

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

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul INGINERIA MATERIALELOR
de către

ing. Cristian Ghera

Conducători științifici:	Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeășu
Referenți științifici:	Prof.univ.dr.ing. Ioan Vida Simiti Prof.univ.dr.ing. Brândușa Ghiban Prof.univ.dr.ing. Viorel Aurel Șerban
Ziua susținerii tezei:	03.07.2017

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|---|--|
| 1. Automatică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 2. Chimie | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 3. Energetică | 12. Ingineria sistemelor |
| 4. Ingineria Chimică | 13. Inginerie energetică |
| 5. Inginerie Civilă | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 6. Inginerie Electrică | 15. Ingineria materialelor |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 16. Inginerie și Management |
| 8. Inginerie Industrială | 17. Arhitectură |
| 9. Inginerie Mecanică | 18. Inginerie civilă și instalații |

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, 2017

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

Teza de doctorat intitulată **„Rolul tratamentelor duplex în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor pentru aparatura sistemelor hidraulice”** fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Ingineria materialelor și fabricației al Universității Politehnica Timișoara și reprezintă o sinteză a rezultatelor teoretice și experimentale obținute de-a lungul întregii activități de cercetare.

Obiectivul principal vizat îl constituie îmbunătățirea comportării la eroziune cavitațională a componentelor mobile din aparatura sistemelor hidraulice de comandă, distribuție și control, realizate din oțeluri aliate Cr-Ni-Mo, respectiv oțelului slab aliate Cr- Mn, des utilizate la construcția acestora.

Probele pentru testare au fost realizate din oțeluri caracteristice celor două grupe, și anume: o parte, din oțel slab aliat 16MnCr5, respectiv o parte din oțel aliat 34CrNiMo6, materiale care au fost supuse unor tratamente tip Duplex.

Tratamentele Duplex au constat din combinații de tratamente termice, termochimice sau mecanice, care au avut ca scop îmbunătățirea caracteristicilor chimice, mecanice și structurale ale materialelor, care influențează în mod direct comportamentul cavitațional al acestora.

Tratamentele au fost efectuate, o parte în Laboratorul de Ingineria Materialelor al Universității Politehnica din Timișoara, iar altă parte prin colaborare cu institute și firme de profil din Timișoara și din țară.

Testele cavitaționale s-au efectuat pe un aparat vibrator cu cristale piezoceramice, construit conform normelor internaționale ASTM G32-2010, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara. Cercetările experimentale au fost efectuate pe seturi de câte trei probe, corespunzătoare fiecărei etape de tratament, și investigate ulterior pe aparatura adecvată, prezentă în cadrul laboratoarelor de cavitație și de ingineria materialelor.

Astfel la finalizarea cercetărilor am reușit să obțin rezultate favorabile, care sper să fie folosite cu succes de către firmele producătoare, pentru creșterea fiabilității și reducerea costurilor de producție și de mentenanță a aparaturii mai sus amintite.

Cu această ocazie, doresc să mulțumesc conducătorilor mei științifici, dl. prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea și dl. prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeasu, care m-au acceptat ca student doctorand, sprijinit, ajutat și îndrumat, cu un profesionalism excepțional și un deosebit simț pedagogic, de la începutul studiilor doctorale până la finalizarea tezei.

Mulțumesc colegilor din Colectivul de Ingineria materialelor și din Colectivul de Mașini Hidraulice din Facultatea de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara, care m-au ajutat în anii petrecuți aici, precum și colaboratorilor din cadrul ISIM Timișoara.

Mulțumesc colegilor de serviciu pentru îngăduința de care au dat dovadă și nu în ultimul rând, doresc să mulțumesc familiei, în special fiului meu, care de multe ori nu a înțeles ce caută tata la școală la vârsta asta.

Timișoara, iulie 2017

ing. Cristian Ghera

Ghera, Cristian

Rolul tratamentelor duplex în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor pentru aparatura sistemelor hidraulice

Teze de doctorat ale UPT, Seria 15, Nr. 23, Editura Politehnica, 2017, 138 pagini
112 figuri, 11 tabele, 24 formule și relații.

ISSN:2285-1720

ISSN-L:2285-1720

ISBN:978-606-35-0154-8

Cuvinte cheie: cavitație vibratoare, eroziune, tratamente Duplex, călire, nitrurare

Rezumat,

În prezenta lucrare sunt reliefate comportarea și rezistența la eroziune cavitațională a oțelurilor slab aliate Cr-Mn, respectiv a oțelurilor aliate Cr-Ni-Mo, destinate fabricării componentelor mobile din aparatura sistemelor hidraulice de comandă, distribuție și control.

Unul din materialele utilizate pentru cercetare este oțelul slab aliat 16MnCr5, supus la două tratamente Duplex.

Primul tratament constă dintr-o recoacere pentru înmuiere, urmat de unul termochimic de carburare în mediu gazos și călire ulterioară prin curenți de înaltă frecvență; al doilea tratament constă dintr-un tratament termic preliminar de recoacere, urmat de ecrusare mecanică cu fascicul laser.

Al doilea material cercetat este oțelul aliat 34CrNiMo6, care a fost supus tratamentului termic de recoacere și îmbunătățire, urmat de tratamentul termochimic de nitrurare prin două procedee: nitrurare clasică în mediu gazos, respectiv nitrurare cu fascicul laser la trei regimuri de putere.

Testarea materialelor s-a efectuat pe un aparat vibrator cu cristale piezoceramice, din rezultatele cărora s-au determinat curbele specifice ce caracterizează comportamentul acestora la eroziune cavitațională. Investigațiile de laborator pun în evidență modificările chimice și microstructurale produse, prin aplicarea diferitelor tipuri de tratamente Duplex precum și mecanismele de distrugere specifice fenomenului cavitațional.

Concluziile rezultate arată faptul că prin tratamentele Duplex aplicate se îmbunătățește substanțial rezistența la cavitație, contribuind astfel la creșterea fiabilității, la reducerea costurilor de mentenanță și exploatare.

CUPRINS

INTRODUCERE.....	7
1. Stadiul actual al cercetărilor privind cavitația în sistemele hidraulice de acționare.....	9
1.1. Structura sistemului hidraulic de acționare.....	9
1.2. Considerații generale privind cavitația și efectele sale	13
1.3. Documentare asupra cavitației în aparatura hidraulică	15
1.4. Documentare privind comportarea și rezistența la cavitație a unor oțeluri destinate pieselor mobile ale aparatelor hidraulice de comandă, distribuție și reglare	20
1.5. Materiale utilizate în construcția componentelor sistemelor hidraulice de acționare, supuse solicitării cavitaționale	23
1.6. Tratamente aplicate setarelor aparatelor hidraulice.....	26
1.7. Concluzii.....	29
1.8. Obiectivele tezei de doctorat.....	30
2. Materiale cercetate. Aparatură de laborator utilizată. Metode de analiză și evaluare.....	31
2.1. Materiale cercetate	31
2.1.1. Oțelul slab aliat 16MnCr5.....	31
2.1.2. Oțelul slab aliat 34CrNiMo6.....	32
2.1.3. Oțelul aliat 41Cr4 – oțel etalon	34
2.2. Aparatura de laborator și tehnici de investigare.....	35
2.2.1. Investigații cavitaționale.....	35
2.2.2. Investigații microstructurale.....	37
2.2.3. Determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X.....	38
2.2.4. Determinarea fazelor existente prin analize de difracție cu raze X	38
2.2.5. Măsurarea rugozității suprafețelor atacate cavitațional.....	38
2.2.6. Investigații sclerometrice.....	39
2.3. Metode de evaluare și de predicție a eroziunii produse prin cavitație	40
2.3.1. Evaluarea pe baza curbilor caracteristice.....	40
2.3.2. Evaluarea pe baza energiei de deformare necesară declanșării curgerii materialului.....	43
2.3.3. Evaluarea pe baza caracteristicilor materialului.....	44
2.3.4. Evaluarea pe baza parametrului rugozitate.....	45
2.4. Concluzii.....	45
3. Rezistența la cavitație a oțelurilor slab aliate tratate duplex prin carburare urmată de călire de suprafață prin inducție.....	46
3.1. Tratamente aplicate.....	46
3.2. Teste de cavitație.....	49
3.2.1. Curbe caracteristice.....	49
3.2.2. Măsurători de rugozitate.....	56
3.2.3. Corelația adâncimea de pătrundere a eroziunii – rezistența la cavitație – rugozitate.....	58
3.3. Investigații microstructurale.....	60
3.3.1. Microscopie optică.....	60
3.3.2. Microscopie electronică cu baleiaj, topografia suprafețelor	62
3.3.3. Determinarea fazelor existente prin analize de difracția cu raze X	63
3.3.4. Examinari sclerometrice.....	64
3.4. Concluzii	66

4. Rolul tratamentului de recoacere urmată de ecruisare mecanică cu fascicul laser în creșterea rezistenței la cavitație a oțelului slab aliat 16MnCr5	67
4.1. Tratamente aplicate.....	67
4.2. Teste de cavitație.....	69
4.2.1. Curbe caracteristice.....	69
4.2.2. Compararea cu materiale de referință.....	72
4.3. Investigații microstructurale.....	73
4.3.1. Microscopie optică.....	73
4.3.2. Examinări sclerometrice.....	75
4.4. Concluzii.....	76
5. Tratamentul termic de îmbunătățire urmată de nitrurare în mediu gazos și influența lor asupra rezistenței la cavitație a oțelului aliat 34CrNiMo6	77
5.1. Tratamentele aplicate.....	77
5.2. Teste de cavitație.....	80
5.2.1. Curbele caracteristice.....	80
5.2.2. Compararea cu materiale de referință.....	86
5.3. Investigații microstructurale	87
5.3.1. Microscopie optică	87
5.3.2. Determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X.....	88
5.3.3. Determinarea fazelor existente prin analize de difracție cu raze X	90
5.3.4. Microscopie electronică cu baleiaj, topografia suprafețelor.....	92
5.3.5. Examinări sclerometrice.....	93
5.4. Concluzii.....	94
6. Tratamentul termic de îmbunătățire urmată de nitrurare cu fascicul laser și influența lor asupra rezistenței la cavitație a oțelului aliat 34CrNiMo6	96
6.1. Tratamente aplicate.....	96
6.2. Teste de cavitație.....	97
6.2.1. Curbe caracteristice.....	97
6.3. Investigații microstructurale.....	105
6.3.1. Microscopie optică	105
6.3.2. Examinări sclerometrice	106
6.4. Concluzii.....	107
7. Propunerea parametrului de rugozitate R_z în evaluarea rezistenței materialelor la eroziunea prin cavitație	108
7.1. Introducere.....	108
7.2. Materiale analizate.....	108
7.3. Procedura experimentală. Rezultate și discuții.....	109
7.4. Concluzii.....	118
8. Concluzii finale și contribuții originale. Noi direcții de cercetare	119
8.1. Concluzii finale și contribuții originale.....	119
8.2. Noi direcții de cercetare.....	120
Lista publicațiilor rezultate în urma cercetării doctorale, publicate sau acceptate spre publicare, sub afiliere UPT	121
BIBLIOGRAFIE	128

INTRODUCERE

Echipamentele hidraulice de acționare, utilizate astăzi, sunt rezultatul unei întregi evoluții, începând cu primele aplicații industriale din sec XIX [5].

În ultimele decenii, practica industrială a consacrat acționările ca mijloace eficiente de transformare și control a energiei hidraulice în energie mecanică, pentru deplasarea liniară sau rotativă, continuă sau discontinuă, cu viteză constantă sau variabilă a unei sarcini. Însă, ca orice echipament ce funcționează cu lichid, în anumite condiții de exploatare, elementele componente ale instalației hidraulice de acționare, sunt supuse unor regimuri hidrodinamice specifice funcționării în cavitație[6], chiar dacă lichidul este ulei cu o vâscozitate mult superioară apei, care, la cavitație face ravagii în mașinile hidraulice, de tip turbine, pompe și elice navale [3], [10]. Motivul este că și în lichidele de lucru ale sistemelor hidraulice (uleiul) există tendința de cavitație atunci când presiunea scade sub presiunea de vaporizare, respectiv sub presiunea de saturație la temperatura dată a gazelor dizolvate în lichidul respectiv. Astfel, în aceste cazuri, în masa de lichid apar punți cu vapori ai lichidului, producându-se așa numita "fierbere la rece" a acestuia [5], [6], [118]. Din acest motiv, pentru a evita fenomenul de cavitație, îndeosebi în cazul uleiurilor care lucrează la temperaturi ridicate, presiunea vaporilor saturați ai acestora trebuie să fie cât mai mică.

Formarea cavităților umplute cu gaze și vapori este guvernată în mai mare măsură, la lichidele de lucru din sistemele hidraulice de acționare, de degajarea gazelor nedizolvate și dizolvate, decât de vaporizarea lichidului însuși. De aceea, la instalațiile hidraulice de acționare apare o cavitație preponderent gazoasă. Aceasta rezultă din apariția bulelor cavitaționale, la valori mult mai ridicate ale presiunii decât presiunea de vaporizare a uleiului la temperatura respectivă.

