

ROLUL TRATAMENTELOR DUPLEX ÎN CREȘTEREA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELURILOR PENTRU APARATURA SISTEMELOR HIDRAULICE

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

autor ing. Ghera Cristian
conducători științifici Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea
Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeășu
Timișoara 2017

1. Stadiul actual al cercetărilor privind cavitația în sistemele hidraulice de acționare

Acționările hidraulice reprezintă un domeniu important al tehnicii moderne, cu o largă aplicabilitate, care a penetrat aproape toate ramurile industriale, de la domeniul energetic, construcții de mașini, mașini-unelte, auto, aviație, naval, medicină, până la industrie aerospațială.

În combinație cu acționările electrice și diverse instalații de automatizare, sistemele hidraulice pot face față unor regimuri de lucru extrem de variate, motiv pentru care acestea vor beneficia de o arie tot mai largă de interes atât din punct de vedere al aplicabilității practice, cât și al cercetării.

Sistemele hidraulice de tip hidrostatic [2, 8] conform fig.1.2, au rolul de a transforma prin intermediul aparatelor hidraulice, energia electrică sau mecanică (produsă în general de motoare tipizate) în energie hidraulică (sub formă de lichid sub presiune), de a o controla și distribui la punctele de interes, și de a o reconverti în energie mecanică, la parametrii necesari.

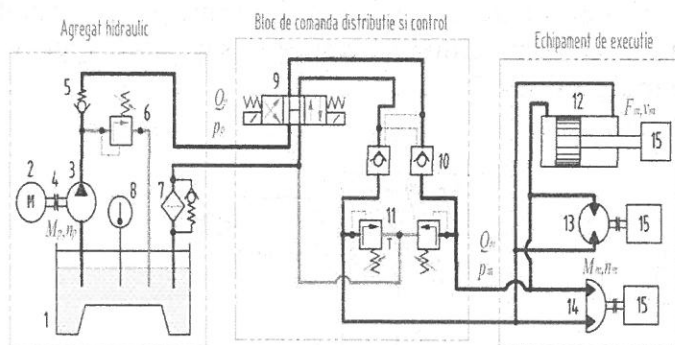


Fig.1.1. Structura unui sistem hidraulic

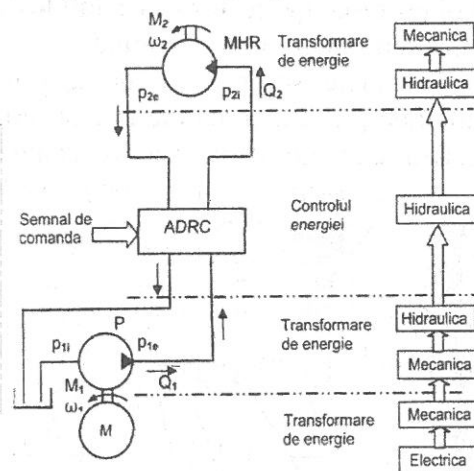


Fig.1.2. Transformarea energiei în sistemele hidraulice de acționare, de tip hidrostatic

În general, așa cum reiese din fig.1.1, sistemele de acționare hidrostatice se compun dintr-un agregat hidraulic (care generează un debit de lichid Q_p la o presiune p_p), un bloc de comandă, distribuție și control, și echipamentul de execuție, care pot fi montate fix sau pe

utilaje mobile.

Tendențele la nivel mondial de micșorare a gabaritelor aparaturii hidraulice, au ca efect creșterea vitezelor de lucru prin acestea, ceea ce determină scăderi ale valorii presiunii în interstiții până la valoarea presiunii de vaporizare, și implicit inițierea fenomenului de cavitație [1-3, 7-9, 19].

Cercetările realizate în cadrul laboratoarelor Școlii Politehnice Federale din Lausanne fig.1.3, prin filmare cu cameră ultrarapidă (37500 cadre/secundă) și modelare 3D, redau modul de formare, dezvoltare și surpare al bulelor cavitaționale, și de propagare a microjeturilor și undelor de șoc, care produc deteriorarea frontierelor solide din imediata vecinătate.

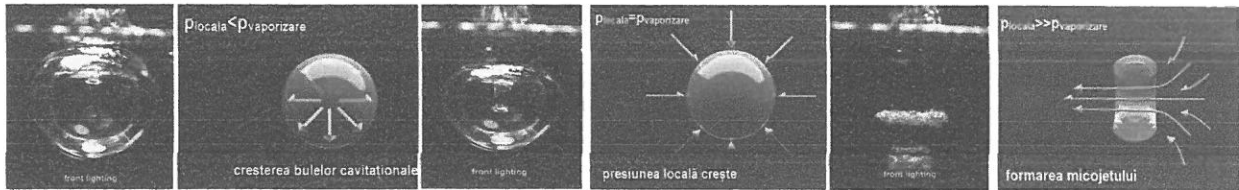


Fig.1.3. Formarea și implozia bulelor cavitaționale [20]

Efectele de eroziune sunt vizibile atât pe elementele mobile, cât și pe corpul aparatelor fig.1.4.

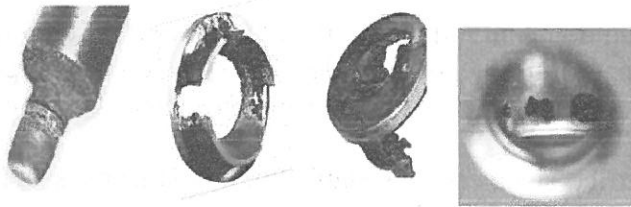


Fig.1.4. Elemente de aparatura hidraulică, deteriorate prin cavitație

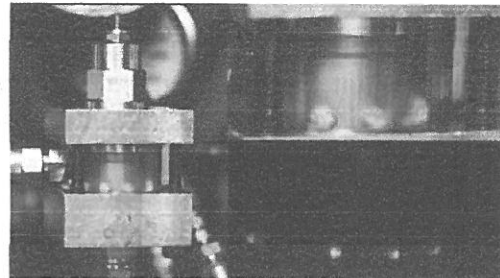


Fig.1.5. Formarea zonelor cavitaționale, însoțite de fenomenul de sonoluminiscență

Compania producătoare de aparatură hidraulică Sun Hydraulics, fig.1.5, a pus în evidență atât zonele de formare a bulelor cavitaționale, cât și fenomenului de sonoluminiscență ce însoțește implozia acestora, în supape de presiune pilotate, tip cartuș, conform montajului din imagine.

Zonele susceptibile de apariție și dezvoltare a cavitației în principalele aparate hidraulice [3, 12], și anume în distribuitoare cu sertar cilindric, respectiv supape de reglare a presiunii cu ventil conic, sunt prezentate în fig.1.6 și 1.7.

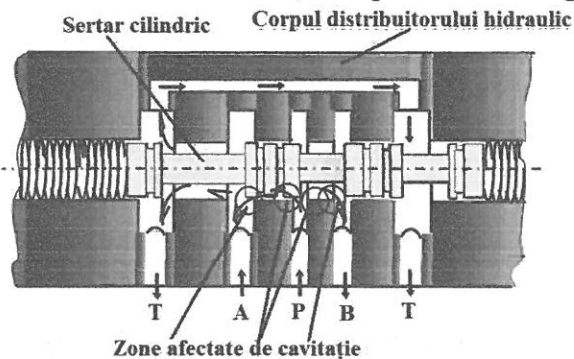


Fig.1.9. Zonele susceptibile de apariție și dezvoltare a cavitației în distribuitoare cu sertar cilindric liniar

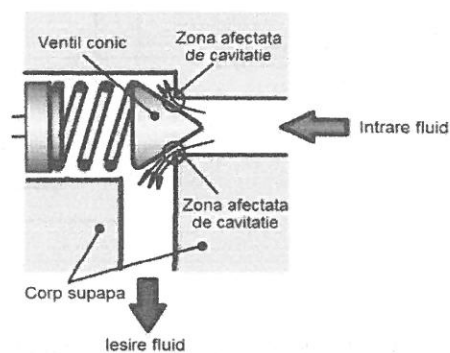


Fig.1.10. Zonele susceptibile de apariție și dezvoltare a cavitației în eupape de reglare a presiunii cu ventil conic

Obiectivele tezei de doctorat

1. Îmbunătățirea rezistenței la cavitație a oțelurilor slab aliate, tratate Duplex prin carburare urmată de călire de suprafață prin inducție;
2. Cercetarea efectului tratamentului termic de recoacere urmată de ecrusare mecanică cu fascicul laser, în creșterea rezistenței la cavitație a oțelului slab aliat 16MnCr5;
3. Creșterea rezistenței la cavitație prin tratamentul termic de îmbunătățire urmată de nitrurare în mediu gazos sau cu fascicul laser a oțelului aliat 34CrNiMo6;
4. Stabilirea unei noi proceduri de evaluare a rezistenței oțelurilor la eroziunea cavitațională, bazată pe parametrul de rugozitate R_z ;

Noutatea temei constă în faptul că se studiază tehnici specifice tratamentelor combinate de tip Duplex, care au ca scop însumarea caracteristicilor mecanice și structurale superioare, obținute prin fiecare tratament în parte, pentru îmbunătățirea comportamentului acestora la eroziune cavitațională vibratorie, a două oțeluri cu o largă utilizare în construcția componentelor aparaturii hidraulice.

Amplificarea studiilor cu privire la cauzele care determină cavitația în instalațiile hidraulice de acționare, în special în aparatele de comandă, distribuție și reglare și găsirea de soluții pentru asigurarea bunei funcționări dinamice este o necesitate. Aceste studii sunt dorite și din cauza faptului că vibrațiile determinate de ciclul tipic de evoluție al bulelor cavitaționale individuale sau grupate se pot extinde și la nivelul întregului ansamblu de conducte, aparate și motoarele de execuție (liniare/rotative), fenomen deosebit de grav la sistemele hidraulice automate de acționare.

2. Materiale cercetate. Aparatura de laborator utilizată. Metode de analiză și evaluare.

Cercetările din cadrul tezei de doctorat le-am făcut pe două oțeluri, destinate fabricării pieselor mobile din aparatura hidraulică de comandă, distribuție și reglare, care la anumite regimuri de funcționare, sunt supuse atacului distructiv al microjeturilor și undelor de șoc create prin implozia bulelor cavitaționale; și anume oțelul slab aliat pentru carburare 16MnCr5, respectiv oțelul aliat de îmbunătățire 34CrNiMo6.

Oțelul slab aliat 16MnCr5 – simbolizat alfanumeric 1.7131 conform normelor EN 10084:2008, este un oțel hipoeutectoid [3, 10, 11, 15, 16] pentru carburare, având compoziția chimică prezentată în tabelul 2.1, iar caracteristicile mecanice prezentate în tabelul 2.2.

Tabel 2.1. Compoziția chimică a oțelului 16MnCr5 (No.:1.7131)

Material 16MnCr5	Elemente însoțitoare și de aliere, %							
	C	Si	Mn	Cr	P	S	Mo	Fe
Valori prescrise	0.14÷ 0,19	max. 0,40	1÷ 1.3	0.8÷ 1,1	max. 0,025	max. 0,035	-	rest
Valori efective	0.16	0.28	1.06	1.12	0.010	0.026	0.02	rest

Tabel 2.2. Caracteristici mecanice ale oțelului 16MnCr5 în stare recoaptă

Material 16MnCr5	R _m N/mm ²	R _{p0,2} N/mm ²	A ₅ %	Z %	HV daN/mm ²
Valori prescrise	550	420	21	62÷64	170
Valori efective	560	425	20	62	185

Oțelul slab aliat 34CrNiMo6 - simbolizat alfanumeric 1.6582, conform EN 10083-3:2006, este un oțel hipoeutectoid, cu o largă arie de aplicabilitate în aparatura hidraulică și nu numai

[3, 13, 15, 17], având compoziția chimică prezentată în tabelul 2.3, iar caracteristicile mecanice prezentate în tabelul 2.4.

Tabel 2.3. Compoziția chimică a oțelului aliat 34CrNiMo6 (No.:1.6582)

Marca 34CrNiMo6	Elemente însoțitoare și de aliere, %							
	C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo
Valori prescrise	0,3÷ 0,38	max. 0,4	0,5÷ 0,8	1,3÷ 1,7	1,3÷ 1,7	max. 0,025	max. 0,035	0,15 ÷0,3
Valori efective	0,34	0,25	0,61	1,34	1,45	0,008	0,019	0,18

Tabel 2.4. Caracteristicile mecanice ale oțelului în stare îmbunătățită

Material 34CrNiMo6	Rm N/mm ²	Rp _{0.2} N/mm ²	A5 %	Z %	HB daN/mm ²
Valori prescrise	1100÷1300	900	9-14	45	248÷255
Valori efective	1300	1000	9	45	249

Oțelul aliat 41Cr4 – oțel etalon - simbolizat alfanumeric 1.7035, este un oțel hipoeutectoid, cu o largă arie de aplicabilitate în construcția aparaturii hidraulice [3], luat ca referință datorită bunei rezistențe la eroziunea cavitației, având valorile compoziția chimică și caracteristicilor mecanice prezentate în tabelele 2.5 și 2.6 conform normele europene, respectiv cele medii, conform certificatului de calitate eliberat de către producător.

