., Jurchela A.D., Oancă O., CAVITATION RESISTANCE OF STAINLESS STEELS WITH CONSTANT NICKEL AND CARBON CONTENT, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech mai 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. I, pp. 553-556, 2011

6. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

1. Bordeas, I., Oancă, O.V., 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, Stiinta si inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.581-588

2. Alexescu, D., Bordeășu, I., Oancă, O., Baciu, I., STUDIUL REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELULUI INOXIDABIL MARTENSITIC CU 12 % CROM DESTINAT FABRICĂRII PALETELOR DE MAȘINI HIDRAULICE, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Stiinta si inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.415-420,

3. Bleoancă, E, V., Bordeășu, I., Oancă, O., Baciu, I., Bădărău, R., CONSIDERAȚII PRIVIND AVARIILE PRODUSE LA ARBORII TURBINELOR BULB DE LA PORȚILE DE FIER II, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Stiinta si inginerie, Vol.19, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.429-434

4. Bordeășu, I., Bădărău, R., Baciu, I.D., Bordeășu, C-Tin., Oancă O., CONTRIBUȚII IN CORELAREA PARAMETRULUI EROZIUNII CAVITAȚIONALE 1/MDPR CU PARAMETRII FUNCȚIONALI AI APARATULUI DE CERCETARE, A XII-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Stiinta si inginerie, Vol.22/2012, Sebeș, 3-5 iunie 2012, ISSN 2067-7138, pp.55-61

5. Bordeășu, 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, Stiinta si inginerie, Vol.22/2012, Sebeș, 3-5 iunie 2012, ISSN 2067-7138, pp.127-134

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

1. **Oancă, O.**, Bordeasu, I., Mitelea, I., Crăciunescu, C., **PHENOMENOLOGY OF DEGRADATION BY CAVITATION FOR HEAT TREATED CuNiAlFe BRONZES**, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17, 2013, pp.
2. Jurchela, A.D., Bordeasu, I., Mitelea, I., **Oanca, I.**, **MICROSTRUCTURE AND CAVITATION EROSION RESISTANCE FOR STAINLESS STEELS WITH 12 % CHROMIUM AND VARIABLE NICKEL CONCENTRATIONS**, **METAL 2013**, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17, 2013 pp.
3. Karabenciov, A, Bordeasu, I., Mitelea, I., **Oanca, I.**, **CORRELATIONS BETWEEN CAVITATION EROSION RESISTANCE AND MECHANICAL PROPERTIES FOR STAINLESS STEELS WITH 10% OF NICKEL AND VARIABLE CONCENTRATIONS OF CHROMIUM**, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17, 2013, pp.

Data
28.12.2013

Semnătura,

BIBLIOGRAFIA

1. Amza, Gh., ș.a., Sisteme ultraacustice, Editura Tehnică, București 1988.
2. Anton I., Cavitația, Vol. I, Editura Academiei RSR, București, 1984.
3. Anton I., Cavitația, Vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985.
4. Anton I., Turbine hidraulice, Ed. Facla Timișoara, 1979.
5. Anton I., Kuzman-Anton A.F., s.a., Studii și cercetări pentru determinarea comportării la cavitație a oțelurilor marca T07CuMoMnNiCr165-Nb și T09CuMoMnNiCr185-Ti destinate turnării rotoarelor monobloc pentru turbinele Francis, Contr. Cercet. Șt. 96/1985.
6. Alexescu, D., Bordeășu, I., **Oancă, O.**, Baci, I., Studiul rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil martensitic cu 12 % crom destinat fabricării paletelor de mașini hidraulice, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.415-420, 2011.
7. Apetrei, L., **Oancă, O.**, Toma, C., Sirbu, A., Munteanu, A., The Influence of Entrance Parameters Above the Aluminium Ultrasonic Welding Resistance, 13th International Conference on Modern Technologies, Quality and Innovation (ModTech 2009), Iași, ROMANIA, MAY 21-23, ISSN: 2066-3919, Pp.15-18, 2009.
8. Baran Gh., Teza de doctorat: Contribuții la studiul cavitației și eroziunii cavitaționale. Facultatea Energetica, I.P.B.,1978.
9. Baran, Gh., Ciocânea A., 2005, Curgeri cavitaționale și abrazive, Ed. Printech, ISBN 973-718-267-7, pag. 175.
10. Belgiu, G., **Oancă, O.**, Ruset, V., Sirbu, NA., The geometry influence of the active sonotrode surfaces over the quality of ultrasonic welding for the plastic materials Annals Of Daaam And Proceedings, Vienna, Austria, Nov 25-28, 2009, Volume: 20, ISSN: 1726-9679, ISBN: 978-3-901509-70-4, Pp: 1213-1214, 2009.
11. Binchiciu, H., Surgean, I., Popa, I.E., Iovanas, R., Încărcarea prin Sudare cu Arcul Electric, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992.
12. Bleoancă, E, V., Bordeășu, I., **Oancă, O.**, Baci, I., Bădărău, R., Considerații privind avariile produse la arborii turbinelor bulb de la Porțile de Fier II, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel -fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, Vol.19, Sebeș, 5-6 iunie 2011, ISSN2067-7138, pp.429-434, 2011.
13. Bologa, O., I. Crudu, Cavitation, tribosystems and cavitation tribomodels. The Annals of University "Dunărea de Jos" of Galați 2002. Fascicle VIII, Tribology(1221-4590): p. 3-10.
14. Bordeășu, 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, Știință și Inginerie, Vol.22/2012, Sebeș, 3-5 iunie 2012, ISSN 2067-7138, pp.127-134, 2012.
15. Bordeășu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006.