Prin apariția fenomenului de cavitație are loc deranjarea condițiilor de omogenitate a lichidului și corodarea suprafețelor în zonele respective. Din cauza dependențelor multiple, presiunea de vaporizare nu are o valoare precisă la fiecare temperatură, ci se întinde pe un interval de presiuni cuprins între 130 Pa și 5700 Pa [5], pentru variații ale temperaturii de la 60 °C la 140 °C .

În locurile unde apar scăderi bruște ale presiunii, determinate de creșterile locale, accentuate ale vitezei lichidului, cazul umerilor sertarelor distribuitoarelor, servovalvelor și supapelor de presiune, natura cavitației este preponderent vapoasă, al cărei efect este nedorit, deoarece se manifestă și prin efectul de eroziune. Acest efect este total nedorit, deoarece materialul desprins prin eroziunea cavitației, conduce la blocaje ale aparatelor, la care jocurile dintre elementele mobile și alezaje sunt de ordinul micronilor.

Studiile realizate [3], [5], [93], [100], arată că locurile de manifestare și apariție a cavitației, în instalațiile hidraulice sunt diverse. Apariția cavitației în conductele din instalația hidraulică duce la creșterea rezistenței hidraulice odată cu micșorarea debitului. În cazul unei conducte de secțiune mică se formează dopuri de gaze, iar micșorarea fazelor lichid-gaz provoacă pulsații. În cazul pompelor cavitația are loc când lichidul se desprinde de pe elementul activ. În camera de aspirație apare

8 Introducere

atunci când presiunea de aspirație (presiunea absolută a lichidului la intrarea în pompă) nu este capabilă să învingă pierderile hidraulice.

Cavitația în sistemele hidraulice apare atât în conductele și canalele de aspirație al pompelor, cât și în secțiunile de droselizare a echipamentului de comandă, distribuție și reglaj. Apariția cavitației are drept consecințe: eroziunea componentelor pompelor și a echipamentului de comandă, distribuție și reglare, pierderi de putere, șocuri de presiune, zgomot și vibrații, instabilitatea comenzilor, formarea de spumă în rezervor, etc.

Prin urmare, în sistemele de acționare hidraulică a mașinilor se impun adoptarea unor măsuri constructiv - funcționale și de instalare hidraulică și mecanică care să împiedice apariția cavitației și a consecințelor extrem de nefavorabile care o însoțesc. Printre aceste măsuri se află și utilizarea unor tehnici de durificare structurală și superficială a elementelor aflate în zonele de cavitație. Astfel de soluții sunt propuse, în prezenta lucrare, ca urmare a rezultatelor obținute prin programul doctoral de cercetare.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND CAVITAȚIA ÎN SISTEMELE HIDRAULICE DE ACȚIONARE

Acționările hidraulice reprezintă un domeniu important al tehnicii moderne, cu o largă aplicație, ce se extinde de la presa hidraulică cu acționare manuală și până la sistemele sofisticate și automatizate ale avioanelor și navetelor spațiale. Această aplicație este dată de agentul de lucru, fluidul sub presiune, ai cărui parametri pot fi ușor controlați și monitorizați. Practic, acționările hidraulice au penetrat aproape toate ramurile industriale ca: domeniul energetic, construcții de mașini, mașini-unelte, auto, aviație, nave maritime și fluviale, medicină, industrie aerospațială, etc. În combinație cu acționările electrice și dispozitivele electronice de automatizare, sistemul hidraulic poate face față unor regimuri extrem de variate, de temperatură, umiditate sau de presiuni exterioare, cum este cazul forajului la mari adâncimi [8, 118].

Odată cu evoluția aparaturii hidraulice au evoluat și cercetările privind condițiile de exploatare și materialele utilizate la fabricarea acestora. Ca orice instalație ce utilizează lichid, chiar dacă acesta are o vâscozitate ridicată, datorită variațiilor de secțiuni și ale vitezei de curgere, în anumite situații, în unele zone, mai ales în secțiunile create de elementele mobile și orificiile din corpul aparatelor de comandă, distribuție și reglare, literatura, deși săracă în informații, arată că sunt create condițiile de apariție a cavității, care în dezvoltare se manifestă cu toate efectele sale [8, 7, 12, 16, 21, 38, 93, 100].

În cadrul acestui capitol, folosind și rezultatele găsite în literatură, se va face o scurtă prezentare a fenomenului de cavitație, a structurii sistemului hidraulic de acționare, cu evidențierea elementelor componente afectate de cavitație, care vin să justifice necesitatea obiectivelor stabilite prin programul doctoral de cercetare, în vederea îmbunătățirii rezistenței la cavitație a acestor piese.

1.1. Structura sistemului hidraulic de acționare

În practică, sisteme hidraulice hidraulice de acționare sunt sisteme de comandă, distribuție și control, fig.1.1, de tip hidrostatic (volumice) [7, 103, 118], deoarece au la baza funcționării energia potențială a lichidului vehiculat, sub formă de presiune hidrostatică. Datorită componenței structurale (fig.1.2), prin intermediul energiei lichidului de lucru (hidraulică), transformă energia electrică sau termică în mecanică.

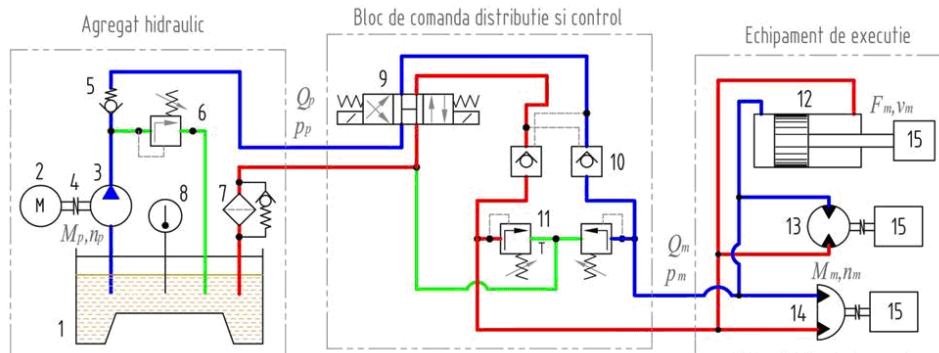


Fig.1.1. Structura unui sistem hidraulic

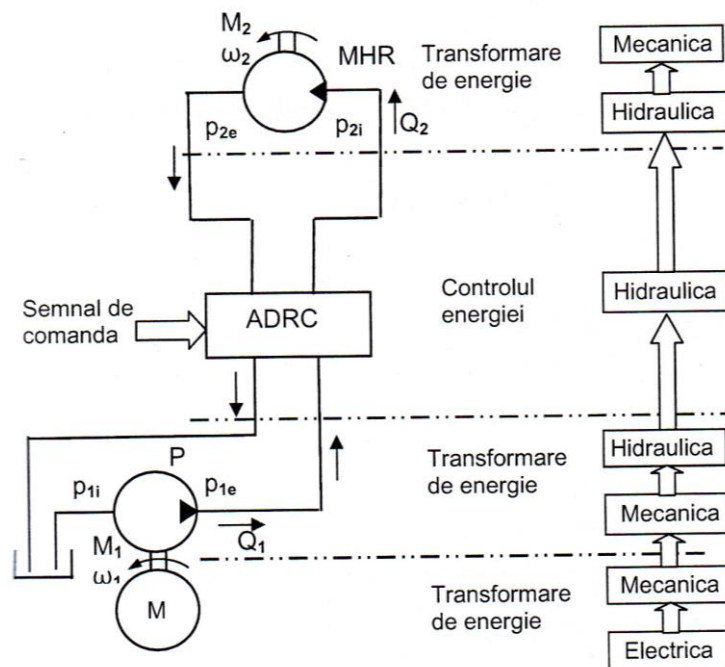


Fig.1.2. Transformarea energiei în sistemele hidraulice de acționare, de tip hidrostatic
 Semnificații: M_1 - motor electric sau termic; P-pompă volumică; $Q_{1,2}$ - debitul de lichid; $p_{1,2}$ - presiunea lichidului (la intrare (i) și la ieșire (e)); ADRC - aparat de distribuție, reglare și comandă; M_2 - motor hidraulic rotativ; $\omega_{1,2}$ - viteza unghiulară

În general, așa cum reiese din fig.1.1, sistemele de acționare hidrostatice se compun dintr-un agregat hidraulic, bloc de comandă, distribuție și control, și echipamentul de execuție, care pot fi montate fix sau pe utilaje mobile.

Agregatul hidraulic, fig.1.3, este un ansamblu de componente hidraulice grupate într-o singură unitate funcțională, care asigură alimentarea cu fluid de lucru la anumiți parametri (debit, presiune) ai unui sistem hidraulic.

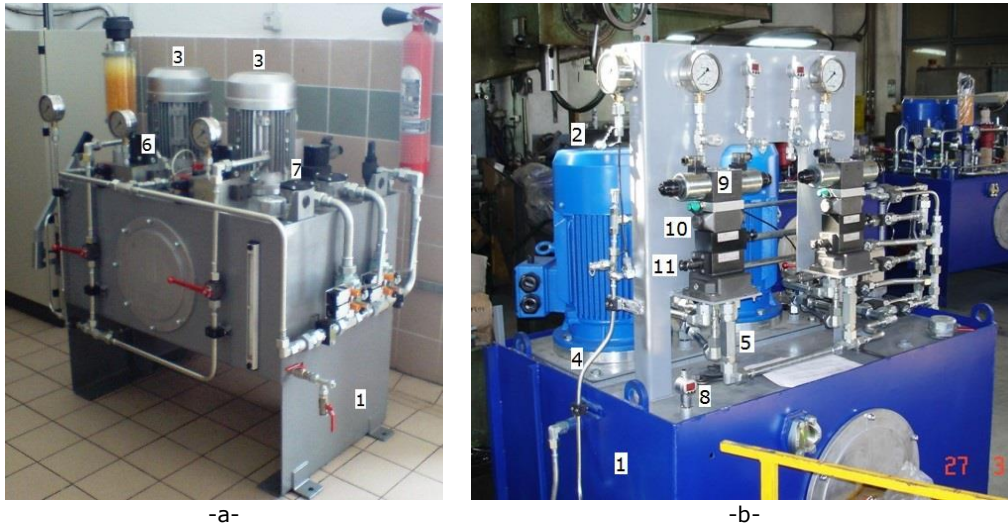


Fig.1.3. Agregate hidraulice: a – simplu, b-cu bloc de comandă și distribuție încorporat

Conform fig.1.1 și fig.1.3, agregatul hidraulic se compune din următoarele:

1 - rezervor de ulei - este o construcție metalică (sudată sau turnată) sau din materiale plastice, care asigură volumul de lichid de lucru necesar funcționării în bune condiții a sistemului hidraulic;

2,3,4 - grupul de pompare format din motorul de antrenare 2, care realizează momentul M_p și turația n_p , necesare antrenării pompei 4, care debitează debitul Q_p de lichidul de lucru, la o presiune hidrostatică p_p , legate mecanic prin intermediul cuplajului 3;

5,6 - supape de sens 5 și de protecție la suprapresiune 6;

7 - filtre sau baterii de filtre;

8 - instrumente de măsură și control (temperatură, nivel ulei etc.);

Blocul de comandă, distribuție și control, (vezi scheme funcțională din fig.1.1, fig.1.2 (notat cu ADRC) și imaginea fotografică din fig.1.4), constă din aparatură hidraulică necesară comenzii și direcționării fluidului de lucru (prin distribuitorul hidraulic 9) către camerele hidraulice adecvate ale elementelor de execuție 12,13,14, respectiv a controlului sensului de curgere (prin supapele de sens deblocabile 10) și a parametrilor de lucru ai acestuia p_m (prin supapele de presiune 11).