Tabel 2.5. Compoziția chimică a oțelului aliat 41Cr4 (No.:1.7035)

Marca 41Cr4	Elemente însoțitoare și de aliere, %					
	C	Si	Mn	Cr	P	S
Valori prescrise	0,38÷ 0,45	max. 0,4	0,6÷ 0,9	0,9÷ 1,2	max. 0,025	max. 0,035
Valori efective	0,42	0,25	0,70	1,05	0,025	0,03

Tabel 2.6. Caracteristici mecanice ale oțelului în stare îmbunătățită

Material 41Cr4	Rm N/mm ²	Rp _{0.2} N/mm ²	A5 %	Z %	HB daN/mm ²
Valori prescrise	900÷1100	660	12	35	241÷255
Valori efective	1000	660	12	35	255

Testele de cavitație le-am realizat în cadrul Laboratorului de cavitație din cadrul Universității Politehnica Timișoara, pe un aparat vibrator standard, cu cristale piezoceramice, fig. 2.1, pe probe realizate din materialele cercetate, supuse diferitelor combinații de tratamente termice și termochimice [3-5, 10-13, 16-18, 19].

Pierderile masice s-au determinat prin cântărire pe balanța analitică cu precizie de 10⁻⁵ g, fig.2.2, iar măsurătorile de rugozitate le-am realizat cu ajutorul rugozimetrului digital marca Mitutoyo.

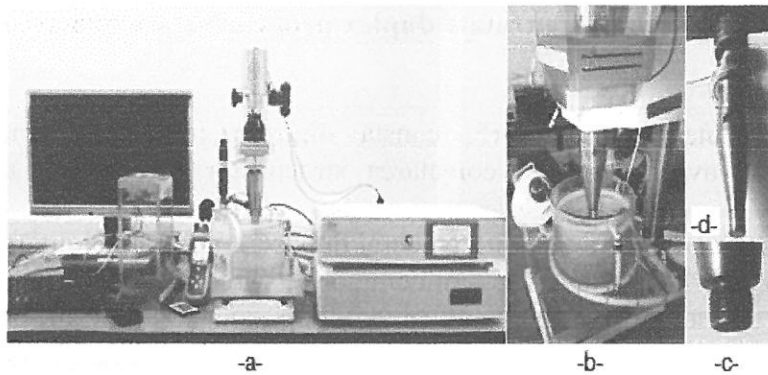


Fig.2.1. Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice



Fig.2.2. Balanța analitică tip Zatkłady Mechaniki Precyzyjnej WPI

Investigațiile microstructurale s-au realizat în cadrul Laboratorului de Ingineria materialelor, utilizând aparatura din dotare, cum ar fi microscopul optic fig.2.4, microscopul electronic cu baleiaj fig.2.3 pentru captarea imaginilor mărite la diferite scări și determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X; microdurimetru Vikers fig.2.6 pentru măsurători de duritate; respectiv difractometrul de raze X marca X'Pert de la firma Philips, fig.2.5 pentru determinarea fazelor existente prin analize de difracție cu raze X.



Fig.2.3. Microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax

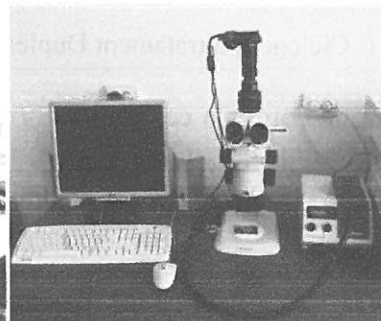


Fig.2.4. Microscopul OPLIMPUS SYX7



Fig.2.5. Difractometrul de raze X (X'Pert de la firma Philips)



Fig.2.6. Microdurimetru digital Vikers HV-50AC

Materialele selectate pentru experimentări sunt destinate fabricării pieselor mobile din aparatura hidraulică, de comandă, distribuție și reglare (sertare, ventile, etc.) [3], care, la numite regimuri de funcționare, sunt supuse atacului distructiv al microjeturilor și undelor de șoc create prin implozia bulelor cavitaționale.

Aparatura și metodele de experimentare/investigare corespund cerințelor standard pentru derularea cercetării științifice.

Metodele de evaluare a comportării și rezistenței la eroziunea cavitației vibratoare și de investigare a structurii erodate sunt în conformitate cu prevederile normelor standard, ele fiind folosite în cadrul laboratoarelor de cavitație și de știința materialelor ale Universității Politehnica Timișoara.

3. Rezistența la cavitație a oțelurilor slab aliate tratate duplex prin carburare urmată de călire de suprafață prin inducție

Primul tratament aplicat oțelului 16MnCr5, constă dintr-un tratament termic preliminar de reoacere [14, 15], având ca scop corectarea structurilor defectuoase ale materialului.

Ulterior prelucrărilor mecanice s-a aplicat un tratament duplex, conform ciclogramei din fig 3.1 [4, 11, 15], ce constă dintr-un tratament termochimic de carburare, urmat de un tratament termic de călire de suprafață prin inducție, și revenire, având drept rezultat diminuarea tensiunilor interne.

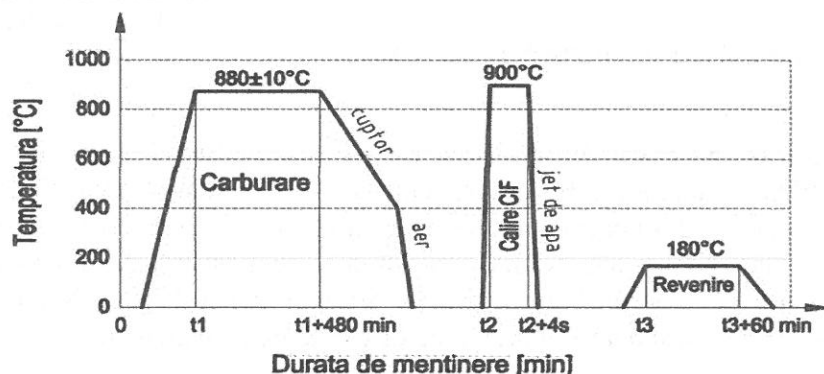


Fig.3.1. Ciclograma tratament Duplex.

Testele de cavitație, desfășurate conform cerințelor normativului ASTM G32-2010, în urma cărora au fost ridicate curbele caracteristice specifice: adâncimea medie cumulată de pătrunderii eroziunii MDE(t) fig.3.2, respectiv viteză de pătrundere a eroziunii MDER(t) fig.3.3

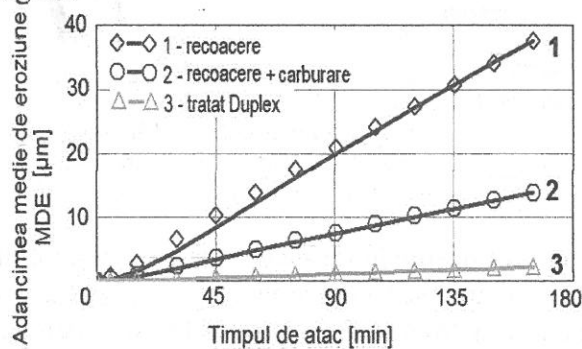


Fig.3.2. Comparații ale variației adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitațional, specifice celor trei regimuri de tratament

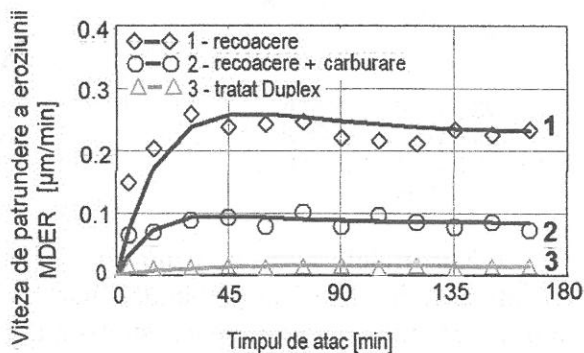


Fig.3.3. Comparații ale variației vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitațional, specifice celor trei regimuri de tratament

Din evoluțiile acestora se observă faptul că aplicarea tratamentului Duplex de carburare, urmată de călire de suprafață prin curenți induși de înaltă frecvență și de revenire la temperatură joasă, favorizează o reducere a vitezei de eroziune prin cavitație de cca. 17 ori comparativ cu starea recoaptă și de cca. 6 ori comparativ cu starea carburată.

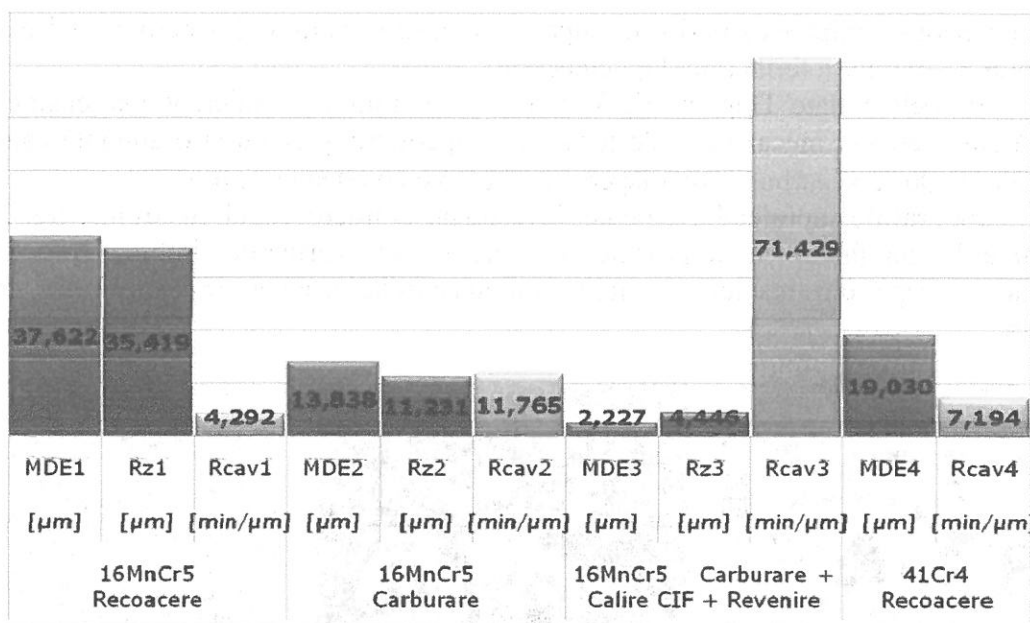


Fig.3.4. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat

În histograma din fig. 3.4 sunt comparați principalii parametrii cavitaționali ai probelor aflate în diferite stări de tratament, cu cei ai oțelului etalon 41Cr4.

Astfel după parametrul R_{cav} , cea mai mare rezistență la cavitație este realizată prin tratamentul duplex (carburare + călire CIF+revenire): de circa 17 ori mai mare decât cea înregistrată pentru starea recoaptă și de circa 6 ori față de cea obținută pentru starea carburată.

Față de parametrii oțelului etalon 41Cr4, cu excepția stării recoapte, care are o rezistență inferioară (cu circa 97 % după valorile lui MDE și cu circa 68 % după valorile lui R_{cav}), prin tratamentele de carburare și cel duplex, se realizează creșteri importante, după cum urmează:

- de circa 10 ori, după valorile lui R_{cav} și de circa 8,5 ori, după valorile lui MDE- pentru probele tratate duplex;
- cu circa 64 %, după valorile lui R_{cav} și cu circa 40 %, după valorile lui MDE- pentru probele cementate.