16. Bordeasu I., Teză de doctorat: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, 1997.
17. Bordeasu, I., **Oancă, 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.
18. Bordeasu, I., Bădărău, R., Baciu, I.D., Bordeasu, C-Tin., **Oancă O.**, Contribuții în corelarea parametrului eroziunii cavitaționale 1/MDPR cu parametrii funcționali ai aparatului de cercetare, A XII-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, Vol.22/2012, Sebeș, 3-5 iunie 2012, ISSN 2067-7138, pp.55-61, 2012.
19. Bordeasu I., Anton L.E., Baya A., Jurchelea 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.
20. 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.
21. Bordeasu I., Dimian E., Karabenciov A., Jurchela A.D., Birău N., Lustyan A., Câmpian V., „Considerații privind comportarea la eroziune a unor oțeluri destinate creșterii rezistenței suprafețelor atacate prin cavitație”, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, Vol.17, pp.425-430, Sebeș, 4-5 iunie 2010.
22. Bordeasu, 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, Știință și Inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, pp.581-588, 2011.
23. Bordeasu I., JurchelaA.D., Karabenciov A., Bordeasu D., Bodin F., „Nickel's Influence over Cavitation Erosion Of Stainless Steels With Constant Chromium Content”, Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timișoara Transactions on Mechanic, Special Issue, Tom 53 (67), pp.421-424, Timișoara 2008.
24. Bordeasu I., Popoviciu, M., Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening, Machine Design, PP. ISSN ISSN 1821-1259, 2012.
25. Bordeasu 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.
26. Bordeasu I., - Eroziunea cavitațională a materialelor folosite în realizarea elicelor navale, analele Universitatii din Oradea , fascicula Mecanica, Oradea, pp.54-59, 1992.
27. Bordeasu 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.
28. 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.
 29. Breslin, J.P., Andersen P., Hydrodynamics of ship propellers, 3, Editor Cambridge University Press: United Kingdon, 2003.
 30. Brooks J. W. Thèse de doctorat (Ph. D.). Université de Birmingham, 1987.
 31. Carlton, J., Marine propellers and Propulsion, Elsevier Ltd: Oxford, 2007.
 32. Carlton, J., Propeller service experience, in 7th Lips Symposium, 1989.
 33. Cojocaru V., Cercetări privind creșterea duratei de viață a paletelor turbinelor hidraulice supuse la eroziune cavitațională, Teza de doctorat, Resita, 2013.
 34. Craciunescu, C. M.; **Oancă, O.**, Dehelean, D., Shape Memory Assemblies Using Ultrasonic Welding, Symposium on Smart Materials for Smart Devices and Structures held at the Fall Meeting of the European-Materials-Research-Society, Warsaw Univ Technol, Warsaw, POLAND, SEP 15-19, ISSN: 1012-0394, Pp.71-76, 2008.
 35. Crawford A.E., Tehnique de ultrasons, Dunod, Paris, 1959.
 36. Dehelean, D., **Oancă, O.**, Toma, C., Dorohoi, C., Budau, V., Craciunescu, CM., Advanced Materials Joining Using a Hybrid Ultrasonic-Electric Resistance Technique, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Volume 12, Issue 9, SEP 2010, ISSN: 1454-4164, Pp: 1935-1941, 2010.
 37. Dehelean, D., **Oancă, O.**, Improving Productivity and Quality in Plastic and Thin Metallic Plates Manufacturing by Using Ultrasonic Welding Processes, SOLDAGEM & INSPECAO, Volume: 14, Issue: 4, OCT-DEC 2009, ISSN: 0104-9224, Pp: 344-351, 2009.
 38. Dimian M. E., Cercetări asupra rezistenței la cavitație a aliajelor de titan cu structura bifazică, Teză de doctorat, Timișoara, 2012.
 39. Dimian E., Bordeasu I., Karabenciov A., Jurchela A.D., Birău N., Mitelea I., „Rezistența la eroziunea cavitațională a unui aliaj de titan ecruisat”, A X-a Conferința națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, vol.17, pp. 453-438, Sebeș, 4-5 iunie 2010.
 40. Dumitrescu S., ș. a. Calculul elicei. București: Editura Academiei Române, 1990.
 41. Edwin L., Frances A., Margaret W.,- Statistics Manual, Dover Publications, Inc. New York, 2010.
 42. Frank J.P., Michel J.M., Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers-Dordrecht/Boston/London. 2004.
 43. Franc J.P., ș.a., La Cavitation, Mecanismes phisiques et aspects industriels, Press Universitaires de GRENOBLE, 1995.
 44. Gal C., ș.a., Proiectarea asistata de calculator a ghidurilor de unda pentru ultrasunete, Sesiunea de comunicări științifice a tinerilor absolvenți, Timișoara, 1988.
 45. Galperin M.I., ș.a., Prevenirea distrugerilor prin cavitație și repararea acestora în condiții de exploatare "Energomașinostroienie", Nr. 2, 1963.
 46. 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.