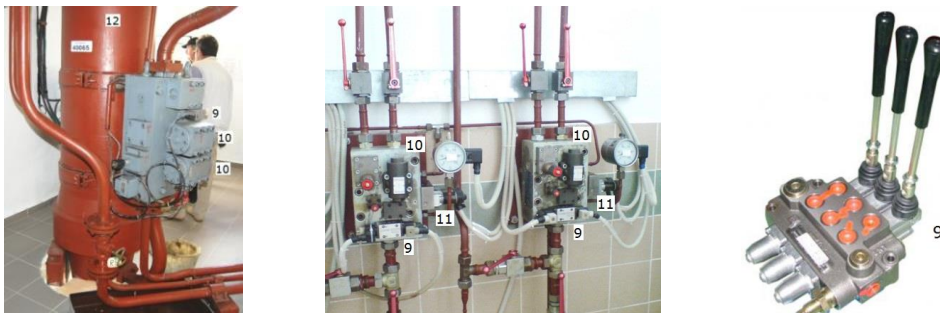


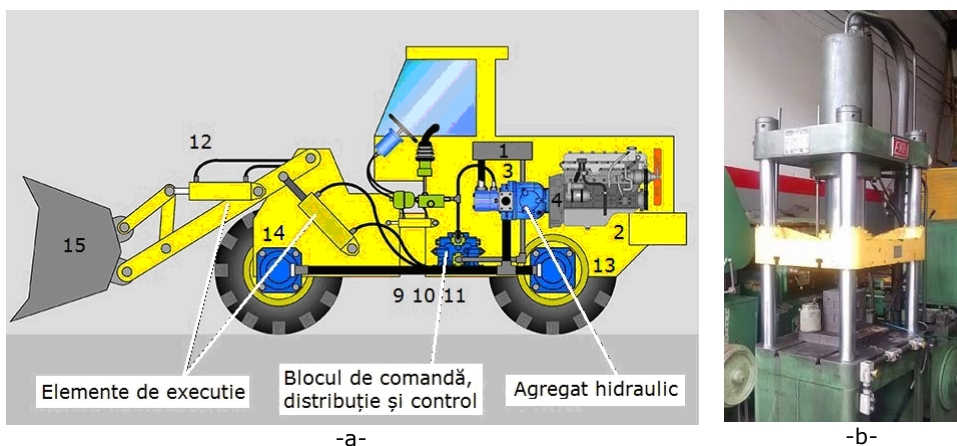
Fig.1.4. Blocul de comandă, distribuție și control

Pe lângă acestea, blocurile de comandă mai pot conține și alte tipuri de aparate hidraulice, în funcție de necesitățile funcționale, cum ar fi droselul pentru reglarea debitului, supape de sens, aparatură de măsură și control, robineti de închidere și izolare, regulatoare, supape de presiune pilotate, aparatură proporțională, etc. Toate acestea, la anumite regimuri, curgerea prin zonele cu secțiuni variabile, create între elementul mobil și cel fix se face cu viteze mari, care duc la scăderea presiunii sub cea de vaporizare, condiție de apariție și dezvoltare a cavității.

Echipamentul de execuție (vezi și exemplul din fig.1.5) convertește energia potențială a lichidului sub presiune în energie mecanică, necesară deservirii utilajelor și instalațiilor de lucru 15, la parametrii necesari acestora F_m, v_m, M_m, n_m . Elementele de execuție pot fi:

12 - motoare hidraulice liniare care realizează conversia parametrilor hidraulici în mișcare de translație (presiunea p_m determină forța F_m , respectiv a debitului Q_m determină viteza v_m);

13, 14 - motoare hidraulice rotative sau oscilante 14 care realizează conversia parametrilor hidraulici în mișcare de rotație completă sau incompletă (presiunea p_m determină momentul M_m , respectiv a debitului Q_m determină turația n_m).



-a-
Fig.1.5. Echipamentul de execuție:
a-sistem hidraulic a unui încărcător frontal cu cupă, b-presă hidraulică

Pe lângă aceste echipamente de execuție, sistemul hidraulic de acționare mai cuprinde cuplaje de legătură, aparatura de monitorizare a cursei, senzori și limitatori de poziție, etc.

Legătura hidraulică dintre aparatele care compun sistemele hidraulice se realizează prin conducte, racorduri și blocuri hidraulice.

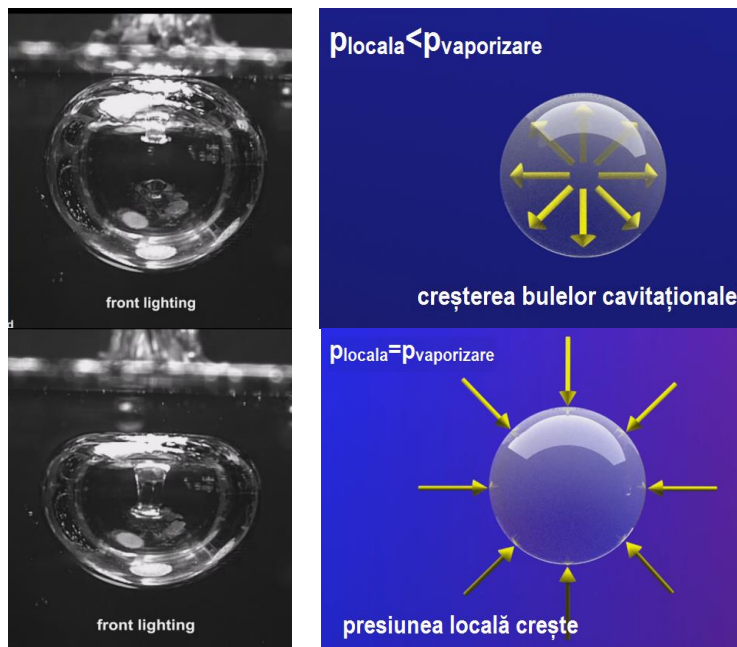
Componența unui sistem hidraulic este diferită de la caz la caz, în funcție de domeniul de utilizare și necesitățile tehnologice.

Folosirea sistemelor de acționare hidraulice, în combinații cu celelalte tipuri de sisteme, creează posibilitatea exploatării la maxim a calităților fiecăruia dintre acestea. Însă, siguranța în exploatare a elementelor și sistemelor hidraulice depinde de o serie de factori cum ar fi elementele de etanșare, temperatura mediului hidraulic, regimul cavitațional, uzura, coroziune, fenomene de obliterare, etc.

Exploatarea, dar și unele studii, arată că, urmare a variației debitului și a geometriei secțiunilor de curgere de pe conductele de legătură, dar mai ales din anumite zone din aparatura hidraulică, se crează condițiile apariției și dezvoltării cavitației [93, 98], ceea ce face ca piesele erodate să fie supuse unor tratamente care să confere, suprafețelor afectate, proprietățile mecanice necesare creșterii rezistenței la impactul cu microjeturile și undele de șoc dezvoltate prin cavitație. Totodată, prin aceste tratamente se urmărește și creșterea rezistenței la eroziunea abrazivă, creată de particulele solide, aflate în lichidul de lucru [10, 14, 98, 113, 118].

1.2. Considerații generale privind cavitația și efectele sale

În literatura de specialitate **cavitația** este cunoscută ca un fenomen hidrodinamic complex, specific curgerii lichidelor, care se manifestă în majoritatea circuitelor hidraulice și în special în interiorul echipamentelor hidromecanice aferente, ducând la o serie de efecte nedorite cum ar fi diminuarea parametrilor energetici și funcționali, apariția zgomotelor și vibrațiilor și, cel mai grav, eroziunea materialului frontierelor solide care ghidează curgerea [3, 10, 14, 38]. Dacă, primele două efecte pot fi substanțial reduse prin proiectare și exploatare corespunzătoare, din motive economice, eliminarea completă a cavitației este practic imposibilă. În imaginile din fig.1.6, prin filmare ultrarapidă și simulare pe calculator (realizate de către IET Institute for Energy Technology la HSR University of Applied Sciences Rapperswil din Lusanne, Elveția) [126], este prezentat mecanismul hidrodinamic al cavitației de formare, evoluție și surpare a bulelor cavitaționale, precum și de formare a undelor de presiune și a microjeturilor care deteriorează suprafețele solide învecinate.



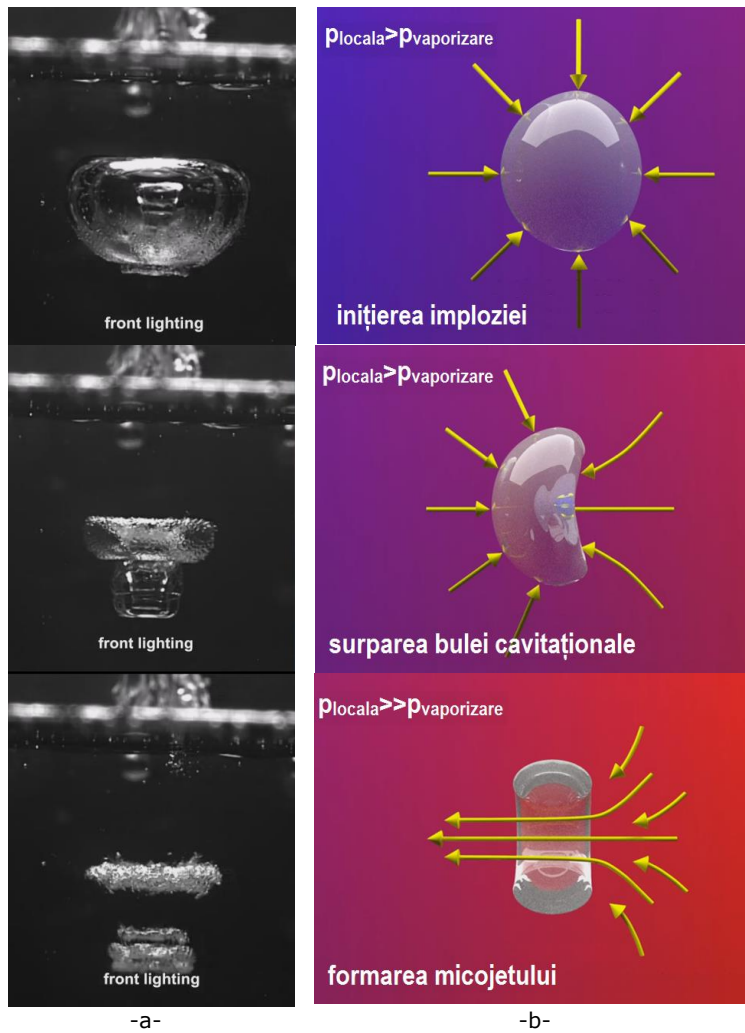


Fig.1.6. Formarea și implozia bulelor cavitaționale [126]:
 a – filmare în timp real cu camera ultrarapidă 37500 cadre/secundă;
 b – descrierea fenomenului;
 c – simulare fenomenului pe calculator.

Fenomene similare, celor arătate în imaginile din fig.1.6, au loc și în aparatele de comandă, reglare și control din sistemele de acționare hidraulică, dar și în unele zone ale conductelor de legătură, mai ales pe traseul de intrare în pompa volumică, când este plasat un sorb/filtru cu grad ridicat de finețe [7, 8, 12, 16, 21, 93, 100].

Astfel degradările rezultate fig.1.7. pot fi vizibile atât pe elementele mobile, cât și pe corpul aparatelor.



Fig.1.7. Elemente de aparatura hidraulică, deteriorate prin cavitație: a-eroziune sertar și scaune de așezare, b,c-eroziune pe corpul aparatelor [131, 133]

Exemplu de cavitație în aparatura hidraulică îl constituie cercetările efectuate în cadrul laboratoarelor companiei Sun Hydraulics, care au pus în evidență fenomenul cavitațional și efectele sale asupra supapelor de presiune pilotate, tip cartuș [131]. Astfel, prin experimentul prezentat în fig.1.8 [131], sunt puse în evidență atât zonele de formare a bulelor cavitaționale, cât și a fenomenului de sonoluminiscentă care însoțește implozia acestora. Undele de șoc generate în urma imploziei conțin foarte multă energie, care poate rupe electroni liberi din structura moleculară a lichidului, vizualizată prin lumina de culoare albastră, care indică temperaturile de valori ridicate. Fenomenul se produce la o intensitate proporțională cu zgomotul specific fenomenului de cavitație.

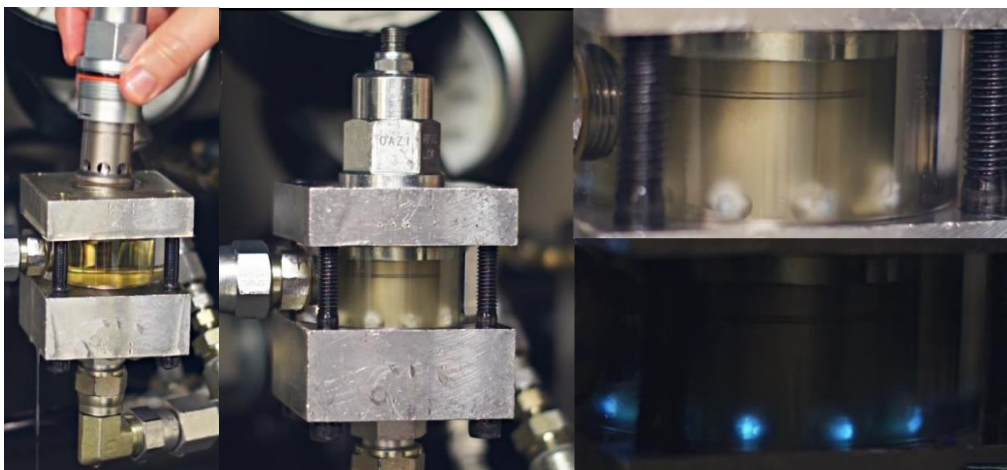


Fig.1.8. Formarea zonelor cavitaționale, însoțite de fenomenul de sonoluminiscentă [131]

1.3. Documentare asupra cavitației în aparatura hidraulică

Chiar dacă există foarte puține studii privind funcționarea în cavitație a aparatelor de comandă, distribuție și reglare, publicațiile privind rezultatele cercetărilor teoretice și de laborator arată că, deși acestea folosesc lichide cu vâscozitate mare, totuși, la anumite viteze de curgere, sunt create condițiile de

atingere a presiunii de vaporizare, când începe să se inițieze cavitația [3, 23, 24, 38, 41, 70, 100].