Investigațiile realizate cu ajutorul microscopului optic scot în evidență natura constituenților structurali aferenți fiecărei etape de tratament în parte, astfel:

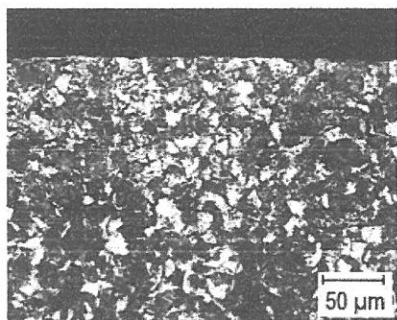


Fig.3.5. Microstructura oțelului 16MnCr5 în stare recoaptă x200

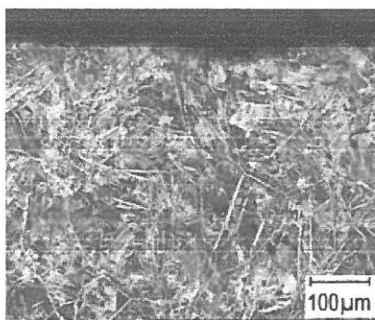


Fig.3.6. Microstructura stratului carburat al oțelului 16MnCr5 x500

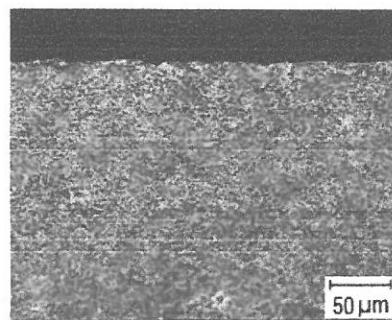


Fig.3.7. Microstructura stratului tratat Duplex x200

-probele în stare recoaptă, (fig.3.5), au microstructura constituită din ferită și perlită, constituenți cu slabe caracteristici mecanice și de rezistență la eroziune cavitațională;

- la probele carburate, (fig.3.6), s-au observat trei substraturi caracteristice și anume:

stratul exterior- perlită + carburi (oțel hipereutectoid); substratul 2 – perlită (oțel eutectoid); substratul 3 – perlită + ferită (oțel hipoeutectoid);

- probele tratate Duplex (fig.3.7) au o structură preponderent martensitică, ce le conferă caracteristici mecanice și de rezistență superioare, precum și o anumită cantitate de austenită reziduală și carburi ϵ fin dispersate, coerente cu rețeaua de bază.

Topografiile suprafețelor erodate, investigate la microscopul electronic, fig. 3.8-3.10, scot în evidență faptul că la probele recoapte și cele carburate, inițierea procesului de degradare începe din insulele de ferită proeutectoidă, urmată de expulzarea grăunților cristalini.

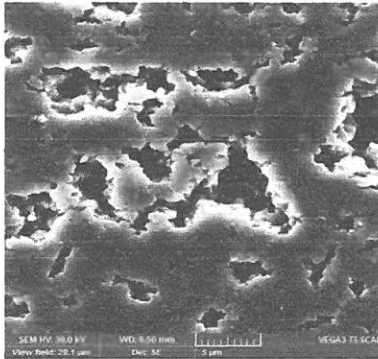


Fig.3.8. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor recoapte -x 2500

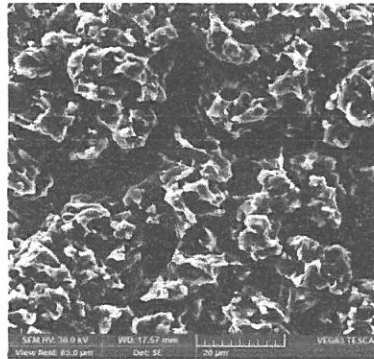


Fig.3.9. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor carburate -x 2500

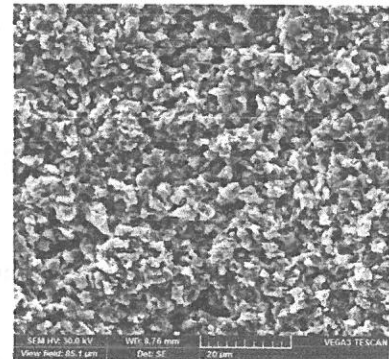


Fig.3.10. Imaginea SEM suprafeței cavitate a probelor tratate Duplex-x2500

La probele tratate Duplex, amorsele de fisurare sunt determinate atât de austenita reziduală, cât și de particulele de carburi, care sunt dure și fragile. Urmare a înaltelor caracteristici de rezistență mecanică ale structurii martensitice, aspectul suprafeței cavitate este uniform, iar ruperea are un caracter fragil.

Analizele de difracție cu raze X, pun în evidență prezența feritei, $Fe\alpha$ în probele recoapte, la cele carburate apar în plus picuri ale carburii de fier Fe_3C , iar la cele tratate Duplex se mai poate observa prezența martensitei ($C_{0.14}Fe_{1.86}$) și a austenitei reziduale $Fe\gamma$ (fig. 3.11).

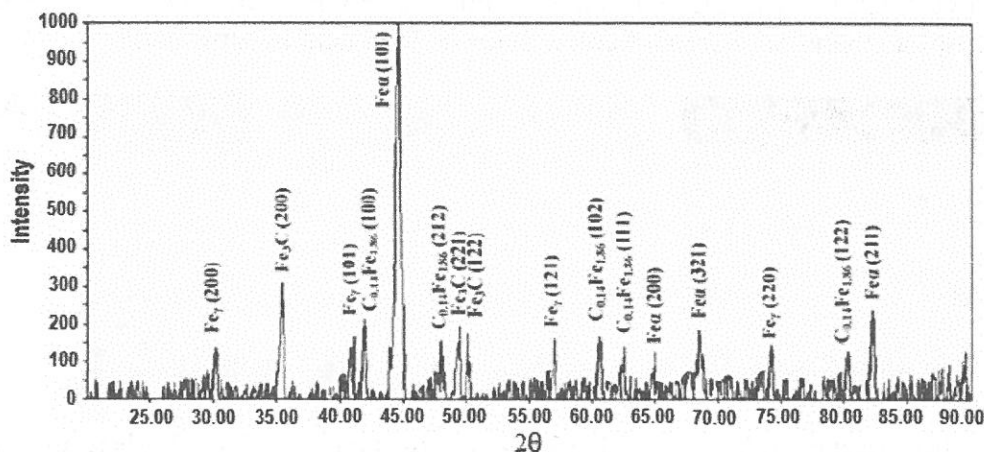


Fig.3.11. Spectrele de difracție ale probelor tratate Duplex

Măsurători sclerometrice HV0.3 realizate pe secțiunea stratului tratat Duplex (fig.3.12), indică creșteri ale valori durtății de 710 - 740 daN/mm² în zona marginală, aceasta scăzând continuu, până la valoarea durtății materialului de bază, pe o adâncime de cca 0,9 - 1 mm.

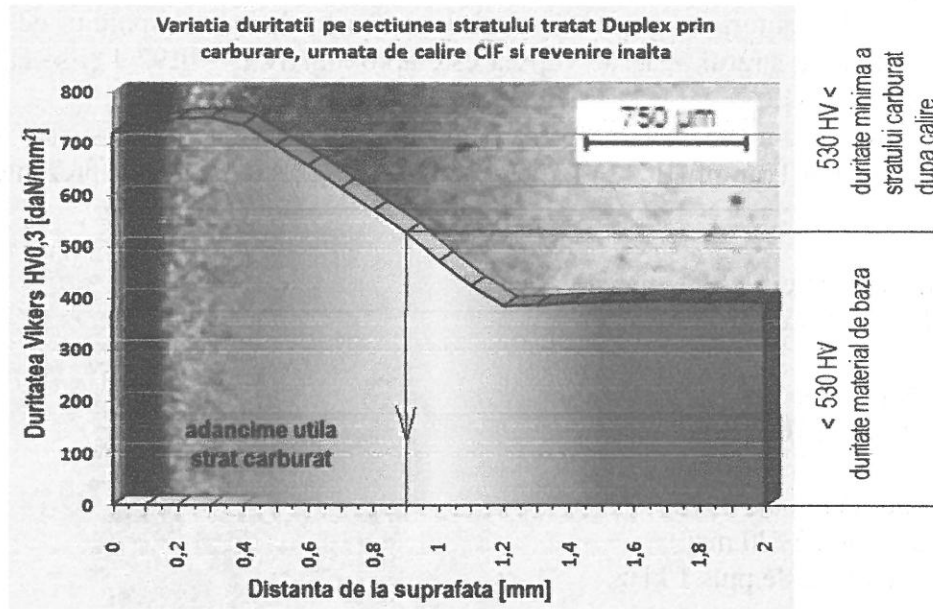


Fig.3.12. Variația durității pe secțiunea stratului tratat Duplex.

Alături de efectul economic obținut prin reducerea duratei procesului de tratament, comparativ cu varianta clasică de carburare urmată de călire volumică și de revenire la temperatură joasă, tratamentul Duplex analizat asigură obținerea unei granulații și implicit unei microstructuri martensitice, în straturile superficiale, mult mai fine, care justifică îmbunătățirea semnificativă a rezistenței la degradare prin cavitație.

4. Rolul tratamentului recoacere urmată de ecrusare mecanică cu fasciculul laser în creșterea rezistenței la cavitație a oțelului slab aliat 16MnCr5

Ecrusarea cu fasciculul laser (cunoscută în literatură sub denumirea de Laser peening LP sau Laser shock peening LSP) reprezintă un procedeu de durificarea a suprafețelor materialelor metalice, utilizând, în mod benefic, tensiunile reziduale rezultate în urma deformării plastice superficiale a structurii cristaline a materialului [10, 15], sub acțiunea undelor de șoc generate de variația bruscă de presiune în plasma formată la suprafața probei, la impactul radiației laser cu un strat absorbant depus anterior.

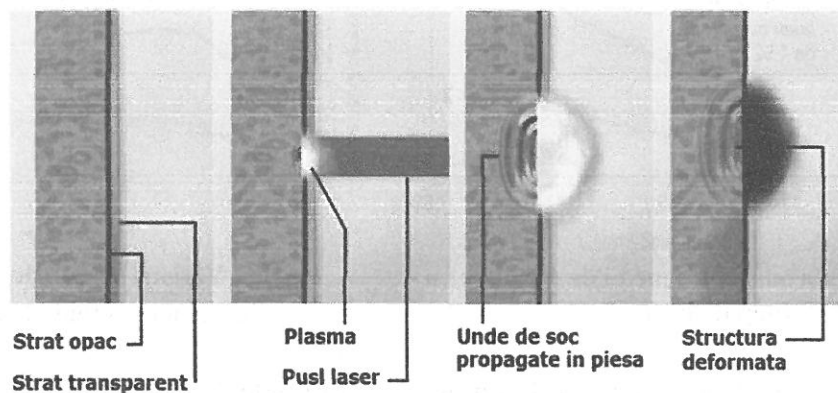


Fig.4.1. Etapele de realizare a ecrusării cu fasciculul laser LSP.

Parametrii de proces ai tratamentului de ecrusare sunt următorii: putere în puls a razei laser $P=240\text{W}$; 39 spoturi/cm^2 ; durata pulsului $t = 8\text{ ms}$; diametrul spotului de cca. 2 mm . Energia absorbită de stratul opac de vopsea este aproximativ $E = 1,92\text{ J}$ și se calculează cu relația: $E = P \cdot t [\text{W}\cdot\text{s}]$.

Tratamentul s-a efectuat la ISIM Timișoara, pe o instalație de sudare – tăiere cu fascicul laser, marca Trumpf HL 124 P, prezentată în fig.4.2, cu parametrii prezentați alăturat.

Parametrii instalației laser, marca Trumpf HL 124P, sunt:

- tip laser Nd:YAG;
- lungime de undă 1064 nm ;
- putere laser la ieșire 120 W ;
- putere maximă în puls 5 kW ;
- durata pulsului $0,3\pm 20\text{ ms}$;
- frecvența maximă de puls 1 kHz .

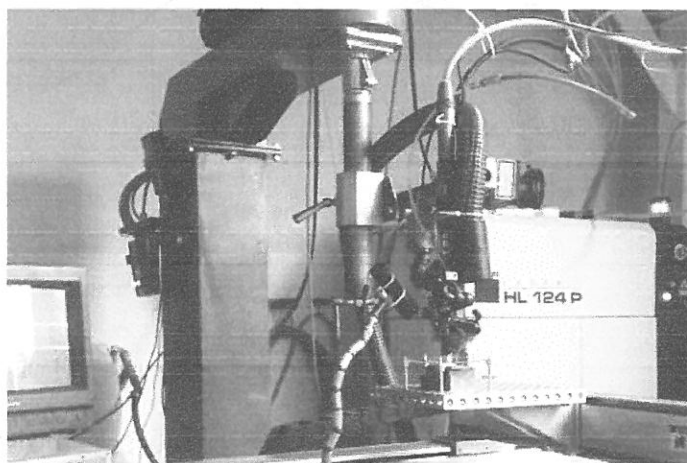


Fig.4.2. Microunitate laser, marca Trumpf HL 124 P

Din imaginile alăturate, fig.4.3, se remarcă aspectul vălurit al suprafeței ca urmare a deformațiilor superficiale, survenite în urma impactului cu fasciculul.