47. 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.
48. Geru N., s.a., Analiza structurii materialelor metalice, Editura Tehnică, București, 1991.
49. Geru, N., Metalurgie fizică, Editura didactică și pedagogică, București, 1981.
50. Ghersghel D.A., ș.a., Aparate cu ultrasunete, Editura Tehnică, București, 1984.
51. Hammitt F.G., Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw Hill International Book Company, 1980.
52. Hammitt F.G., Bhatt N.R., Cavitation Damage resistance of Hardened Steels, Univ. Michigan, p.1-36, 1970.
53. Hammitt F.G., De M., He J, Okada T., Sun B-H., Scale effects of cavitation including damage scale effects, Report No. UMICH, 014456-75-I, Conf. Cavitation, Michigan, 1980.
54. Hammitt F.G., Nath A., De M.K., Erosion of ferrous and aluminum alloys in cavitating adiois, Report No. UMICH 014456-53-I, University, Michigan, 1980.
55. Hattori S., Ishikura R., Zhang Q., Construction of Database on Cavitation Erosion and Analyses of Carbon Steel Data, Cav2003, GS-11-002, 2003.
56. Hattori S., Kitagawa T., Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data, Wear, Volume 269, Issues 5-6, 19 July 2010, Pp. 443-448, 2010.
57. Hattori S, Mikami N., Cavitation erosion resistance of stellite alloy weld overlays, Wear, Volume 267, Issue 11, 29 October 2009, Pages 1954-1960, 2009.
58. Heymann F.J.: On the time dependence of the rate of erosion due to impingement or cavitation. [in:] Erosion by Cavitation or Impingement, A symposium presented at the 69th Annual Meeting, ASTM, Atlantic City. ASTM Special Technical Publication no.408, pp. 70-100. 1966.
59. Heymann F. J., Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion, ASTM STP, Vol.474, pp212, 1970.
60. Hobbs J.M., Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
61. Hobbs J.M., Vibratory cavitation erosion testing at nel, Confernce Machynery Groop, Edinburgh, 1974.
62. Hooper L. J., Experimental Investigation of Initiationof Cavitation Behind an Accelerated Circular Disc, IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery Sendai, 1962.
63. Hobbs J.M., Experience with a 20 - KC Cavitations erosion test, Erosion by Cavitations or Impingement, ASTM STP 408, Atlantic City, 1960.
64. Hrelescu M., Cercetări asupra alierii oțelului moale în arcul cu elemente care să confere metalului depus rezistență la cavitatie, Teza de doctorat, Timișoara, 1967.
65. Ito T., An experimental investigation into the unsteady cavitation of marine propellers. IAHR Symposium on Cavitation and Hydraulic Machinery, Sendai. 1962.
66. Jurchela, A.D., Cercetări asupa eroziunii produse prin cavitatie vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel, Teza de doctorat, Timișoara, 2012.
67. Jurchela A.D., Bordeasu I., Karabenciov A., **Oancă O.**, Cavitation resistance of stainless steels with constant chromium and carbon content, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation,

- ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. I, pp. 549-552, mai 2011.
68. Jurchelea, A.D., Bordeasu, I., Mitelea, I., **Oancă, I.**, Microstructure and Cavitation Erosion Resistance for Stainless Steels with 12% Chromium and Variable Nickel Concentrations, METAL 2013, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17. 2013, (lucrare acceptată - volum proceeding în curs de apariție pe pag. ISI Web), 2013.
 69. Jurchela A.D., Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Lupu D.R., Asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului aliat tratat cu fascicule de electroni, A IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel -fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, vol.15, pp.761-766 Sebeș, 5-6 iunie 2009.
 70. Jurchela A.D., Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Rezistența la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicule de electroni, a IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel -fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și Inginerie, vol.15, pp.767-772, Sebeș, 5-6 iunie 2009.
 71. Jurchela A.D., Karabenciov A., Bordeasu I., Mitelea I., Birău N., Dimian E., Cavitation erosion resistance of unalloyed titanium treated with electron beam, Proceedings of the 6th International Conference, Integrated Systems for Agri-Food Production, SIPA'09, Nyíregyháza, Hungary, pp.225-228 noiembrie, 2009.
 72. Jurchelea A.D., Bordeasu I., Karabenciov A., Birău N., Dimian E., Influența microstructurii și a proprietăților mecanice ale oțelurilor cu conținut controlat de crom asupra rezistenței la distrugerea prin cavitație, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.17, pp.445-450, Sebeș, 4-5 iunie, 2010.
 73. Karabenciov A., Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom, Teză de doctorat, Timișoara, 2013.
 74. Karabenciov A., Dimian M.E., Jurchela A.D., **Oancă O.**, Cavitation resistance of stainless steels with constant nickel and carbon content, The 15th International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. I, pp. 553-556, mai 2011.
 75. Karabenciov, A, Bordeasu, I., Mitelea, I., **Oanca, I.**, Correlations Between Cavitation Erosion Resistance and Mechanical Properties for Stainless Steels with 10% of Nickel and Variable Concentrations of Chromium, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17. 2013, (lucrare acceptată - volum proceeding în curs de apariție pe pag. ISI Web), 2013.
 76. 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.
 77. Karimi A., Leo W.R., Phenomenological model for cavitation erosion rate, Computational Material Science and Engineering, 95, 1-4. 1987.
 78. Karimi A., Martin J. L., International Metals Revue, Vol. 312, Nr. 1. 1986.
 79. Knapp R., a. o., - Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, 1970.
 80. Kuiper, G., Cavitation Inception on Ship Propeller Models. Wageningen: Netherlands Ship Model Basin, no.655, 1981.
 81. Kuzman-Anton A.F., Contributions to the study of cavitation erosion on Kaplan turbine runners, Conference "Hydroforum ", Gdansk, 1985.

82. Kuzman-Anton A.F., Influenta unor proprietati fizice ale lichidului asupra incipientei si eroziunii cavitationale, Teza de doctorat, Timisoara, 1992.
83. Lambert, Teză de doctorat, Deformația plastică și rezistența la cavitație a oțelurilor inoxidabile austenitice, Montreal, Canada, 1998.
84. Louis H., Tai P.T., Wehlage T., Yabuki A., Cavitation erosion prediction by quantification of surface integrity, International Conference, Cambridge, 1992.
85. Mathiazhagan Andy, a.o., Corrosion behaviour of brass in the Vembanad estuary, India. Journal of Marine Science and Technology. Vol.18: p. 719-722, 2010.
86. Mânzână M.E., Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație - eroziune în diferite materiale metalice, Teză de doctorat, București, 2012.
87. Meigh, H.J., Cast and wrought aluminum bronzes properties, processes and structure, Cambridge: IOM Communications Ltd, University Press, 2000.
88. Mitelea I., - Studiul metalelor, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1983.
89. 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.
90. Mustapha A.B., Etude des mécanismes de fissuration par fatigue-corrosion de différents types d'aciers inoxydables, Thèse de doctor. Montreal. 1983.
91. Nedeloni M.D., Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricarea componentelor de turbine hidraulice, Teză de doctorat, Reșița, 2012.
92. Noskievic J., The extend mathematical model of cavitation and erosion wear, Proc 6 th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1983.
93. **Oancă O.**, Pașca, N., Bordeășu, I., Mitelea, I., Horn Failure Analysis from Titanium Alloy Used in Ultrasonic Cavitation Process, 21st International Conference on Metallurgy and Materials Location: Brno, CZECH REPUBLIC, MAY 23-25, 2012, ISBN: 978-80-87294-31-4, pp. 1541-1546, 2012.
94. **Oancă, O.**, Bordeășu, I., Mitelea, I., Crăciunescu, C., Phenomenology of Degradation by Cavitation for Heat Treated CuNiAlFe Bronzes, 22th International Conference on Metallurgy and Materials, May 15-17.2013, pp. (lucrare acceptată - volum proceeding în curs de apariție pe pag. ISI Web), 2013.
95. 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.
96. Palaev N.I., ș.a., Despre metodele electrochimice de protecție a turbinelor hidraulice de eroziunea de la cavitație, "Energomașinostroenie", Nr. 2, 1968.
97. Palaev N. I., Edel I., U., Kavitația v ghidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad, 1974.
98. Pădurean I., Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile, Teză de doctorat, Timișoara, 2005.
99. Pearsall, I.S., Cavitation. Mills and Boun, 1972.
100. Popoviciu M., Bordeășu I., A quantitative method of estimating the cavitation behaviour of materials tested in a magnetostrictive facility, Buletinul Stiintific, Universitatea Politehnica "Timișoara", Vol 41 (55), 1996.