Din punct de vedere hidrodinamic, dezvoltarea cavitației în aparatura hidraulică depinde, în mare măsură, de nivelul vitezelor lichidului de lucru, prin interstițiile create între elementele mobile și cele fixe [6, 101] (sertar distribuitor - corp distribuitor, ventil - corp supapă, etc.).

În general, aceste interstiții sunt foarte mici (de ordinul milimetrilor) iar vitezele au valori mari ceea ce face ca presiunile, din aceste interstiții, să scadă până la valoarea presiunii de vaporizare, moment în care sistemul începe să funcționeze în cavitație.

În fig.1.9 sunt evidențiate locurile unde poate apărea cavitația în distribuitorul cu sertar cilindric liniar, iar în fig.1.10 în supapele cu ventil conic [8, 21].

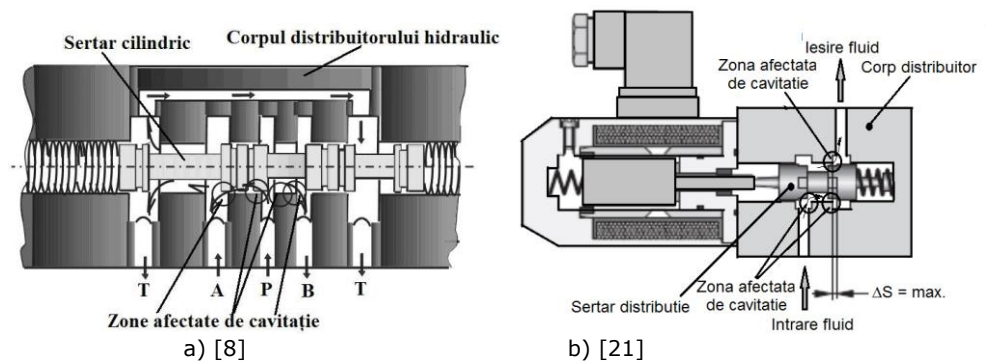


Fig.1.9. Zonele susceptibile de apariție și dezvoltare a cavitației (distribuitor hidraulic cu sertar cilindric liniar)

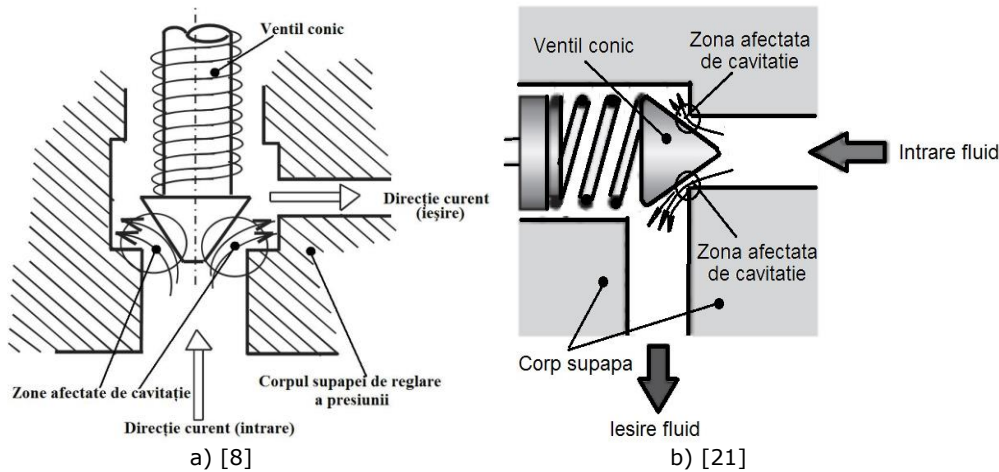


Fig.1.10. Zonele susceptibile de apariție și dezvoltare a cavitației (supape de reglare a presiunii cu ventil conic)

După cum se vede în imaginile din fig.1.9 și 1.10, apariția cavitației în aparatura hidraulică (distribuitor, supape, reglatoare de debit, etc) are loc în fantele dintre elementele mobile și corpul aparatelor. Din punct de vedere

hidrodinamic, intensitatea cavitației este determinată de viteza uleiului la trecerea prin fante cu dimensiuni de ordinul zecimilor de milimetru [7, 93, 100, 101, 118, 125, 129, 130- 132]), care duc la o scădere mare a presiunii de intrare, mult sub valoarea presiunii de vaporizare.

În fig.1.11 este prezentată modelarea curgerii uleiului printr-un distribuitor cu sertar cilindric (reproducere după [100]). De aici, se poate observa că, în fanta de trecere, presiunea devine negativă, ceea ce înseamnă că zona respectivă este supusă atacului cavitației. Motivul este dimensiunea foarte redusă a fantelor.

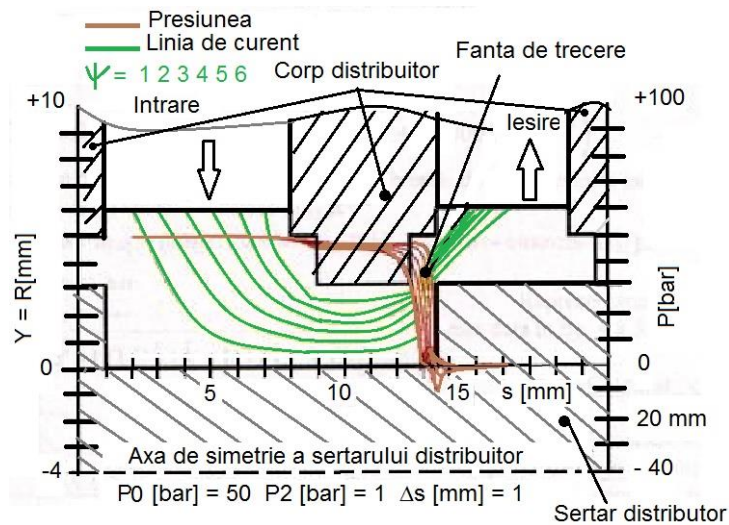


Fig.1.11. Linii de curent și evoluția presiunii în lungul acestora pentru $x=1\text{mm}$ (distribuitor cu sertar cilindric liniar) (prelucrare din [100])

Rezultatele obținute de Raszga, prezentate prin imaginea din fig.1.11, sunt în concordanță cu zonele menționate în fig.1.9 și fig.1.10.

În tezele de doctorat [93, 100], elaborate în domeniul cercetării curgerii prin aparatura hidraulică din sistemele de acționare, caracterizarea stadiului cavitațional din aparatul hidraulic se face pe baza curbelor primare, respectiv de sensibilitate la cavitație, fig.1.12. Aceste curbe sunt dependențe grafice între coeficientul de cavitație al instalației σ_{inst} sau cel de incipiență cavitațională σ_i (la incipiența cavitațională $\sigma_{\text{inst}} = \sigma_i$) cu numărul Reynolds Re (sau alt număr de curent, înlocuitor al numărului Reynolds) și coeficientul de debit c_Q , definiți astfel [93, 100]:

$$\sigma_{\text{inst}} = \frac{P_{\text{av}} - P_v}{P_{\text{am}} - P_{\text{av}}} \quad (1.1)$$

sau

$$\sigma_{\text{inst}} = \frac{P_{\text{av}} - P_v}{\frac{\rho v^2}{2}} \quad (1.2)$$

$$Re = \frac{Q}{\pi D v} \quad (1.3)$$

$$\lambda = \frac{1}{v} \sqrt{\frac{2(p_{am} - p_{av})}{\rho}} \quad (1.4)$$

$$C_Q = \frac{Q}{A \sqrt{\frac{2(p_{am} - p_{av})}{\rho}}} \quad (1.5)$$

unde:

p_{am} - reprezintă presiunea din amonte interstițiului ventil-corp aparat, respectiv sertar-corp aparat;

p_{av} - reprezintă presiunea din avalul interstițiului ventil-corp aparat, respectiv sertar-corp aparat;

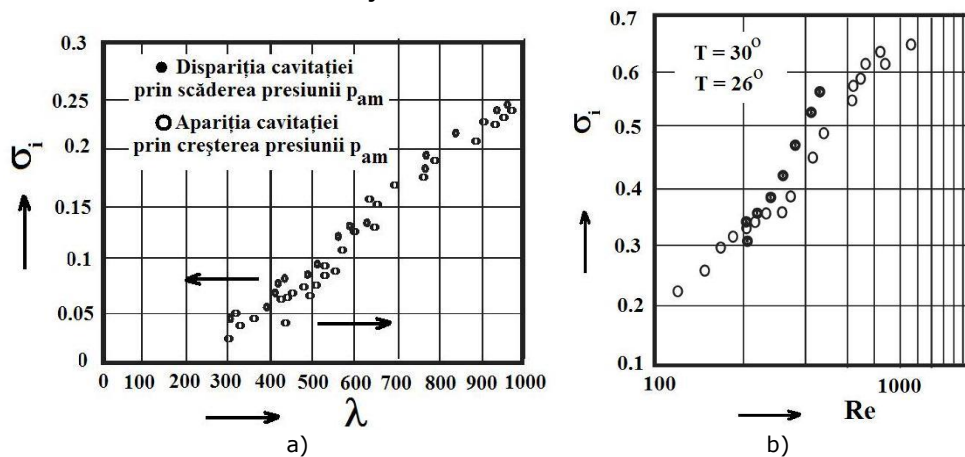
A - aria secțiunii interstițiului de trecere a lichidului;

D - diametrul echivalent al de trecere a fluidului;

ρ - densitatea lichidului de lucru;

λ - numărul de curent;

v - viteza fluidului în secțiunea contractată.



Curbele prezentate în fig.1.12 arată că în aparatura hidraulică există cavitație, al cărui stadiu este influențat de numărul Re , temperatură (fig.1.12.b) și coeficientul λ (fig.1.12.a).

Pornind de la definirea riguroasă a regimurilor cavitaționale și coeficienților de cavitație realizată de academicianul I. Anton [3, 100] în cele trei secțiuni de referință (de intrare „0”, de ieșire „2” și în secțiunea fantei de reglaj „M-punctul în care presiunea poate atinge valoarea minimă”), prin rularea unor programe specifice metodei elementului finit, s-a reușit determinarea valorilor câmpurilor de viteze și presiunii în orice punct al domeniului de curgere, în mod interactiv, aceasta permițând studiul amănunțit al zonei considerate critică.

În fig.1.13 este redată variația coeficientul de cavitație al instalației cu deschiderea fantei, obținută prin simulare numerică de către Raszga [100]. Din această diagramă se observă că rezerva de presiune ($p_{\min}-p_v$) scade foarte mult pe partea de final de cursă, raportată la presiunea de vaporizare p_v , interval pe care este posibilă apariția cavitației.

De asemenea, simulările efectuate de Razga [100], evidențiază creșterea vitezelor, respectiv scăderea presiunilor, în zona camerei aval a distribuitorului cu sertar cilindric, indicând apariția cavitației, exprimată prin coeficientul de presiune minimă.

Totodată, Raszga [100], prin experimentul urmat de simulare numerică, realizat pe un distribuitor hidraulic cu sertar cilindric liniar, acționat de un motor electric pas cu pas, arată că în funcționarea distribuitorului cu sertar cilindric, atât deschiderea cât și diferența de presiune influențează fenomenele cavitaționale, și anume, la deschideri mici și foarte mari, zona de funcționare necavitațională este mai extinsă, fig.1.14.

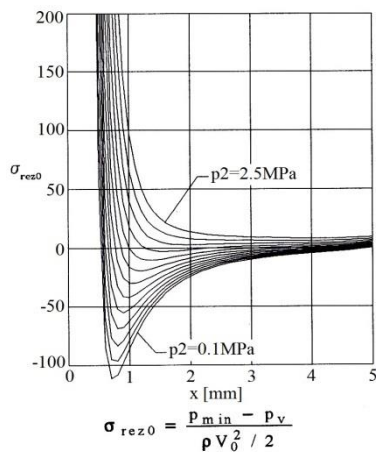


Fig.1.13. Variația coeficientului rezervei de cavitație σ_{rez0} [100]

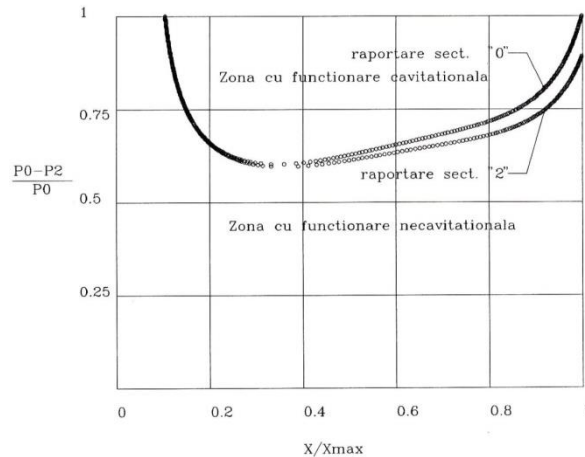


Fig.1.14. Curbe de sensibilitate la cavitație în secțiunea de intrare „0” și cea de ieșire „2”. [100]

Studiile realizate în cele două teze de doctorat [100], de la Universitatea Politehnică Timișoara, precum și cele din teza lui Opruța [93] de la Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, demonstrează că în aparatura hidraulică din sistemele de acționare, sunt regimuri de funcționare cavitaționale, iar căderea de presiune (de care depinde stadiul cavitației) este dependentă de unghiul de teșire al umărului sertarului, fig.1.15.