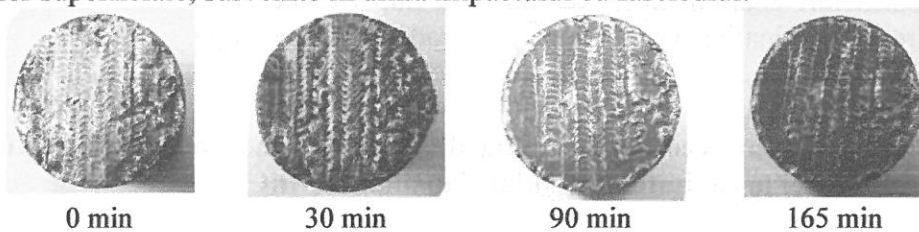


Fig.4.3. Degradarea suprafeței de atac la diferite intervale de timp

Curbele caracteristice fig.4.4 și 4.5, scot în evidență o micșorare a valorii vitezei de pătrundere a eroziunii comparativ, cu strea recoaptă, și o stabilizare a acesteia la valori maxime, alură caracteristică materialelor cu duritate ridicată.

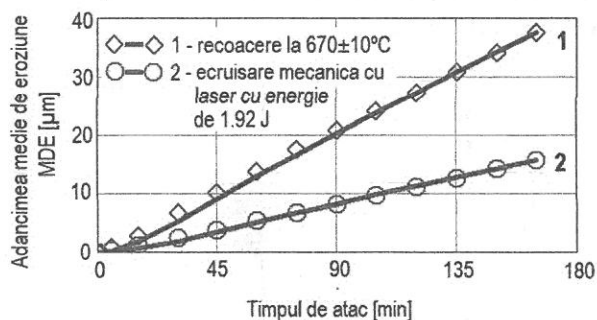


Fig.4.4. Variația adâncimii medii de eroziune cu timpul de atac

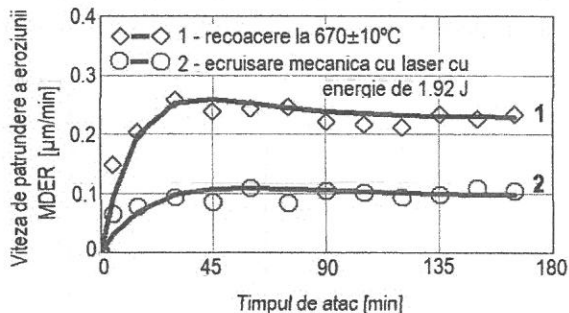


Fig.4.5. Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu timpul de atac

Rapoartele adâncimilor medii cumulate de pătrundere a eroziunii cavitaționale MDE, după cele 165 minute de atac, respectiv ale vitezelor MDER_s, ale celor două tipuri de tratamente, arată că suprafața ecrusată are o rezistență de circa 2,4 ori mai mare decât cea

obținută prin tratamentul de recoacere.

Aceste beneficii se observă și din histograma alăturată fig.4.6, în care sunt comparați principalii parametri caracteristici ai rezistenței la cavitație MDE și R_{cav}, pentru tratamentele descrise anterior, cu cei ai oțelului etalon 41Cr4.

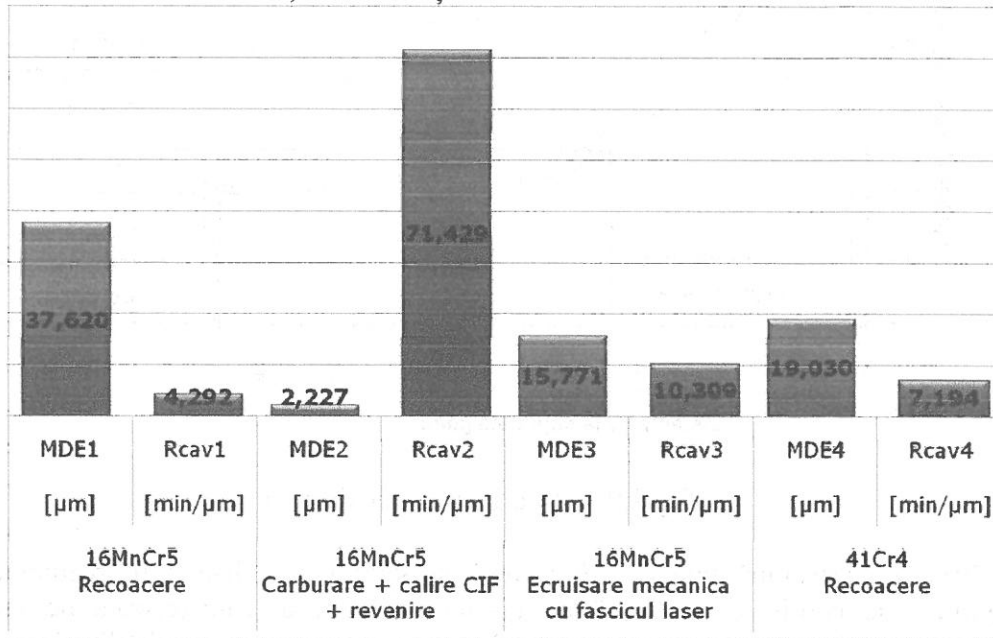


Fig.4.6. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat

Din analiza histogramei din fig.4.6 reiese că prin ecrusare mecanică cu fascicul laser, oțelul 16MnCr5 beneficiază de o creșterea rezistenței la cavitație de cca. 2,4 ori comparativ cu starea recoaptă, respectiv cu cca 43 % comparativ cu cea a oțelului etalon 41Cr4. Apreciem că acest spor este cauzat de creșterea duriității stratului ecrusat.

Din imaginile microscopice, fig.4.7 și 4.8, se remarcă degradarea accentuată a structurii recoapte, prezența structurii deformate la suprafața materialului, și faptul că stratul ecrusat nu a fost depășit în urma testelor cavitationale.

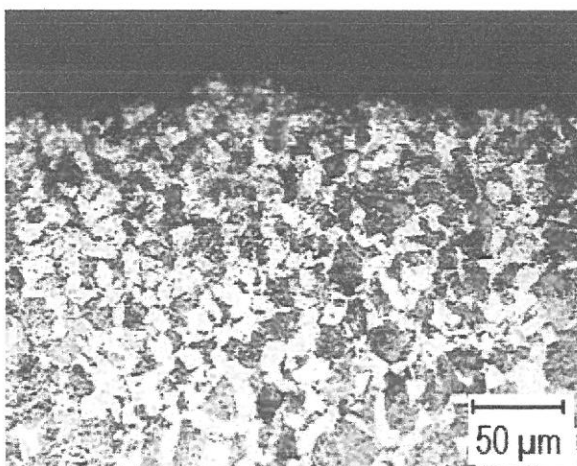


Fig.4.7. Microstructura oțelului 16MnCr5 în stare recoaptă x 200

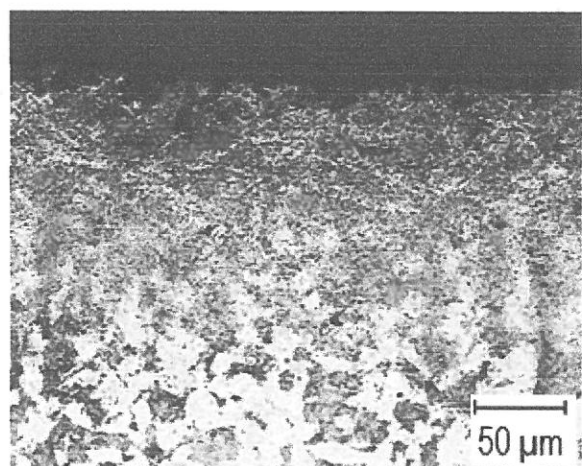


Fig.4.8. Microstructura oțelului 16MnCr5 ecrusat superficial cu fascicul laser x 200

Măsurătorile de duritate pe secțiunea stratului durificat (fig.4.9.), indică creșteri ale valorii în zona marginală de până la 560 - 597 daN/mm², care scad treptat până la valoarea duriității miezului, pe o adâncime de cca 0.2 mm.

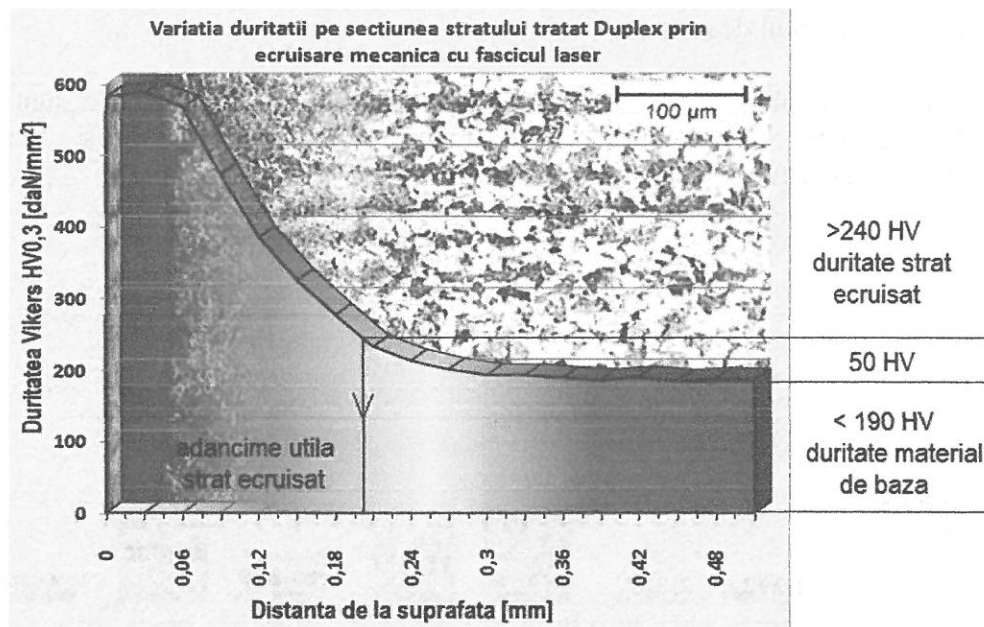


Fig.4.9. Curba gradient de duritate

Structura cristalină puternic deformată și saturată cu dislocații, rezultată în urma tratamentului de ecruisare mecanică cu fascicul laser, este caracterizată de un grad de fragmentare și finisare accentuat, care favorizează creșterea durității și a celorlalte caracteristici mecanice, ducând totodată la creșterea rezistenței la eroziune cavitațională.

5. Tratamentul termic de îmbunătățire urmată de nitrurare în mediu gazos și influența lor asupra rezistenței la cavitație a oțelului aliat 34CrNiMo6

Un alt procedeu de creștere a rezistenței la eroziune cavitațională, aplicat oțelul aliat 34CrNiMo6, este tratament Duplex de îmbunătățire [15, 17], urmat de tratamentul termochimic de nitrurare prin două tehnologi, și anume nitrurare în mediu gazos și cu fascicul laser.

Înainte prelucrărilor mecanice, materialul a fost supus unui tratament termic de recoacere, urmat de un tratament termic de îmbunătățire, conform ciclogramei din fig.5.1.

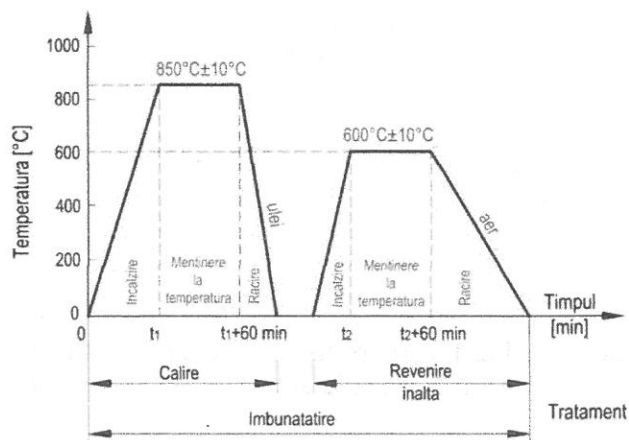


Fig.5.1. Ciclograma tratamentului termic de îmbunătățire

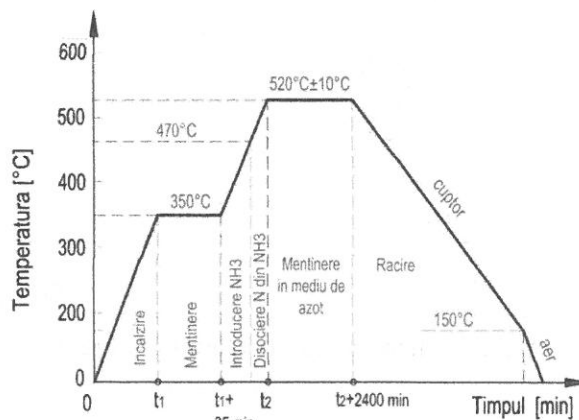


Fig.5.2. Ciclograma tratamentului termochimic de nitrurare în gaz

Ulterior prelucrărilor mecanice și rectificărilor la cote finale, o parte din probe au fost supuse unui tratament termochimic de nitrurare în mediu gazos, conform ciclogramei fig 5.2, în urma căruia în stratul superficial sau format nitruri simple și complexe, dispersate într-o soluție solidă îmbogățită în azot [15], ce împiedică deplasările atomilor de-a lungul planelor de alunecare ale rețelei cristaline și implicit, creșterea valorilor caracteristicilor mecanice, în special a durității.