101. Popoviciu M., Bordeasu I., A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Vol II, Timisoara, 1994.
102. Popoviciu M., Bordeasu I., Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Stiintific si Tehnic al Universitatii Tehnice, Timisoara, Vol 39 (53), Fascicula 1-2, 1994.
103. Popoviciu M., Bordeasu I., Considerations upon the stating of cavitation Average service life of Nodular Castings and the Alloys utilized for naval propellers, Buletinul Stiintific si Tehnic al Universitatii Tehnice, Timisoara, Vol 40(51), 1993.
104. Popoviciu M., Bordeasu I., Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationnelle, Bulletin Stiintific si Tehnic, Universitatea Tehnica, Timisoara, Vol 40(51), 1993.
105. Popoviciu O.M., Bordeasu I., Tehnologia fabricatiei sistemelor hidraulice, Editura Politehnica, Timisoara, 1998.
106. Sakai I. Shima A., On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials, Report No. 385, Tokyo. 1987.
107. Scheffel M., s.a., Dispozitive cu ultrasunete, Partea a II-a, Editura Tehnica, Bucuresti, 1989.
108. Scotto V. e.a. 1979. Corrosion- Scientifique, Vol. 19. pp 237.
109. Simoneanu R., Cavitation pit counting and steady - state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995.
110. Simoneanu R, s.a., Cavitation erosion and deformation mechanisms of Ni and Co austenitic stainless steels, erosion by liquid and solid impact, Proceedings of ALSI-VII, Cambridge, pp32.1-32.8. 1987.
111. Steller J. K., International cavitation erosion test - test facilities and experimental results, 2 - emes Journees Cavitation, Paris, March, 1992.
112. Steller K., Bugola R., Steller J., Cavitation Roads and their erosive effects, 2 - emes, Journees Cavitation, Paris, 1992.
113. Steller J. K., International cavitation erosion test - summary of results, International Conference, Cambridge, 1992.
114. Steller K., Reymann Z., Krzysztoiwicz T., Evaluation of the resistance of materials to the cavitation erosion, Proceedings of the fifth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Akad Kiado, Budapest, 1975.
115. Suciuc V., Suciuc M.-V., Studiul materialelor, Bucuresti: Fair Partners, 2008.
116. Thiruvengadam A., Preiser H. S., - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 - 3, 1963.
117. Thiruvengadam A., Cavitation erosion, Applied Mechanics, Vol 24, Nr. 3, 1971.
118. Turc C, A, **Oancă O. V.**, V., Tool Holding Device with Incorporated Ultrasound Activation System for Machining by Chip Removal, Grinding And Ultrasonic Erosion, Patent Number(s): RO128369-A0, 30 May 2013.
119. Veerabhadra Rao P., Syamala Rao B. C., Lakshmana Rao N.s. Erosion and Cavity Characteristics in Rotating Components, J.T.E.V.A, Vol 8, No. 3. 1980.
120. 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.
121. *** (2010). Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32-10.
122. *** 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.

123. *** [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.
124. *** <http://www.uni-duisburg.de/FB7/IST/links/Klassif.html>], Uni-Duisburg FB IST: Liste der Klassifikationsgesellschaften und Organisationen.
125. *** 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.
126. *** 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
127. *** Registrul Naval Roman, Reguli pentru clasificarea și construcția navelor maritime, Vol. V, București, 1986.
128. ***
http://www.ampcometal.com/common/datasheets/us/A45_EX_E_US.pdf.
129. *** http://www.ampcometal.com/common/datasheets/en/AM4_EX_E.pdf.
130. ***www.sulzer.com/as/-/media/.../TS_MaterialGuide_EN_052012.pdf, Thermal Spray Materials Guide.
131. ***Soft INFO U.
132. *** Soft KREEL ENGINEERING.