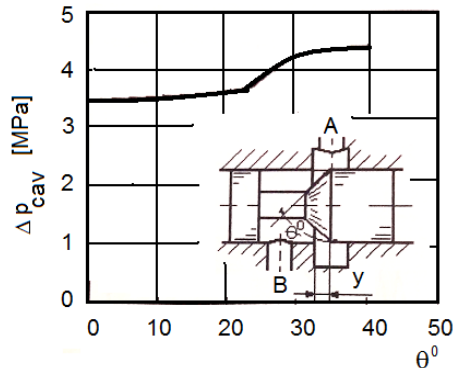


Fig.1.15. Influența unghiului de teșire asupra pragului cavițational (preluare din [93])

Rezultatele oferite de literatura studiată și prezentate în acest subcapitol, confirmă existența regimurilor caviționale în aparatele de comandă, distribuție și reglare, aflate în componența sistemelor hidraulice de acționare. Conform curbelor specifice hidrodinamicii caviției (curbele de sensibilitate), prezentate în fig.1.11 și 1.13, piesele afectate sunt elementele mobile și corpurile aparatelor. Zonele cu risc de distrugere prin caviție sunt umerii sertarelor, conurile ventilelor și fantele din corpurile aparatelor, prin care se dirijează uleiul (vezi și fig.1.9 și 1.10).

Așadar, pentru piesele din oțel, cum sunt sertarele mobile, sunt necesare folosirea celor mai noi tehnici, care să confere suprafețelor atacate, proprietățile mecanice necesare sporirii rezistenței la atacul caviției.

1.4. Documentare privind comportarea și rezistența la caviție a unor oțeluri destinate pieselor mobile ale aparatelor hidraulice de comandă, distribuție și reglare

Observațiile realizate la lucrările curente și de mentenanță, pe zona de trecere dintre sertare și fantele aparatelor de comandă, distribuție și control, precum și modelările numerice, au pus în evidență eroziuni caviționale și abrazive ale umerilor sertarelor și corpurilor aparatelor [113]. Astfel, actualmente, toți producătorii de astfel de aparate sunt interesați de folosirea unor materiale pentru piesele mobile din zonele de caviție care, prin tehnologii adecvate de tratament, să își sporească rezistența la impactul cu microjeturile și undele de șoc dezvoltate prin mecanismul hidrodinamic al caviției [10, 12, 14, 21, 47].

Ca o continuare a documentării privind hidrodinamica curgerii caviționale din aparatura hidraulică, prezenta lucrare abordează și mecanismul mecanic prin care se poate mări rezistența la eroziunea caviției, deoarece eroziunea caviției schimbă geometria sertarului, ventilului și a umărului corpului aparatului din dreptul interstițiului, afectând buna funcționare a aparatului în ansamblul său, prin scurgeri de lichid la poziția închis (blocat) [3, 14, 98].

Procedura de alegere a materialelor, care să reziste la solicitările destructive ale microjeturilor și undelor de șoc produse prin surparea bulelor caviționale, se poate face prin una din căi [8, 14, 16, 41, 44]: empiric și experimental. Prima se bazează pe relațiile stabilite între diverse caracteristici mecanice, în urma analizei comportării caviționale a numeroaselor materiale testate în diverse stațiuni de laborator [3, 16, 38]. Cele mai uzuale relații sunt de forma:

$$\frac{1}{\text{MDER}} = 0,734(\text{HB})^{1,8} \quad \text{Hammit [14, 56]} \quad (1.6)$$

$$\frac{1}{\text{MDER}} = \frac{\eta \cdot A_{\text{er}} \cdot \rho \cdot v^3}{\varepsilon \cdot A_{\text{ex}} \cdot 2} \quad \text{Hoff ș.a [14]} \quad (1.7)$$

$$\varepsilon = C_0 + C_1 \cdot \text{UR} + C_2 \text{SE} \quad \text{Garcia ș.a [14, 44]} \quad (1.8)$$

unde:

- MDER – viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cavitaționale;
- v - viteza de impact lichid-solid;
- η – coeficient de transfer al energiei de la lichid la solid (depinde de caracteristicile materialului și parametrii fluidului);
- ε – parametrul caracteristic materialului; poate avea o formă ca cea dată de relația (8)
- A_{er} – aria erodată cavitațional;
- A_{ex} – aria expusă atacului cavitațional;
- HB – duritatea Brinell;
- C_i ($i=0,1,2$) – coeficienții determinați statistic pe baza rezultatelor experimentale;
- UR – reziliența finală, dată de relația [3, 14, 93, 109]:

$$\text{UR} = \frac{R_m^2}{2E} \quad (1.9)$$

- unde: R_m – reprezintă rezistența la rupere;
- E – modulul de elasticitate longitudinal al materialului.

Dezavantajul utilizării relațiilor de mai sus în aprecierea rezistenței materialului la eroziune cavitațională este gradul de subiectivitate care, în unele situații, poate fi destul de mare ca urmare a cuprinderii în structură numai a unor mărimi măsurabile [61, 63].

Cea de a doua cale, și cea mai bună, o prezintă testarea rezistenței la eroziune cavitațională în laborator. Rezultatele obținute în acest caz pot fi discutate fie pe baza curbelor caracteristice, fie pe baza valorilor parametrilor caracteristici [3, 14, 38, 47, 124] (maximul vitezei de eroziune cavitațională, v_{max} , viteza de stabilizare a eroziunii cavitaționale v_s , rezistența normalizată la cavitație R_n , viteza adâncimii medii de pătrundere MDER, etc)

Pe plan mondial, cercetările de eroziune, asupra materialelor folosite în construcția aparatului hidraulic de comandă și reglare, sunt foarte reduse. Singurele rezultate experimentale, efectuate atât asupra unor materiale utilizate în construcția elementelor mobile (sertare, clapete, ventile) cât și asupra celor folosite în turnarea corpurilor aparatelor, găsite în documentarea realizată, sunt cele obținute în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [8, 10, 16, 47]. Încercările realizate, conform metodei standard, din ASTM G32-2002 [14], în apă distilată la $22 \pm 1^\circ\text{C}$, au fost derulate pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel [10, 14]. În fig.1.16 sunt prezentate rezultatele obținute, exprimate prin

variațiile volumului erodat și vitezei de eroziune cu timpul de atac al cavitației. Simbolurile fontelor speciale de turnătorie (FL2015 și Fx2), precum și ale oțelurilor aliate (41Cr4, 18MoCrNi13 și 41MoCr11) sunt cele date prin normele standard românești, dinainte de 1990.

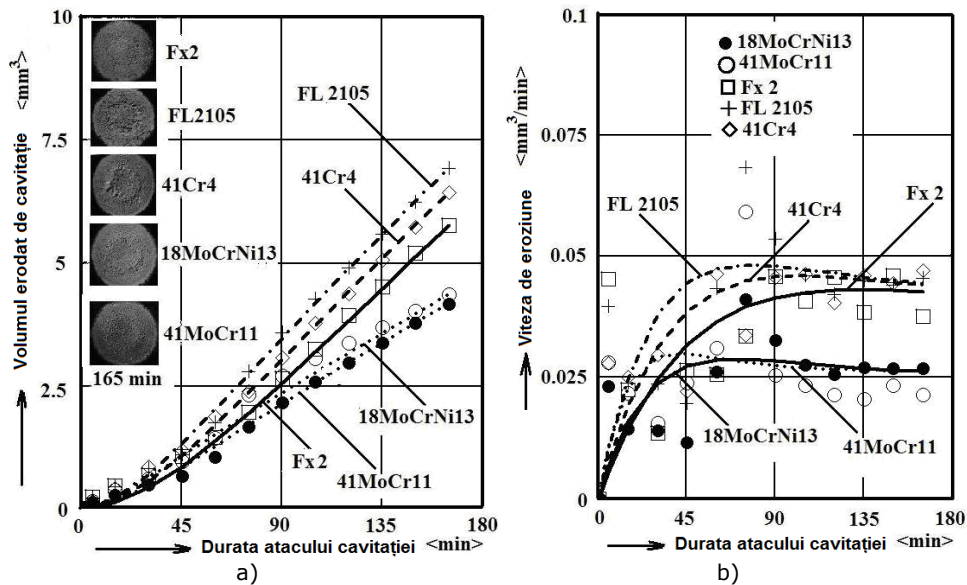


Fig.1.16. Curbele caracteristice de eroziune a cavitației produsă în apă - preluare din [7]
 a) variația pierderilor volumice cumulate cu durata atacului cavitației
 b) variație vitezei de eroziune a cavitației

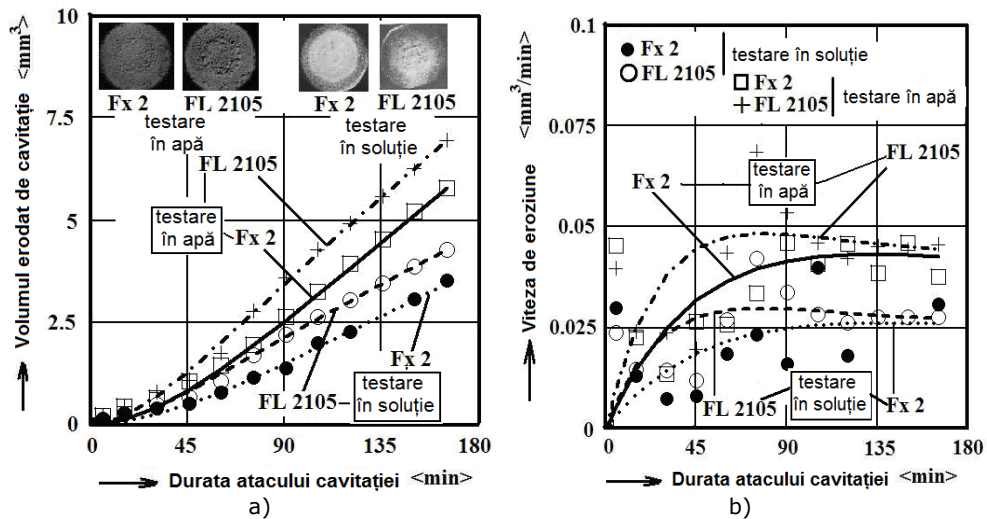


Fig.1.17. Comparație între curbele caracteristice de eroziune a cavitației produsă în apă și soluție de apă cu săpun- preluare din [7]
 a) variația pierderilor volumice cumulate cu durata atacului cavitației
 b) variație vitezei de eroziune a cavitației

Din analiza acestor curbe se constată că materialele utilizate în construcția elementelor mobile (oțelurile aliate) și a corpurilor aparatelor hidraulice de comandă, distribuție și reglare (fontele cu grafit lamelar fin) au o comportare și rezistențe cavitaționale diferite. De remarcat că, fontele, care sunt utilizate în fabricarea corpurilor aparatelor hidraulice au comportări comparabile cu ale oțelurilor. Aceste constatări denotă complexitatea mecanismului de eroziune, dependent de proprietățile și structura materialului.

În fig.1.17 este evidențiat efectul vâscozității mediului de lucru, în cazul de față, soluție de apă cu săpun (30 %). Astfel, distrugerea produsă de cavitația generată în soluție de apă cu săpun este mai redusă, datorită vâscozității mai ridicate, care atenuază vârful presiunii de impact cu undele de șoc și microjeturi pe suprafețele atacate [8]. Totuși, existența degradării (vezi imaginile fotografice) arată că, atunci când există cavitație, chiar dacă lichidul este vâscos, suprafețele expuse pot fi deteriorate. În același timp, datele din fig.1.17, arată că alegerea materialului și a tehnologiei de tratament al suprafeței care vine în contact cu fluidul cavitant, pentru piesele aparatului hidraulic (sertare, ventile, scaune, etc), este o problemă dificilă, mai ales când se impun anumite condiții de natură mecanică de lucru și de tip de lichid utilizat.