Din analiza curbele caracteristice de cavitație, fig.5.3 și 5.4, după cele 165 minute de atac, se observă că valorile probelor nitrurate, sunt mult mai scăzute comparativ cu starea recoaptă și îmbunătățite, ceea ce înseamnă o rezistență mărită la eroziune cavitațională.

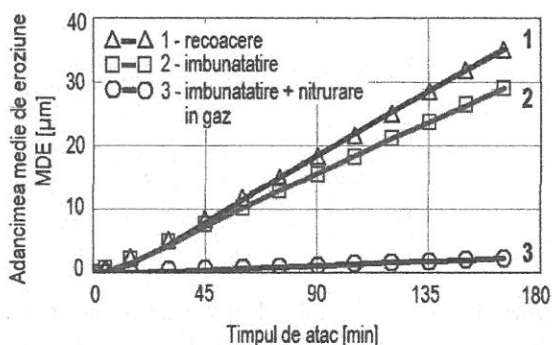


Fig.5.3. Variația adâncimii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

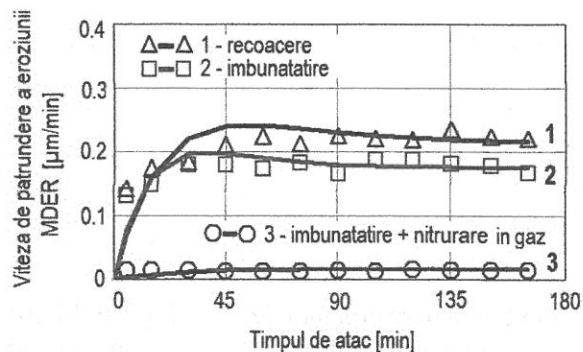


Fig.5.4. Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Pentru evidențierea beneficiilor tratamentelor realizate asupra creșterii rezistenței la eroziune cavitațională a oțelului 34CrNiMo6, dar și a stării sale recoapte, în histograma din fig.5.5, sunt comparate valorile adâncimii medii de eroziune MDE, determinate după 165 de minute și ale parametrului rezistență la cavitație cu valorile aferente oțelului etalon 41Cr4 (aflat de asemenea în stare recoaptă).

Se observă faptul că față de starea recoaptă, rezistența la cavitație crește cu cca. 23 % în urma tratamentului de îmbunătățire, respectiv de cca. 15,7 ori în urma tratamentului de nitrurare în mediu gazos.

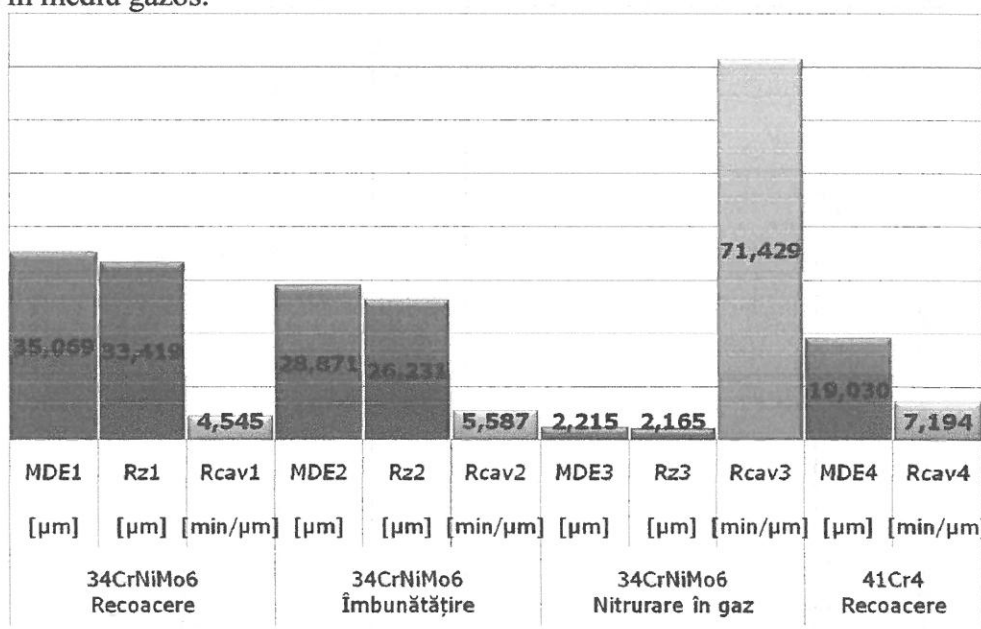


Fig.5.5. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat

Valorile apropiate ale parametrilor cavitaționali, adâncimea de pătrundere a eroziunii

MDE calculată și ale rugozității R_z măsurată la finalul testului de cavitație, certifică corectitudine determinărilor.

Investigațiile microstructurale, fig.5.6-5.8, evidențiază faptul că structura materialului aflat în stare recoaptă este constituită din ferită proeutectoidă și bainită [14, 15]; după îmbunătățire rezultă o structură sorbitică de revenire, formată din ferită aciculară și carburi globulare [14, 15], care asigură cel mai bun raport între rezistență, ductilitate și tenacitate.

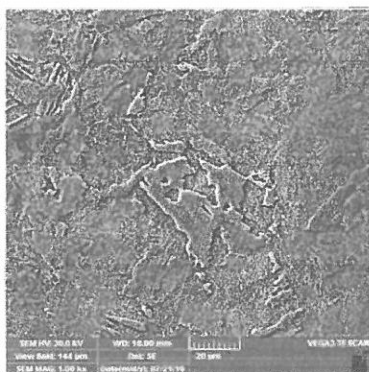


Fig.5.6. Microstructura de recoacere x500

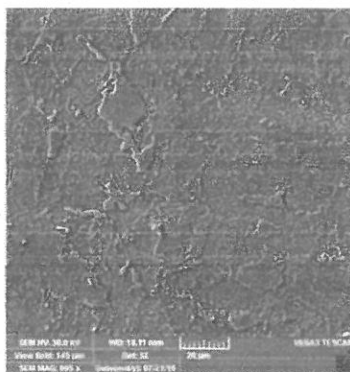


Fig.5.6. Microstructura de îmbunătățire x500

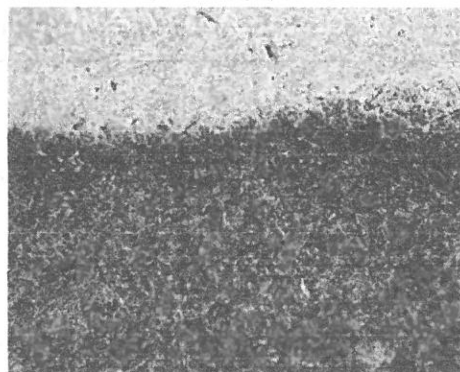


Fig.5.8. Microstructura stratului nitrurat în mediu gazos x500

La piesele nitrurate se observă prezența nitrurilor în stratul superficial, care îi conferă acestuia o creștere semnificativă de duritate [15].

În urma indexării, se constată faptul că probele recoapte și îmbunătățite (fig. 5.9), conțin pe lângă fier, aceleași elemente de aliere, variind proporțiile acestora în funcție de natura constituenților structurali prezenți în zona investigată.

La probele nitrurate (fig. 5.10), pe lângă elementele prezente în materialul de bază, se constată prezența azotului în straturile de suprafață, într-o pondere semnificativă.

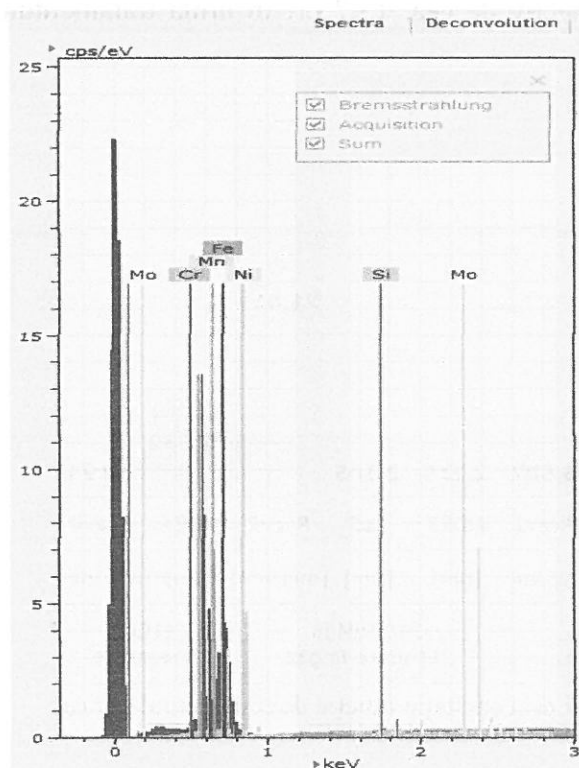


Fig.5.9. Spectrele de dispersie ale probelor îmbunătățite

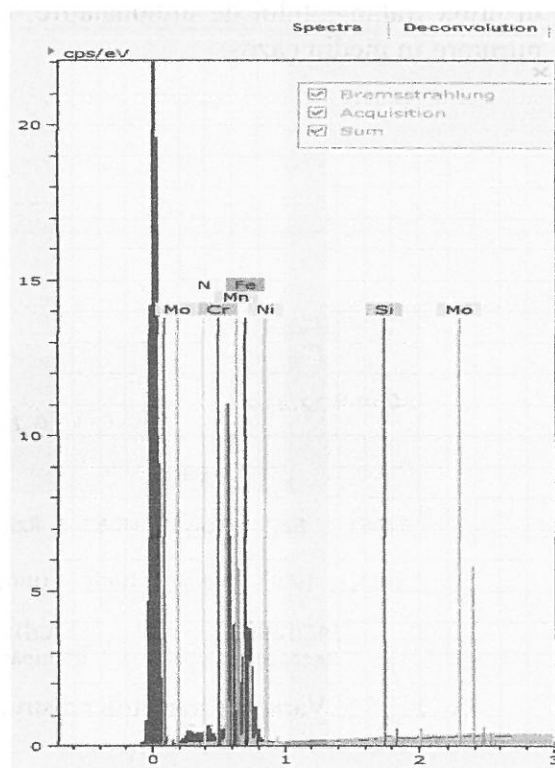


Fig.5.10. Spectrele de dispersie ale probei nitrurate

Analizele de difracție ale probelor, scote în evidență doar prezența feritei în structura oțelului aflat în stare recoaptă și îmbunătățită (fig.5.11.a), respectiv prezența nitruilor de tip Fe_3N , Fe_4N în structura materialului tratat Duplex (fig.5.11.b), confirmă faptul că tratamentul de niturare s-a efectuat în mod corespunzător.

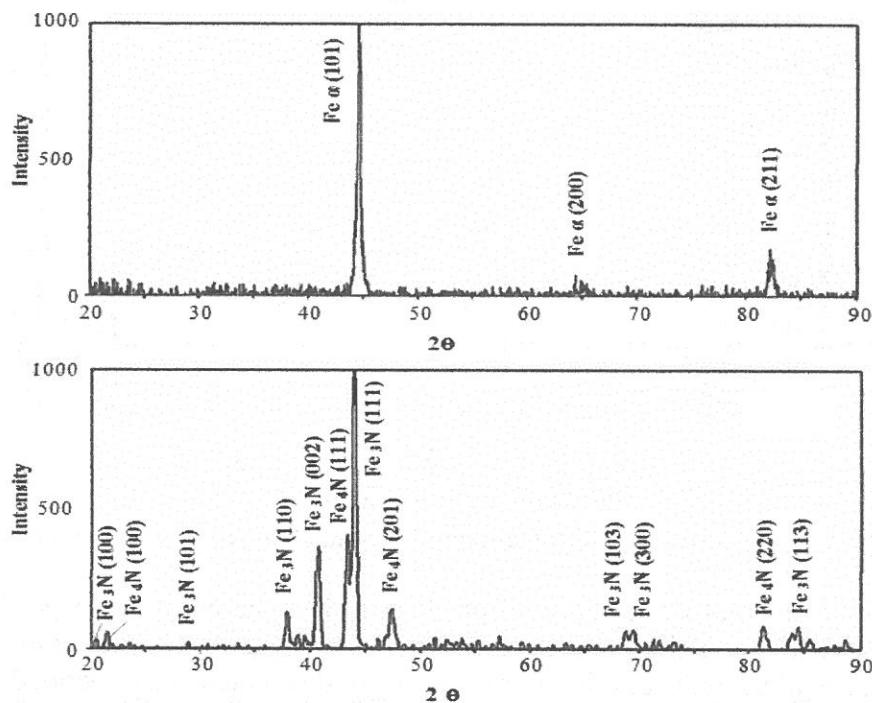


Fig.5.11. Difracție cu raze X: a-probe în stare recoaptă și îmbunătățită; b-probe nitrurate în mediu gazos.