1.5. Materiale utilizate în construcția componentelor sistemelor hidraulice de acționare, supuse solicitării cavitaționale

Întrucât obiectul cercetărilor, din prezenta lucrare, îl constituie studiul comportării la eroziune cavitațională a materialelor din care sunt confecționale elementele mobile ale aparatelor din componența sistemelor hidraulice, mai jos este făcută o scurtă prezentare a acestora. Metalele utilizate în construcția pieselor aparatului sistemelor hidraulice sunt, cu precădere, aliajele fieroase, precum: oțelurile și fontele. Alături de acestea se mai găsesc aliaje neferoase, materiale ceramice și materiale plastice, dar care nu sunt în zonele de curgere cavitațională [7, 67, 118, 129-132].

Folosirea oțelurilor și fontelor este dictată de cel mai bun raport între caracteristicile de rezistență, cerute de condițiile de exploatare (presiuni ridicate, șocuri, variații mari de temperatură, fenomene de uzură și eroziune cavitațională, etc.) și costul de producție al reperelor realizate din acestea.

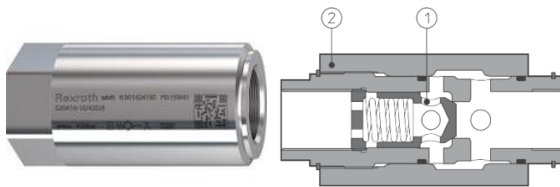
În tabelul 1.1 sunt prezentate cele mai uzuale materiale folosite în fabricarea diverselor componente din sistemele hidraulice de acționare, aflate pe traseul de curgere, care, la anumite regimuri, sunt afectate de cavitație.

Tabelul 1.1. Materiale folosite la realizarea componentelor din instalațiile hidraulice

POMPE VOLUMICE
Pompe hidraulice cu pistonaje axiale

	<p>Corp pompă:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fontele cenușii cu grafit lamelar, nemodificate, turnate în piese (EN-GJL-200...350); - oțeluri turnate în piese SR EN 10293:2015. <p>Rotor:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fontele cenușii cu grafit lamelar, nemodificate, turnate în piese (EN-GJL-200...350); - oțeluri de cementare SR EN 10084:2008;
<p>- oțeluri turnate în piese SR EN 10293:2015; - bronz grafitat trunat.</p>	
<p>Pistonaje:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri aliate tratate prin călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009; - oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002. 	
<p>Pompe hidraulice cu roți dințate</p>	
	<p>Corp pompă:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri turnate în piese SR EN 10293:2005; - aliaje de aluminiu; <p>Pinioane:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri nealiat pentru călire - revenire SR EN 10083-2:2007; - oțeluri de cementare SR EN 10084:2008.
<p>APARATURA DE DE COMANDĂ, DISTRIBUȚIE ȘI CONTROL</p>	
<p>Supape de presiune</p>	
	<p>1. Corp supapă:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fontele speciale pentru turnătorie; - aliaje de aluminiu; - aliaje Cu-Al turnate în piese (pentru industria petrochimică). <p>Scaun supapă:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri inoxidabile martensitice, austenitice și austenito-feritice SR EN 10222-5:2002; - aliajele Cu-Sn laminate și turnate în piese.
<p>2. Sertar mobil:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri nealiat pentru călire - revenire SR EN 10083-2:2007; - oțeluri de cementare SR EN 10084:2008; - oțeluri aliate pentru călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009; - oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002. 	

Supape de sens



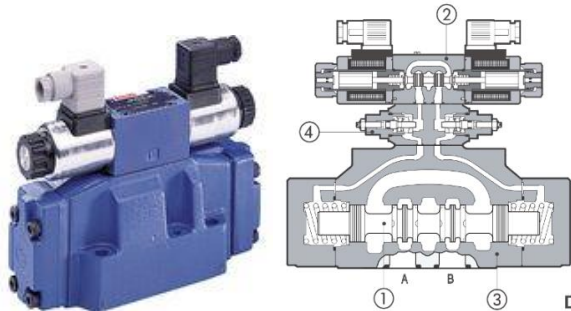
1. Corp supapă:

- oțeluri inoxidabile martensitice, austenitice și austenito-feritice SR EN 10222-5:2002;
- aliajele Cu-Sn laminate.

2. Sertar

- oțeluri nealiat pentru călire - revenire SR EN 10083-2:2007;
- oțeluri de cementare SR EN 10084:2008;
- oțeluri aliate pentru călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009;
- oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002.

Distribuitoare hidraulice



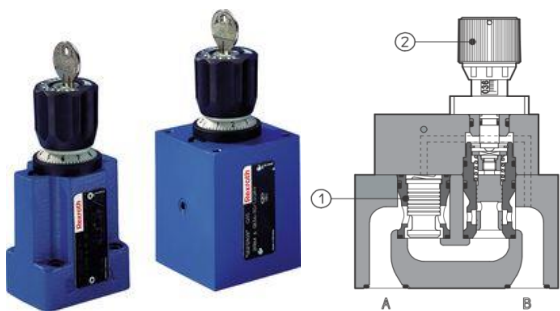
1. Sertar:

- oțeluri nealiat pentru călire - revenire SR EN 10083-2:2007;
- oțeluri de cementare SR EN 10084:2008;
- oțeluri aliate pentru călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009;
- oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002.

2.3.4. Corp distribuitor:

- fontele speciale pentru turnătorie;
- aliaje Cu-Al turnate în piese (pentru industria petrochimică).

Droșele



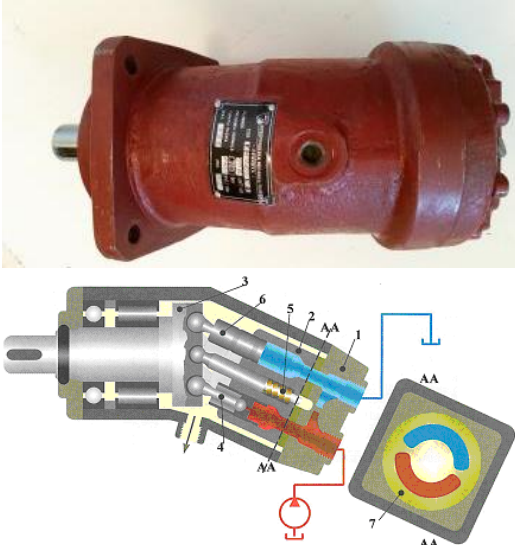
1. Corp droșel:

- fontele speciale pentru turnătorie;
- aliaje Cu-Al turnate în piese (pentru industria petrochimică);

2. Element de reglare:

- oțeluri de cementare SR EN 10084:2008;
- oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002;

- oțeluri aliate pentru călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009.

Motoare hidraulice rotative și oscilante	
	<p>1. Corp motor:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fontele cenușii cu grafit lamelar, nemodificate, turnate în piese (EN-GJL-200...350); - oțeluri turnate în piese SR EN 10293:2015. <p>2. Rotor:</p> <ul style="list-style-type: none"> - fontele cenușii cu grafit lamelar, turnate (EN-GJL-200...350); - oțeluri de cementare SR EN 10084:2008; - oțeluri turnate în piese SR EN 10293:2015. <p>3.4.5.6. Disc, pistonase, arbore:</p> <ul style="list-style-type: none"> - oțeluri aliate pentru călire - revenire SR EN 10083-3:2007/AC:2009; - oțeluri pentru nitrurare SR EN 10085:2002.

1.6. Tratamente aplicate sertarelor aparatelor hidraulice. Principii, clasificare și aplicații

Aparatele hidraulice sunt unele dintre cele mai scumpe piese, datorită preciziei de prelucrare mecanică prin care se realizează toleranțe de execuție foarte strânse între elementele mobile și cele fixe, și datorită funcționării la solicitări dinamice ridicate, caracterizate de șocuri puternice produse prin variații bruște ale presiunii în fazele de comutație.

Ținând cont de aceste cerințe se impune utilizarea unor materiale care să posede în stratul de suprafață caracteristici mecanice ridicate (rezistența la rupere, duritate, etc.), rezistențe la uzură, coroziune chimică și de cavitație, oboseală, concomitent cu bune caracteristici de plasticitate ale miezului (tenacitate, reziliență, etc.).

Cum efectul cel mai nociv al cavitației îl reprezintă distrugerea prin eroziune [3, 38, 41, 44, 61, 63, 109], iar materialele utilizate pentru fabricarea pieselor afectate de cavitație sunt fontele speciale (pentru corpul aparatelor [14] și oțelurile slab aliate pentru elementele mobile [7, 8, 16, 21, 47, 84, 113, 118] se impune folosirea unor tehnologii prin care rezistența la cavitație a zonelor afectate să crească, astfel încât durata de exploatare să fie cât mai mare.

Printre aceste tehnologii, pentru piesele mobile, se regăsesc tratamentele clasice de călire volumică, dar și cele de durificare superficială, specifice tratamentelor termochimice, al căror efect, din punct de vedere al rezistenței conferite la cavitație, este foarte puțin pus în evidență.

În funcție de procedeul utilizat, tratamentele aplicate se împart în tratamente termice, termochimice, termomecanice, mecanice sau combinații ale acestora sub formă de tratamente Duplex [81, 82, 84, 117].

Tratamente termice

Tratamentele termice constau din încălzirea materialului la diferite temperaturi, în cuptoare cu atmosferă liberă sau controlată, menținerea o perioadă de timp și supunerea ulterioară unei răcirii bruște sau mai lente, cu scopul producerii anumitor transformări structurale și a obținerii unor proprietăți tehnologice sau de exploatare impuse unui semifabricat, respectiv unui produs finit.

Tratamentele termice se aplică în general aliajelor feroase, în special oțelurilor aliate și oțelurilor de scule, rezultatul acestora depinzând în mod direct de temperatura de încălzire, de viteza de răcire, de tipul și concentrația elementelor de aliere.

În timpul încălzirii sau răcirii oțelului au loc transformări în stare solidă în masa acestuia, cu formarea de constituenți noi sau cu modificarea raportului dintre constituenții existenți ai aliajului. Aceste transformări se produc la anumite temperaturi, cunoscute în literatură ca puncte critice de transformare și notate Ac_1 , Ac_3 , Ac_{em} , Ar_3 , Ar_{cem} , Ar_1 , valorile acestor temperaturi depinzând de compoziția chimică a aliajului, fiind date în diagrame de echilibru stabilite pe baza datelor teoretice și experimentale [81, 82, 84, 117].

Principalele tratamente la care se supun oțelurile sunt recoacerea, călirea, revenirea și îmbătrânirea, diferența dintre ele fiind temperatura până la care se face încălzirea și viteza de răcire aplicată. Obișnuit, asupra materialelor care urmează a fi supuse prelucrărilor mecanice se efectuează un tratament termic de recoacere.

Tratamente termochimice

Sunt procese de îmbogățire a stratului superficial al pieselor în anumite elemente chimice (carbon, azot, aluminiu, etc.) cu scopul de a îmbunătăți caracteristicile mecanice și fizico-chimice ale acestora. Ele constau din încălzirea produselor la o temperatură dată, într-un mediu solid, lichid sau gazos, care eliberează prin disocierea acestuia elemente în stare atomică, care sunt absorbite de suprafața piesei și care migrează în adâncime prin difuzie [25, 82, 117].

Spre deosebire de tratamentele termice, tratamentele termochimice produc pe lângă modificările de structură și modificări ale compoziției chimice a stratului superficial afectat.

Avantajele utilizării tratamentelor termochimice sunt [25]:

- crește duritatea superficială a pieselor (carburare, nitrurare, carbonitrurare, borizarea);
- crește rezistența la uzură (nitrurare, carbonitrurare, sulfizarea, sulfocarbonitrurarea, borizarea);
- crește rezistența la oboseală (nitrurare, carbonitrurare sulfizarea, sulfocarbonitrurarea);
- crește rezistența la coroziune (nitrurare, aluminizarea, silicierea);
- posibilitatea menținerii caracteristicilor de plasticitate și tenacitate ale miezului produselor.

Tratamentele termochimice se aplică metalelor cum ar fi Ti, Mo, W, Nb, aliajelor feroase (oțeluri, fonte) și neferoase (aluminiu, cupru) [25, 82, 117].

Elementele chimice care difuzează pot fi metale (Al, Zn, Cr, Ti) sau nemetale (C, N, B, S, Si) iar în funcție de acestea, tratamentele termochimice cele mai răspândite în practică, sunt [25]:

- carburarea (cementarea): îmbogățirea în carbon;
- nitrurarea: îmbogățirea în azot;
- carbonitrurarea: îmbogățirea în carbon și azot;

- borizarea: îmbogățirea în bor;
- sulfizarea: îmbogățirea în sulf;
- sulfocarbonitrurarea: îmbogățirea simultană în sulf, carbon și azot;
- aluminizarea: îmbogățirea în aluminiu;
- cromarea de difuzie: îmbogățirea în crom;
- zincarea de difuzie: îmbogățirea în zinc;
- titanarea: îmbogățirea în titan;
- silicierea: îmbogățirea în siliciu.

În funcție de proprietățile dorite, se alege elementul de îmbogățire și regimul de tratament termochimic.

Utilizarea tratamentelor de suprafață, cum sunt cele termochimice și mecanice prezintă un interes deosebit pentru industria de profil, deoarece au costuri și timpi de realizare mult inferioare tratamentelor volumice și pot fi aplicate unor materiale uzuale, ieftine cum sunt și oțelurile cercetate în cadrul acestei lucrări.

Tratamente mecanice

Tratamentele mecanice au la bază procedee tehnologice de prelucrare prin deformare plastică la rece, la temperatura ambiantă sau la valori inferioare temperaturii de recristalizare. În urma tratamentului se obține o ecruisare mecanică (durificare prin deformare) a materialului pe o anumită adâncime, ce constă în deformarea grăunților cristalini în sensul de acțiune a forțelor și creșterea densității de dislocații și imperfecțiuni ale rețelei cristaline [81, 82, 84]. Datorită acestor deformații ale grăunților și limitelor dintre aceștia, sunt împiedicate deplasările atomilor de-a lungul planurilor de alunecare. Drept consecință are loc o creștere a caracteristicilor de rezistență cum ar fi rezistența la rupere R_m , limita de curgere R_{p02} și duritatea suprafeței, concomitent cu scăderea caracteristicilor de plasticitate ca: reziliența KCU, alungirea relativă A și gătuirea Z.

Tratamentul se pretează în special la oțelurile moi, oțelurile hipoeutectoide care au caracteristici de plasticitate mai ridicate [81, 82, 84,].

Oțelurile dure, cu caracteristici mecanice ridicate cum sunt oțelurile înalt aliate, oțelurile hipereutectoide nu se ecruisează, existând riscul apariției de fisuri datorită constituenților structurali duri și fragili de tipul carburilor, nitruirilor, etc [81, 82, 84, 117].

În funcție de tehnologia de aplicare pentru durificarea diferitelor suprafețe, tratamentele mecanice se realizează prin: [81, 82, 84, 128]:

- sablare cu alică (nisip, corindon, bile metalice);
- roluire;
- tehnologie Low Plasticity Burnishing;
- ecruisare mecanică cu fascicul laser (Laser Shoc Peening).

Întrucât primele trei tehnologii sunt aplicate la scară largă de o bună perioadă de timp și în plus nu permit durificarea suprafețelor interioare ale pieselor, cum ar fi scaunele și ghidajele sertarelor din corpul aparatelor hidraulice, în cadrul tezei se va folosi ecruisarea cu fascicul laser.

Tratamentele duplex

Utilizarea consecutivă a două sau mai multe metode de tratament asupra aceleași piese, cu scopul cumulării beneficiilor rezultate în urma acestora poartă numele de tratamente Duplex [58, 74, 82, 117].

Folosirea tratamentelor Duplex constă în aplicarea secvențială a două tehnologii de suprafață, interacțiunile lor metalurgice având ca scop obținerea unor straturi noi, care să poseze proprietăți caracteristice ambelor procese [58, 74, 82, 117]. Avantajul tehnic constă în păstrarea caracteristicilor de rezistență și de plasticitate în volumul materialului de bază, modificându-se doar cele din straturile superficiale, în sensul creșterii durității și a rezistenței la uzare [81, 82, 84].

Prin urmare, este esențial de a controla cu atenție ambele tratamente aplicate, astfel încât structurile și proprietățile care rezultă din primul tratament să nu fie deteriorate de cel de-al doilea tratament aplicat. Proprietățile combinate obținute, cele mecanice și de suprafață, rezultate în urma tehnologiei Duplex, executate în mod corespunzător, s-au dovedit a fi mai bune decât cele obținute prin orice proces realizat individual [81, 82, 84].

Cu toate că efectele parametrilor de proces ai unor tehnici de acoperire a suprafeței asupra rezistenței la cavitație au fost studiate frecvent, literatura tehnică este foarte subțire în privința datelor care privesc comportarea straturilor tratate Duplex [47, 58, 74, 81, 82, 84]. Totodată, există elemente divergente legate de comportarea la eroziunea cavitației a oțelurilor tratate Duplex, datorate în principal gradientului de microstructură și de granulație pe secțiunea transversală a piesei, natura și proporția de combinații chimice prezente în stratul de suprafață, starea de tensiuni remanente, etc.

1.7. Concluzii

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.

Cunoașterea stadiului cavitațional și al rezistenței la eroziune cavitațională este esențială pentru aparatura hidraulică în vederea creșterii duratei de exploatare la parametri optimi, deoarece efectele solicitărilor cavitaționale pot fi, uneori, mai nefaste decât cele mecanice.

La alegerea materialului pentru fabricarea elementelor mobile (sertar, clapetă, ventile, etc.) și a corpurilor aparatelor hidraulice, trebuie să aibă în vedere și condițiile hidrodinamice (curgere, temperatură, etc) care, la anumite regimuri de lucru pot produce deteriorări și instabilități, ca urmare a manifestării cavitației.

Cu excepția aparatelor folosite în instalațiile mașinilor unelte, prin care circulă lichid de răcire, de tipul soluției apă-săpun, prin marea majoritate a aparatelor hidraulice de comandă și reglare circulă uleiul hidraulic mineral, a cărui vâscozitate este foarte mare, în raport cu apa sau soluția, ceea ce face ca efectul eroziv, al cavitației să fie mult redus, dar nu și neglijabil.

Datorită efectului pe care îl poate avea apariția cavitației în aparatura hidraulică, din componența sistemelor acționate hidraulic, Laboratoarele de specialitate (de cavitație și ingineria materialelor), din cadrul Universității Politehnica Timișoara, acordă o atenție importantă hidrodinamicii fenomenului, modului de selecție a materialelor și tehnologiilor de tratament, astfel încât durata de exploatare, în siguranță sporită, să fie cât mai mare.

1.8. Obiectivele tezei de doctorat

Eroziunea cavitațională a sertarelor aparaturii din sistemele hidraulice, alături de uzura abrazivă, determinată de particulele de material dislocate la impactul undelor de șoc și a microjeturilor, duce la deteriorarea prematură a acestora, sau chiar la blocaje funcționale, situații nedorite în exploatare.

Cercetările întreprinse în cadrul lucrării vizează dezvoltarea unor tratamente care să contribuie la îmbunătățirea rezistenței la eroziune prin cavitație a oțelurilor aliate 16MnCr5 și 34CrNiMo6, din care sunt executate elementele mobile ale aparaturii sistemelor hidraulice.

Principalele obiective urmărite în cadrul tezei sunt:

- îmbunătățirea rezistenței la cavitație a oțelurilor slab aliate, tratate Duplex prin carburare urmată de călire de suprafață prin inducție;
- efectul tratamentului termic de recoacere urmată de ecrisare mecanică cu fascicul laser în creșterea rezistenței la cavitație a oțelului slab aliat 16MnCr5;
- îmbunătățirea rezistenței la cavitație prin tratamentul termic de îmbunătățire, urmată de nitrurare în mediu gazos sau cu fascicul laser a oțelului aliat 34CrNiMo6;
- punerea la punct a unui nou concept de evaluare a rezistenței oțelurilor la eroziunea cavitațională prin măsurători de rugozitate.

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 comportării la eroziune cavitațională vibratorie, a oțelurilor utilizare în construcția componentelor aparaturii hidraulice, precum și stabilirea unei noi proceduri de evaluare a rezistenței acestora la eroziunea cavitațională, bazată pe parametrul de rugozitate R_z .

2. MATERIALE CERCETATE. APARATURA DE LABORATOR UTILIZATĂ. METODE DE ANALIZĂ ȘI EVALUARE

2.1. Materiale cercetate

Despre materialele folosite în fabricare elementelor mobile ale aparatelor de comandă, distribuție și reglare, din sistemele hidraulice de acționare, literatura de specialitate [1-3, 9, 11, 29, 34, 37, 45-47, 77, 80, 90, 98, 102, 107, 134] oferă doar date referitoare la compoziția chimică și caracteristicile mecanice, fără a da indicații despre rezistența și comportarea acestora la eroziunea cavitațională, tabelele 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. Pentru cercetarea efectelor eroziunii cavitaționale asupra acestor componente am optat pentru o comparație între două oțeluri hipoeutectoide, des utilizate în fabricația acestora [9, 11, 22, 29, 36, 97, 98], și anume: 16MnCr5, respectiv 34CrNiMo6, ambele fiind oțeluri slab aliate.

2.1.1. Oțelul slab aliat 16MnCr5

Oțelul slab aliat marca 16MnCr5, simbolizat alfanumeric 1.7131 conform normelor EN 10084:2008, este un oțel hipoeutectoid pentru carburare. Compoziția chimică este prezentată în tabelul 2.1, iar caracteristicile mecanice în tabelul 2.2. În aceste tabele sunt date valorile prescrise, conform normelor EN 10084:2008 [79, 134, 136] și valorile efective pentru starea de livrare (recoaptă) conform certificatului de calitate eliberat de către producatorul S.C. MECHEL-TARGOVIȘTE S.A., România.

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	Rm N/mm ²	Rp _{0.2} 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

Datorită conținutului scăzut în C, călibilitatea acestui oțel este destul de redusă, constituenții structurali și implicit duritatea acestui material putând fi apreciate din diagrama de transformare la răcire continuă a austenitei subrăcite, fig.2.1.

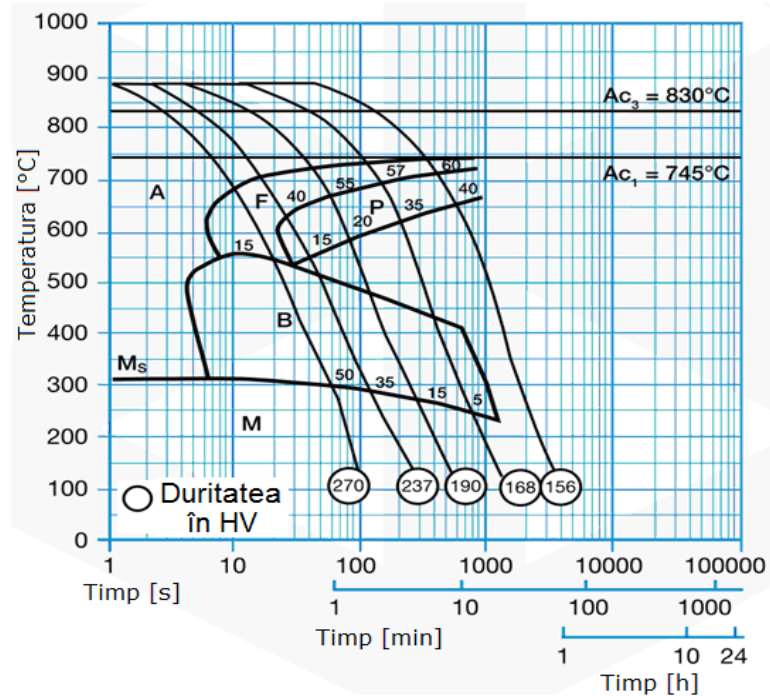


Fig.2.1. Diagrama de transformare la răcire continuă a austenitei, oțel 16MnCr5 [136]

Conform acestei diagrame, întrucât efectul de mărire a durității prin călire este nesemnificativ, este necesară creșterea concentrației de carbon prin tratamente termochimice de carburare.

2.1.2. Oțelul slab aliat 34CrNiMo6

Oțelul 34CrNiMo6, simbolizat alfanumeric 1.6582, conform EN 10083-3:2006 [134, 135], este hipoeutectoid, cu o largă arie de aplicabilitate în aparatura hidraulică și nu numai [9, 22, 79, 92, 96, 98, 100, 110].

În tabelele 2.3 și 2.4 sunt redată valorile prescrise de normele europene și cele medii, pentru compoziția chimică și caracteristicile mecanice, corespunzător stării de livrare, conform certificatului de calitate eliberat de către producător.

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	R _m N/mm ²	R _{p0.2} N/mm ²	A ₅ %	Z %	HB daN/mm ²
Valori prescrise	1100÷1300	900	9-14	45	248÷255
Valori efective	1300	1000	9	45	249

Întrucât acest oțel având un conținut în carbon de peste 0,20 %, poate fi durificat prin călire directă, iar datorită elementelor de aliere prezintă o călibilitate sporită, pentru procesarea pieselor prin operații de sudare, deformare plastică și tratament termic sunt extrem de utile datele oferite de diagrama de transformare a austenitei la răcire continuă (fig.2.2), diagrama de transformare izotermă (fig.2.3) și curbele de revenire(fig.2.4).