Topografiile suprafețelor cavitate, fig.5.12-5.14, evidențiază faptul că la probele recoapte, intensitatea fenomenului de degradare a suprafeței este maximă, insulele de ferită proeutectoidă fiind atacate preferențial prin microfisurare urmată de expulzarea grăunților cristalini [3]. O situație asemănătoare din punct de vedere calitativ apare și la probele îmbunătățite, în sensul că inițierea fisurilor se produce tot în zonele de ferită, constituent moale și plastic, cu slabe caracteristici de rezistență mecanică.

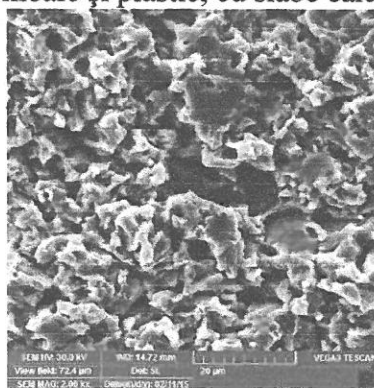


Fig.5.12. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor recoapte x2000

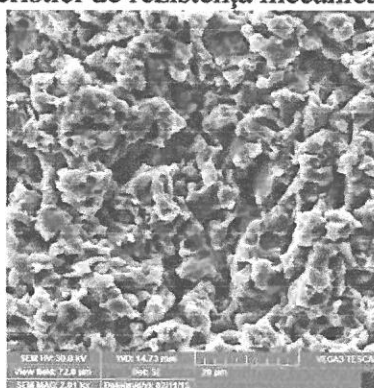


Fig.5.13. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor îmbunătățite x2000

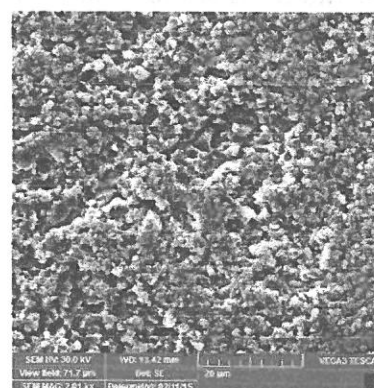


Fig.5.14. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor nitrurate x2000

La probele tratate Duplex, amorsele de fisurare sunt determinate de particulele de nitru și de limitele de separare dintre acestea, precum și de limitele de separație dintre grăunții de ferită aliată cu azot. Microstructura cu duritate mare a stratului marginal provoacă

o uzură mică și uniformă, cu ciupituri fine, fără apariția de cratere adânci.

Măsurătorile de duritate pe adâncimea stratului nitrurat, indică creșteri ale valorii acesteia în zona marginală de până la cca. 870 daN/mm^2 , acestea urmând să scadă treptat spre interiorul piesei, pe o adâncimea de cca. $0,38 \text{ mm}$.

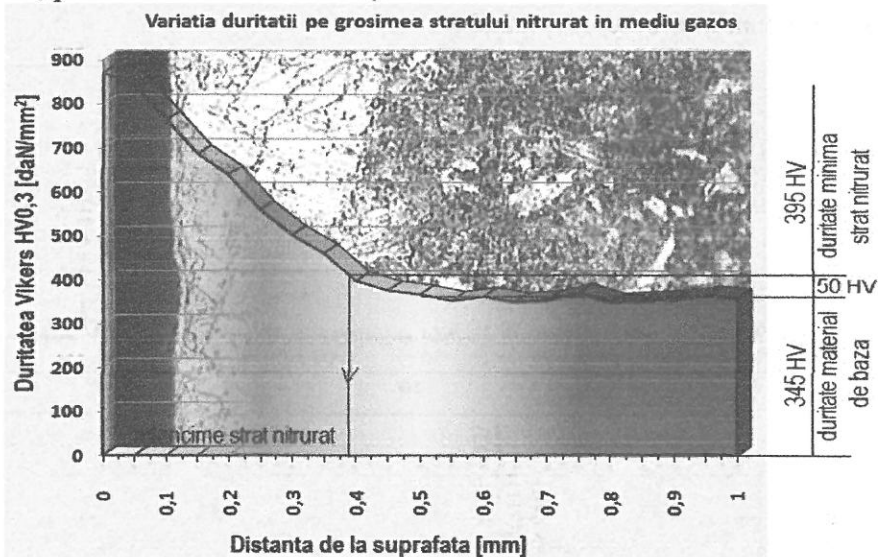


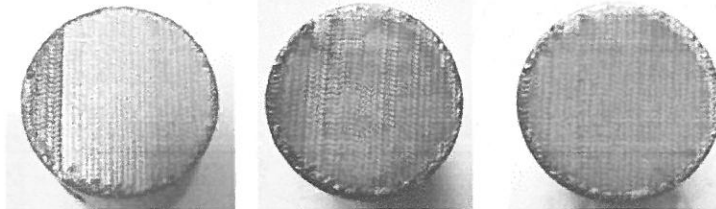
Fig.5.24. Variația durității pe secțiunea stratului tratat Duplex prin nitrurare în mediu gazos.

Deși tratamentul de nitrurare implică costuri suplimentare, este pe deplin justificat datorită prelungirii duratei de viață a elementelor echipamentelor hidraulice ce lucrează în condiții de cavitație, a reducerii timpilor și costurilor de mentenanță în perioada de exploatare.

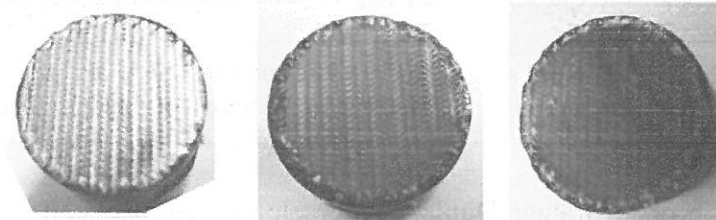
6. Tratamentul termic de îmbunătățire urmată de nitrurare cu fascicul laser și influența lor asupra rezistenței la cavitație a oțelului aliat 34CrNiMo6

Cel de-al doilea procedeu de nitrurare cu fascicul laser [6, 7, 13, 15], sa realizat pe aceeași instalație marca Triumph HL 124, și constă din bombardarea suprafeței cu un fascicul laser pulsator, la trei regimuri de putere a impulsului, și anume 240W, 180W, 120W, într-un mediu de azot pur. Sub acțiunea razei laser, stratul superficial de metal s-a topit pe o anumită adâncime, permitand difuzia accelerată a azotului în masa de topitură și formarea de nitruți prin aliere cu Fe și celelalte elemente de aliere [6, 13, 15]. Din imagini se constată aspectul vălurit al suprafețelor rezultate în urma impactului cu raza laser.

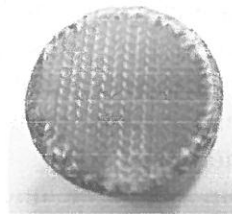
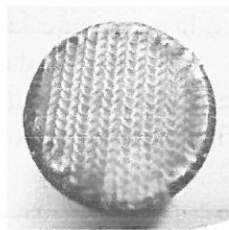
Proba
nitrurată cu
fascicul laser
la P=120 W



Proba
nitrurată cu
fascicul laser
la P=180 W



Proba
niturată cu
fascicul laser
la P=240 W



Timp

0 min

90 min

165 min

Fig.6.2. Suprafețe tratate prin niturare cu fascicul laser la trei regimuri de putere, supuse la cavitație, la diferite intervale de timp

Curbele caracteristice MDE(t), MDER(t) arată că prin niturare în cu fascicul laser, se realizează o creștere substanțială a rezistenței la cavitație, față de cea a probelor îmbunătățite, proporțională cu puterea fascicului.

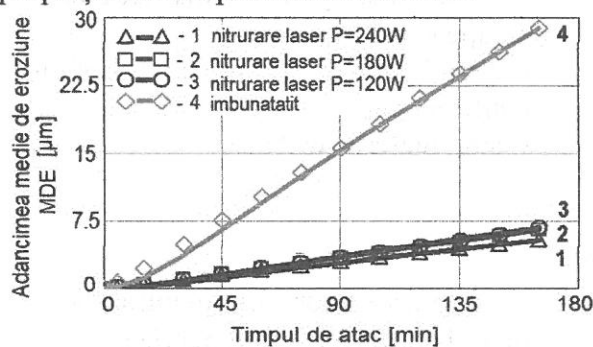


Fig.6.2. Variația pierderilor masice cumulate cu durata cavitației

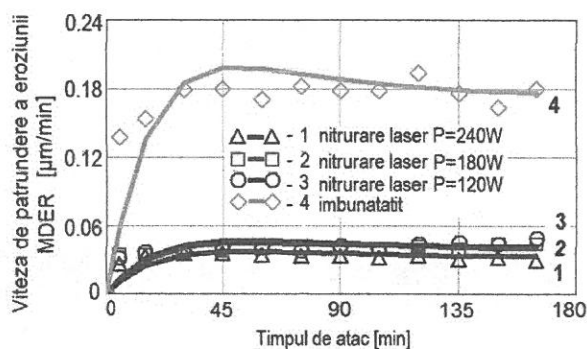


Fig.6.3. Variația vitezei de eroziune cu durata cavitației

Dintre cele trei regimuri de niturare laser, cea mai mare rezistență o conferă cea realizată la o putere P= 240 W.

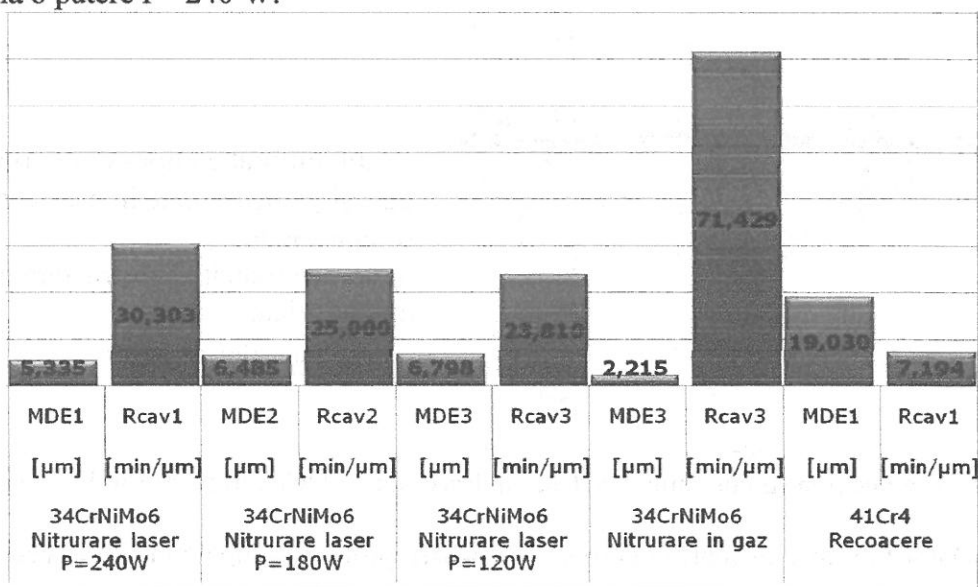


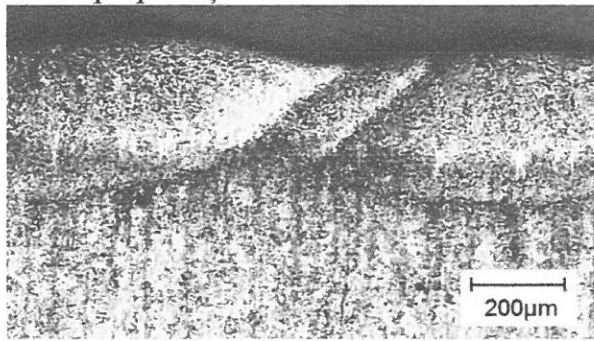
Fig.6.4. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat.

În histograma din fig.6.4. este realizată compararea principalilor parametri cavitaționali, recomandați de normele ASTM G32-2010 și folosiți în evaluare de laboratorul nostru de cavitație, pentru toate procedurile de niturare în gaz, cu cei ai oțelului de referință 41Cr4, în stare recoaptă.

Din imagine se observă faptul ca rezistența la cavitație a probelor tratate laser, cât și a celor niturate în gaz, au valori mai mari decât cele ale oțelului etalon 41Cr4. Deși procedeul

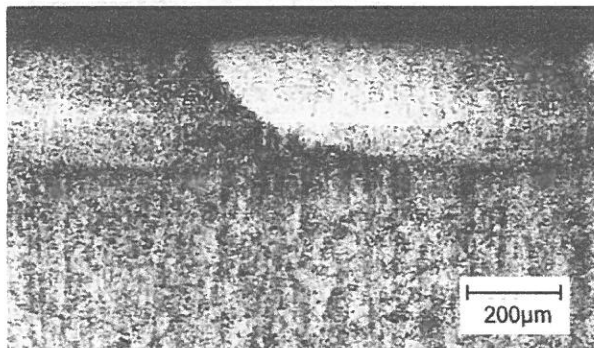
de nitrurare cu laser, conduce la rezistențe la cavitație, substanțial mai mici, decât nitrurarea clasică în mediu gazos, ea este recomandată datorită unui cost redus și a perioadei de realizare a tratamentului mult mai mici (cca. 3 min în cazul nitrurării laser, comparativ cu cca. 40 ore în cazul nitrurării în mediu gazos). În plus tratamentul poate fi introdus într-un ciclu de automatizare.

Din imaginile microscopice se observă că toate cele trei regimuri au o zonă de topitură, constituită din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α , urmată de o zonă de trecere cu structură bainito-martensitică, adiacentă stratului topit, formată datorită proprietății de autocălire a materialului la viteze critice relativ mici [15].



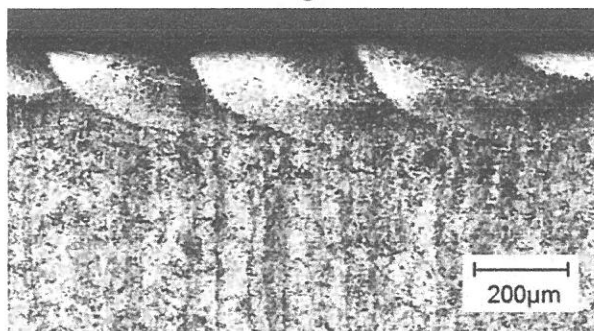
-a-

- <- strat nitrurat compus din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α ;
- <- strat de tranziție cu structură bainito-martensitică;
- <- strat material de bază.



-b-

- <- strat nitrurat compus din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α ;
- <- strat de tranziție cu structură bainito-martensitică;
- <- strat material de bază.



-c-

- <- strat nitrurat compus din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α ;
- <- strat de tranziție cu structură bainito-martensitică;
- <- strat material de bază.

Fig.6.5. Secțiune prin stratul nitrurat cu fascicul laser: a) la $P = 240W$, b) la $P = 180 W$, c) la $P=120 W$,

Datorită vitezelor mari la care se desfășoară procesul, după zona de trecere materialul rămâne neafectat.

Curba gradient de duritate, fig.6.6, indică creșteri la valori de $790 - 810 \text{ daN/mm}^2$ în zona marginală, acestea scăzând treptat până la valoarea materialului de bază, pe o adâncimea de cca. $0,67 \text{ mm}$.

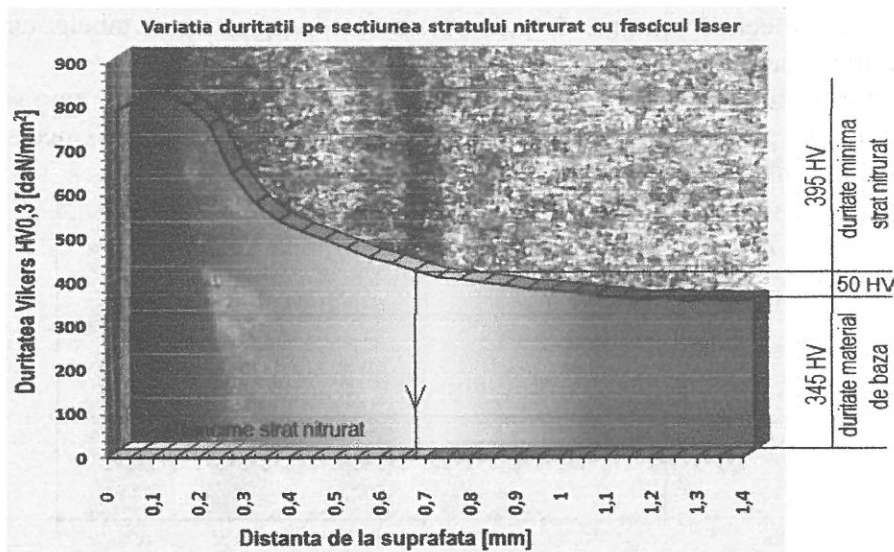


Fig.6.16. Variația durtății pe secțiunea stratului nitrurat cu fascicul laser la puterea $P=180$ W.

7. Propunerea parametrului de rugozitate R_z în evaluarea rezistenței materialelor la eroziunea prin cavitație

Concluziile obținute de colectivul laboratorului de cavitație, al Universității Politehnica Timișoara, în urma nenumăratelor încercări, pe o mulțime de materiale, au condus la ideea că între parametrul MDE (recomandat de normele ASTM G32-2010) și rugozitatea măsurată R_z a materialului există o dependență, care poate permite folosirea lui R_z în evaluarea comportării, respectiv a rezistenței materialului la eroziunea cavitației.

Astfel datorită numărului mare de măsurători (270), s-au ales trei materiale din categorii diferite pe care s-au realizat măsurători de rugozitate, și anume:

- oțelul aliat 16MnCr5 – în stare recoaptă și carburată, cercetat în cadrul acestei teze;
- bronzul AMPCO M45 supus tratamentului termic de călire volumică [18];
- oțelul aliat 42CrMo4 - în stare recoaptă, folosit și el în fabricarea componentelor de aparate hidraulice.

Pentru fiecare probă, suprafața cavitată a fost împărțită în 9 zone pătrate, conform fig.7.1, pe care s-au măsurat parametrii rugozității, pe două direcții perpendiculare, (în total 18 măsurători).

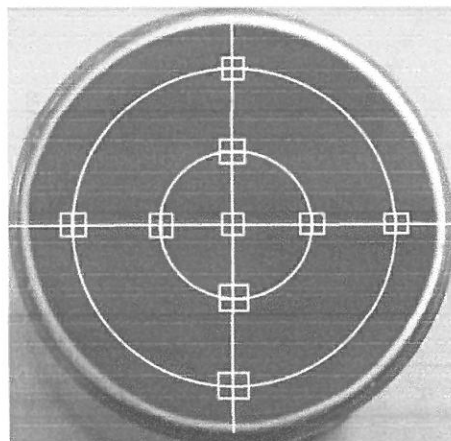


Fig.7.1. Schema celor 18 zone de măsurare a parametrilor rugozității R_a , R_z și R_t

Valori parametrului R_z , la diferite intervale de testare (și anume 0, 30, 75, 120 și 165

de minute) în toate cele 18 puncte de măsură, au fost înregistrate în tabele, calculându-se și valorile medii ale acestora.

În baza acestor măsurători, s-au realizat histogramele din fig.7.2.-7.4, în care sunt comparate valorile medii ale parametrului rugozității, R_z , cu valorile adâncimii medii de eroziune, calculate ca medie ale celor trei probe testate.

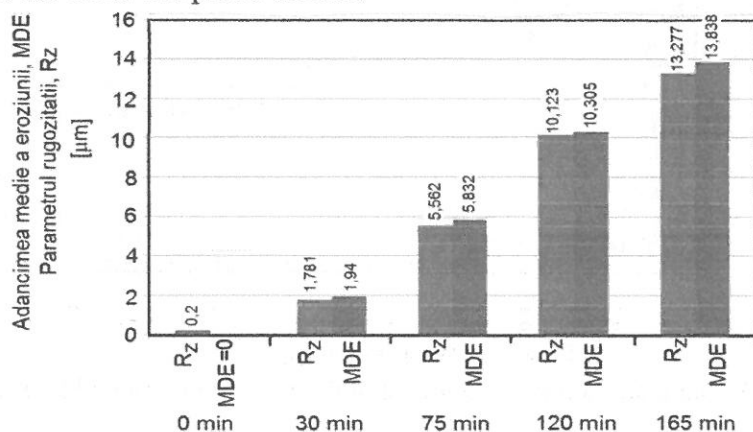


Fig.7.2. Compararea parametrului MDE cu al rugozității R_z (oțelul 16MnCr5 –stare recoaptă și carburată)

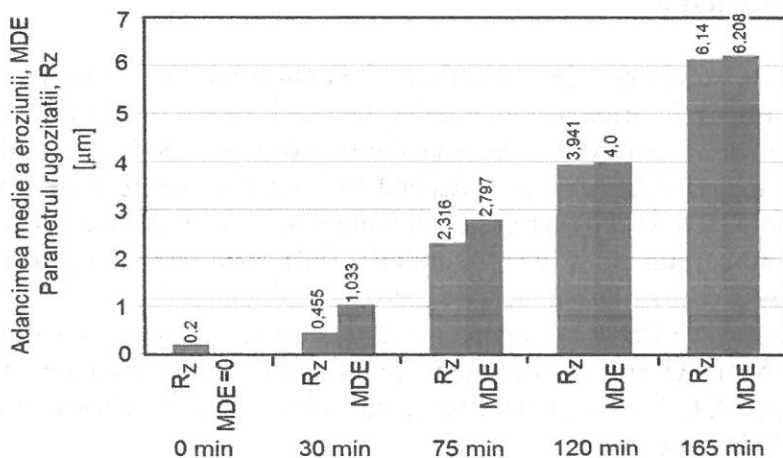


Fig.7.3. Compararea parametrului MDE cu al rugozității R_z (Bronz AMPCO M45–călire și revenire)

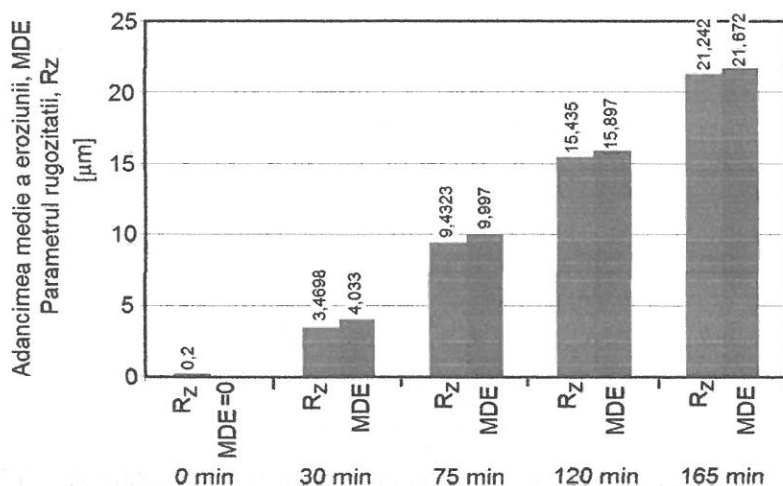


Fig.7.4. Compararea parametrului MDE cu al rugozității R_z (oțelul 42CrMo4 –stare recoaptă)

În histogramele din figurile alăturate sunt comparate valorile medii ale rugozității R_z ,

cu valorile adâncimii medii de eroziune MDE, calculate ca medie ale celor trei probe testate, de unde se constată că, indiferent de durata la care facem referire, valoarea parametrului R_z este net inferioară valorii parametrului MDE (care sunt afectate de îndepărtarea prafului și asperităților din primele minute de atac).

De asemenea, se constată că, pe măsura creșterii duratei de cavitație, diferențele dintre MDE și R_z devin tot mai mici, datorită durificării stratului superficial, sub impactul mecanic cu microjeturile și undele de șoc.

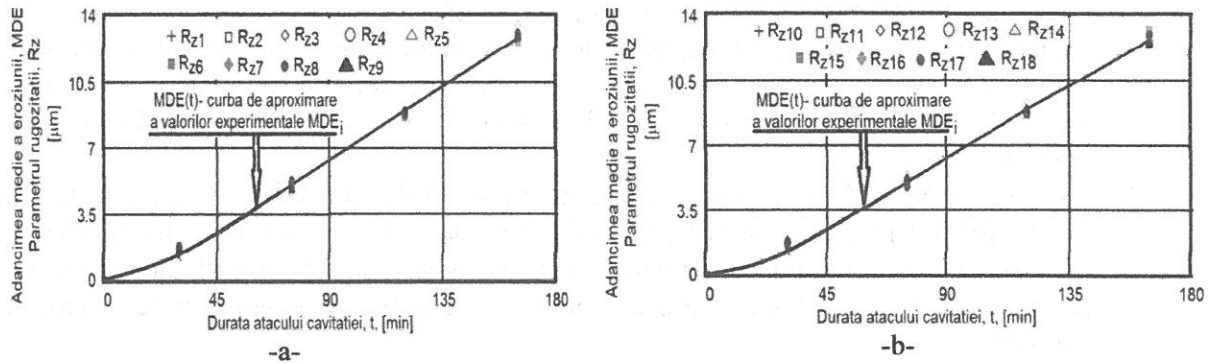


Fig.7.5. Dispersia parametrului R_z față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune, oțelul 16MnCr5 recopt și carburat: a) valorile lui R_z de la 1 la 9; b) valorile lui R_z de la 10 la 18

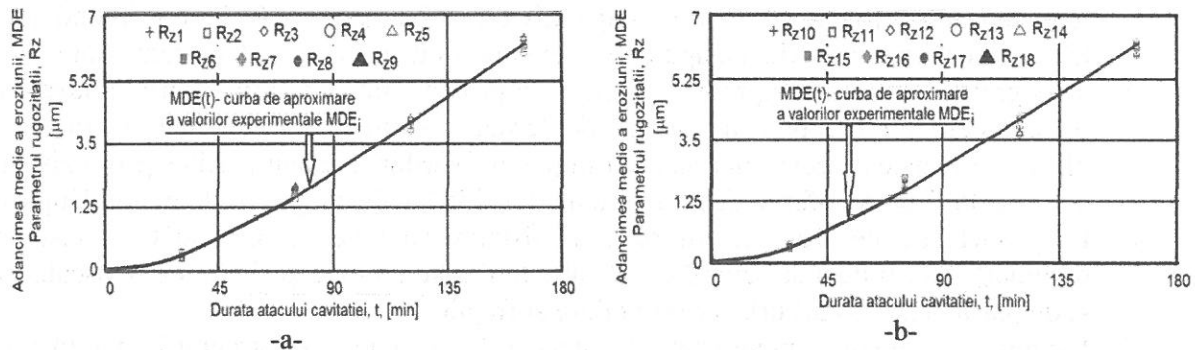


Fig.7.6. Dispersia parametrului R_z față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune, bronz AMPCO45-TT: a) valorile lui R_z de la 1 la 9; b) valorile lui R_z de la 10 la 18

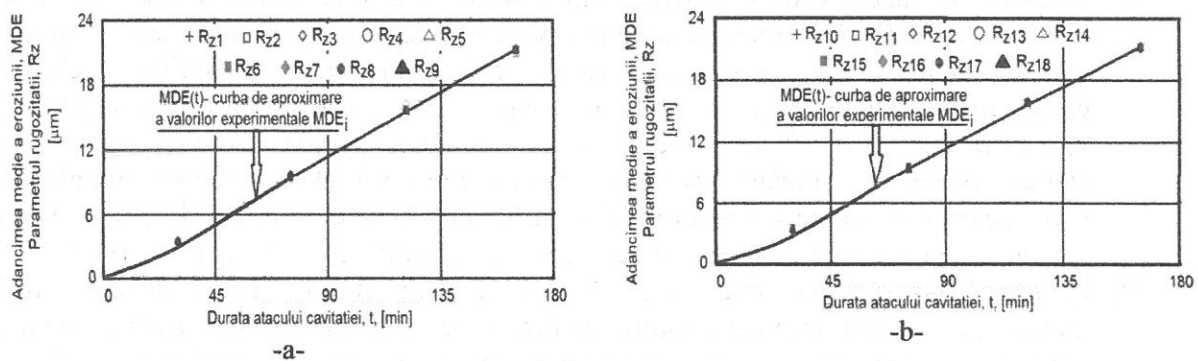


Fig.7.7. Dispersia parametrului R_z față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune, oțelul 42CrMo4 stare recoaptă: a) valorile lui R_z de la 1 la 9; b) valorile lui R_z de la 10 la 18

În diagramele din fig.7.5...7.7, se prezintă dispersia valorilor parametrului R_z față de curbele de mediere, construite cu relațiile statistice, pentru fiecare material. Se constată că aceste dispersii sunt foarte reduse, similar valorilor experimentale MDE_i, obținute pentru cele trei probe, ceea ce certifică corectitudinea metodei. Prin urmare, parametrul R_z reprezintă o variantă foarte bună de evaluare a degradării materialului la eroziunea cavitației.

CAP 8. Concluzii finale și contribuții originale. Noi direcții de cercetare.

Concluzii finale și contribuții originale

1. Aprofundarea studiilor cu privire la cauzele care determină cavitația în instalațiile hidraulice de acționare, în special în aparatele de comandă, distribuție și reglare, și găsirea de soluții pentru asigurarea bunei funcționări dinamice este o necesitate, atât din prisma siguranței în exploatare, cât și din punct de vedere economic, aparatura hidraulică fiind înlocuită integral în urma deteriorării.
2. Materialele cercetate sunt destinate fabricării pieselor mobile din aparatura hidraulică, de comandă, distribuție și reglare, care, la numite regimuri de funcționare, sunt supuse atacului distructiv al microjeturilor și undelor de șoc create prin implozia bulelor cavitaționale.
3. La oțelul 16MnCr5, prin aplicarea tratamentului Duplex de carburare, urmată de călire de suprafață prin curenți induși de înaltă frecvență și de revenire la temperatură joasă, favorizează obținerea unei microstructuri martensitice fine, în stratul superficial, pe o adâncime de cca 0,9-1 mm, care determină o creștere a rezistenței la degradare prin cavitație.
4. În urma tratamentului Duplex de carburare, urmată de călire de suprafață prin curenți induși de înaltă frecvență și de revenire la temperatură joasă, se obține o creștere a rezistenței la eroziune prin cavitație de cca. 17 ori mai mare comparativ cu starea recoaptă, respectiv cu cca 10 ori comparativ cu oțelul etalon 41Cr4, contribuind astfel la creșterea duratei de viață a aparatului, în condiții de cavitație intens dezvoltată.
5. Topografiile tipice ale suprafeței cavitare, la probele tratate termic diferit, evidențiază o degradare preferențială a zonelor de ferită, constituent microstructural moale și plastic, o rezistență ceva mai mare la inițierea fisurilor în cazul perlitului și o rezistență maximă la fisurare, oferită de structura martensitică realizată prin tratamentul Duplex.
6. La probele tratate Duplex, amorsele de fisurare sunt determinate atât de austenita reziduală, constituent structural cu o slabă limită de curgere și limită de oboseală, cât și de particulele de carburi, care sunt dure și fragile.
7. Urmare a înalțelor caracteristici de rezistență mecanică ale structurii martensitice, aspectul suprafeței cavitare este uniform, iar ruperea are un caracter fragil.
8. Tratamentul mecanic de durificare prin deformare la rece folosind fasciculul laser, conduce la o structură cristalină puternic deformată și saturată cu dislocații, cu un grad de fragmentare și finisare accentuat, care favorizează creșterea durității și a celorlalte caracteristici de rezistență mecanică. O asemenea stare structurală justifică reducerea vitezei de eroziune prin cavitație a oțelului 16MnCr5 de cca. 2.4 ori comparativ cu starea recoaptă. Totodată, această tehnică modernă de ingineria suprafețelor, favorizează o reducere a vitezei de eroziune prin cavitație de cca. 2.4 ori comparativ cu starea de recoacere, respectiv cu cca 43 % comparativ cu oțelul etalon 41Cr4.
9. La oțelul 34CrNiMo6, tratamentul Duplex de îmbunătățire, urmată de nitrurare în mediu gazos, deși implică costuri suplimentare, este pe deplin justificat datorită faptului că oferă cea mai mare creștere a rezistenței la eroziune cavitațională, de cca. 17,5 ori comparativ cu starea recoaptă, respectiv de cca 10 ori față de cea a oțelului etalon 41Cr4, datorată nitrurilor formate în stratul superficial, caracterizate de o duritate ridicată.
10. Varianta tehnologică de nitrurare cu fascicul laser, favorizează o creștere a rezistenței la eroziune prin cavitație de cca. 4,2...5,4 ori comparativ cu starea îmbunătățită, respectiv de cca 3,3..4.2 ori, comparativ cu starea recoaptă a oțelului etalon 41Cr4.
11. Creșterea puterii fasciculului laser se manifestă printr-o mărire a adâncimii stratului topit, iar odata cu mărire timpului de solidificare și de răcire a masei de topitură

menținută în mediu de azot, apare implicit o mărire a duratei de difuzie a azotului în straturile superficiale. Aceste fenomene justifică îmbunătățirea rezistenței la eroziune prin cavitație.

12. Parametrul rugozității Rz se poate folosi la evaluarea gradului de distrugere prin cavitație, fiind de ordin aproximativ egal cu adâncimea medie de pătrundere MDE, recomandată de normele ASTM. Avantajul utilizării lui Rz este că valoarea sa este mai apropiată de realitate, fiind obținută prin măsurători.

Noi direcții de cercetare

Plecând de la cercetările efectuate în cadrul prezentului program de doctorat, prin prisma rezultatelor obținute și prezentate în lucrare, se pot formula următoarele perspective:

- oportunități de îmbunătățire a rezistenței la cavitație a oțelurilor destinate construcției aparatului sistemelor hidraulice, prin utilizarea altor materiale, decât cele cercetate în prezenta lucrare;
- lărgirea bazei de date privind tratamente Duplex, prin noi combinații de tratamente, care pot fi aplicate oțelurilor utilizate la fabricarea aparatului sistemelor hidraulice, în vederea creșterii fiabilității și siguranței în exploatare;
- dezvoltarea de noi concepte de evaluare a rezistenței la eroziune prin cavitație;
- crearea unor clase de ierarhizare după rezistența la cavitația vibratoare folosind ca și criteriu valorile parametrului rugozității Rz.

BIBLIOGRAFIE-SELECTIVA

- [1] Anton I.: „Cavitația”, vol. I, Editura Academiei RSR, București, 1984
- [2] Anton I.: „Cavitația”, vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985
- [3] Bordeasu I.: „Eroziunea cavitațională a materialelor”, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [4] Bordeasu I., Popovici M.O., **Ghera C.**, Sălcianu L.C., Micu L.M., Podoleanu C.E., „Cavitation erosion behavior of the steel 17CrNiMo6”, Machine design, vol. 8, nr. 4, Ungaria, pp. 149-154, 2016
- [5] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Sălcianu L.C., **Ghera C.**, Micu L.M., Bădărău R., Iosif A., Pirvulescu L.D., Podoleanu C.E.: „A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion”, International Conference on Applied Science, vol. 163, 2017
- [6] Czerwinski F., „Thermochemical Treatment of Metals”, CanmetMATERIALS, Natural Resources Canada, Hamilton, Ontario, Canada, 2012
- [7] Da Silva F.J., a.o., „Cavitation erosion behavior of ion – nitrided 34CrAlNi7 steel with different microstructures”, Wear, Vol.304, Iss.1-2, pp. 183 – 190, 2013
- [8] Franc J.P., et al., „La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels”, Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995
- [9] 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, New Jersey, U.S.A., 1960
- [10] **Ghera C.**, Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M., „Improvement of cavitation erosion resistance of a low alloyed steel 16MnCr5 through work hardening”, METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Cehia, pp. 661-666, 2015
- [11] **Ghera C.**, Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M., „Effect of Heat Treatment on the Surfaces Topography Tested at the Cavitation Erosion from Steel 16MnCr5”, Advanced Materials Research, vol. 1111, pp. 85-90, July 2015
- [12] **Ghera C.**, Bordeasu I., Sălcianu L., Duma S.T., Katona S.E., Punga A., Micu L.M., Pascu L.F., „Considerations regarding the behavior to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in the manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution”, HIDRAULICAMagazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, vol. 1, pp. 25-31, 2015
- [13] **Ghera C.**, Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M., „Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel”, METAL 2016 - 25th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Cehia, pp. 706-711, 2016
- [14] Mitelea I., Tillmann W.: „Știința materialelor”, vol. I, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [15] Mitelea I., Tillmann W.: „Știința materialelor”, vol. II, Editura Politehnica, Timișoara, 2007
- [16] Mitelea I., **Ghera C.**, Bordeasu I., Crăciunescu C.M., „Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel”, International Journal of Materials Research, vol. 106, No. 4, pp. 391-397, April 2015
- [17] Mitelea I., **Ghera C.**, Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Assessment of cavitation erosion of gas-nitrided Cr-Ni-Mo steels”, Journal of Tribology ASME, (acceptată pentru publicare), 2017
- [18] Oancă O., „Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale”, Teza de doctorat, Timișoara, 2014
- [19] Steller J.K. Giren B.G.: „International Cavitation Erosion Test. Final Report”, Gdansk, ISSN 0239-9091, 2015
- [20] ***<https://www.youtube.com/watch?v=U-uUYCFDTrc> „Cavitation”, IET Institute for Energy Technology, HSR University of Applied Sciences Rapperswil, Switzerland