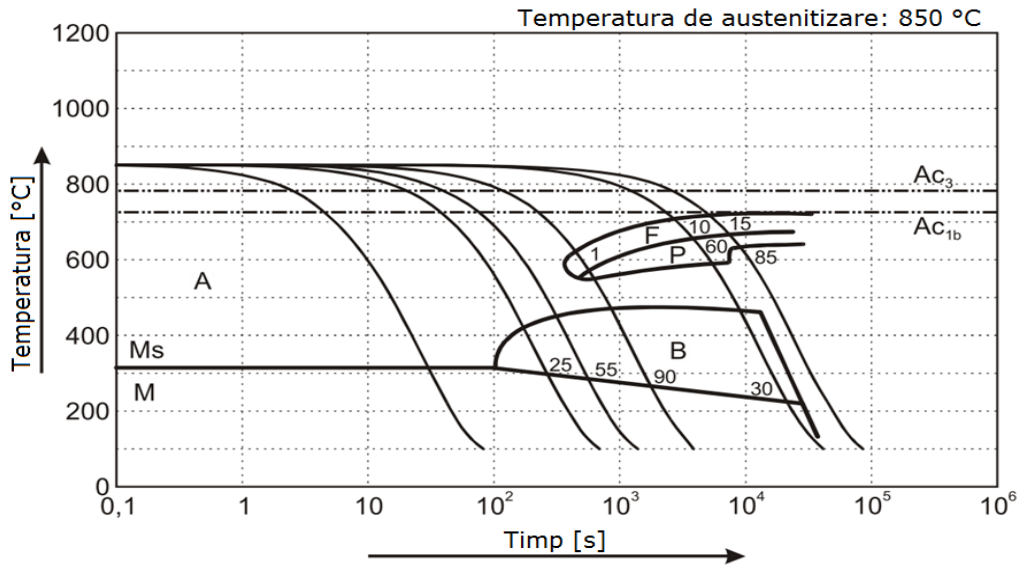


Fig.2.2. Diagrama de transformare la răcire continuă a austenitei, oțel 34CrNiMo6 [135]

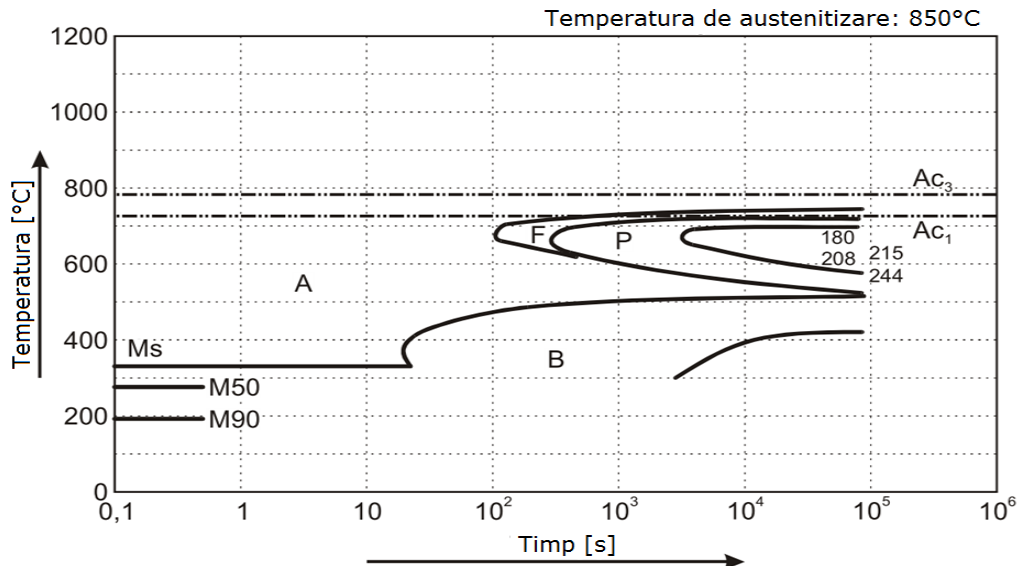


Fig.2.3. Diagrama de transformare izotermă a austenitei, TTT, oțel 34CrNiMo6 [135]

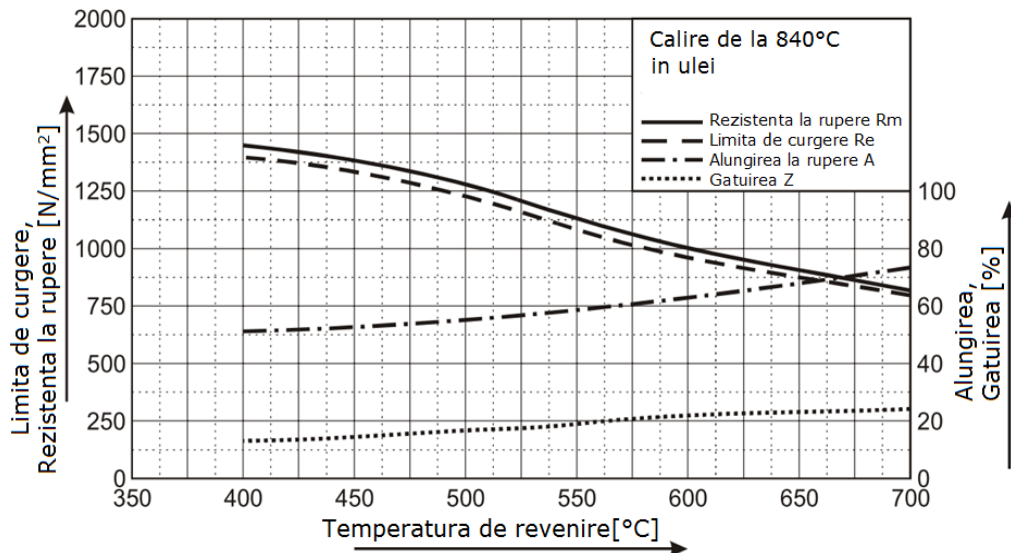


Fig.2.4. Curbele de variație a caracteristicilor mecanice ale oțelului 34CrNiMo6, cu temperatura de revenire [135]

2.1.3. Oțelul aliat 41Cr4 – oțel etalon

Oțelul 41Cr4, simbolizat alfanumeric 1.7035, hipoeutectoid, cu o largă arie de aplicabilitate în construcția aparaturii hidraulice [92, 96, 98, 100, 110], luat ca referință datorită bunei rezistențe la eroziunea cavitației.

În tabelele 2.5 și 2.6 sunt redată valorile prescrise de normele europene [96, 134] și cele medii, conform certificatului de calitate eliberat de către producător, pentru compoziția chimică și caracteristicile mecanice.

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 [2,14,122]

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

2.2. Aparatura de laborator și tehnici de investigare

Aparatura folosită pentru efectuarea cercetărilor se află în mare parte în laboratoarele Universității Politehnice Timișoara, iar altele se află în cadrul laboratoarelor institutelor și firmelor cu care am colaborat: ISIM Timișoara, Inteliform Timișoara și Duroterm București.

2.2.1. Investigații cavitaționale

Aparatura și tehnica utilizate oferă posibilitatea derulării cercetărilor planificate și respectă cerințele precizate prin normele ASTM G32-2010 [124].

Cercetările cavitaționale, din cadrul prezentei teze, au fost realizate în Laboratorul de Cavitație din cadrul Uiversității Politehnica Timișoara, fig.2.5, pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, care este condus prin calculator și dotat cu echipamente de control automat a parametrilor funcționali ce determină procesul hidrodinamic de cavitație [77, 90, 105, 124]. Acest gen de aparat permite testarea diferitelor tipuri de materiale, la regimuri de eroziune cavitațională intense, reducându-se, astfel, considerabil durata de atac a probelor, comparativ cu situațiile existente în realitate sau alte metode de generare a fenomenului de cavitație (cazul tunelului hidrodinamic [3, 26, 109] sau a aparatului cu disc rotitor [3, 26, 109]).

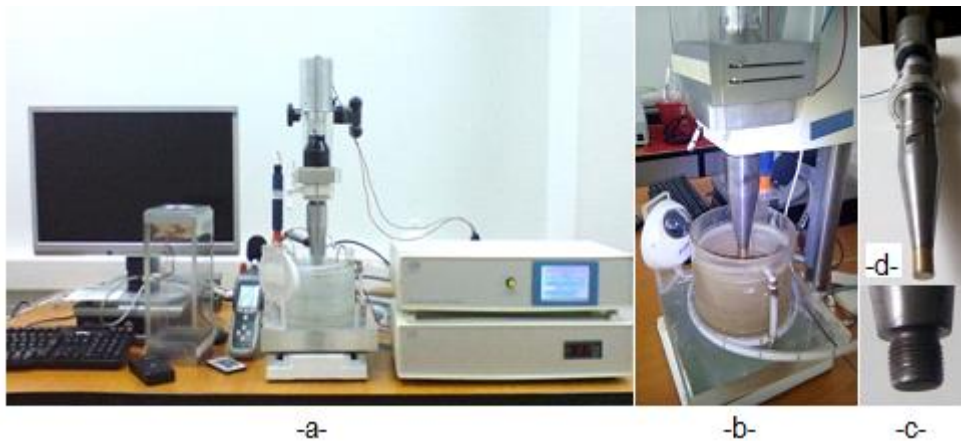


Fig.2.5. Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice

- a) vedere de ansamblu a aparatului cu sistemul de conducere prin calculator;
- b) imagine din timpul testului de cavitație (proba imersată în apă); c) sistemul mecanic de vibrație (transductorul piezoceramic cu sistemul de amplificare amplitudine (buster, sonotroda și proba de cavitație); d) capătul filetat al sonotrodei pentru fixarea probei

Parametrii funcționali ai aparatului, menținuți constanți pe toată durata cercetărilor, sunt: puterea generatorului electronic de ultrasunete: 500 W, frecvența vibrațiilor: $20000 \pm 2\%$ Hz, amplitudinea vibrațiilor: 50 μm , diametrul probei: 15,9 $\pm 0,05$ mm, tensiunea de alimentare: 220 V/50 Hz, lichidul de lucru: apa distilată, temperatura lichidului de lucru: $22 \pm 1^\circ\text{C}$.

Probele testate la cavitație au fost realizate din eșantioane de material cercetat, prelucrate prin așchiere conform modelului prezentat în fig.2.6, iar suprafața de atac a fost lustruită, pe aparatul Buehler Phoenix Beta (fig.2.7), la o rugozitate $R_a = 0,2 \div 0,8 \mu\text{m}$.

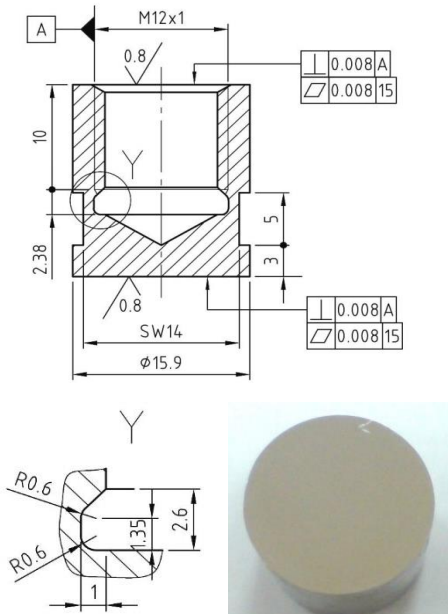


Fig.2.6. Proba pentru testare



Fig.2.7. Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta

Înainte de testele de cavitație, din fiecare oțel au fost realizate eșantioane, a căror masă a fost verificată la o balanță electronică, fig.2.8a, care trebuie să fie în intervalul 15,8-16,6 g, necesar realizării condițiilor de vibrație. De asemenea, ele au fost supuse la diferite tratamente termice, termochimice și mecanice, funcție de scopul urmărit, conform obiectivelor stabilite prin teză (vezi capitolul 1), precum: tratamente Duplex, tratamente termochimice de carburare urmate de tratamente termice de călire de suprafață prin inducție și revenire, tratamente termice de îmbunătățire urmate de nitrurare, tratamente termice de recoacere urmate de tratamente mecanice de ecruisare.

Pentru fiecare dintre regimurile de tratament s-au testat câte trei probe, conform procedurilor standard, dar și cutumei laboratorului, așa cum se va vedea în capitolele de cercetare experimentală.

Pentru identificare probele au fost puansonate pe suprafața laterală, diferit, funcție de material și fiecare etapă de tratament în parte.

Conform indicațiilor standard și cutumei laboratorului [11, 13, 15, 22, 39-47, 52, 62, 64, 69, 72, 77, 88-90, 105, 106, 108, 124], durata totală a testării fiecărei probe a fost de 165 minute, aceasta fiind împărțită în 12 perioade (câte una de 5 și 10 minute, iar 10 de câte 15 minute). La sfârșitul fiecărei perioade de testare, suprafețele erodate prin cavitație, au fost spălate în curent de apă potabilă, de la rețeaua publică și în acetonă, apoi uscate în jet de aer cald și cântărite pe balanța analitică cu precizie de 10^{-5} g, fig.2.8b.

Pe durata pauzelor, probele au fost păstrate în exicatori.

La demararea solicitării la cavitație și la finalul fiecăreia dintre cele 12 perioade, suprafața cavitată a fost fotografiată cu un aparat foto de înaltă rezoluție. După finalizarea atacului, suprafețele erodate de cavitație au fost studiate la

microscopul optic și electronic, din cadrul Laboratorului de Ingineria materialelor.

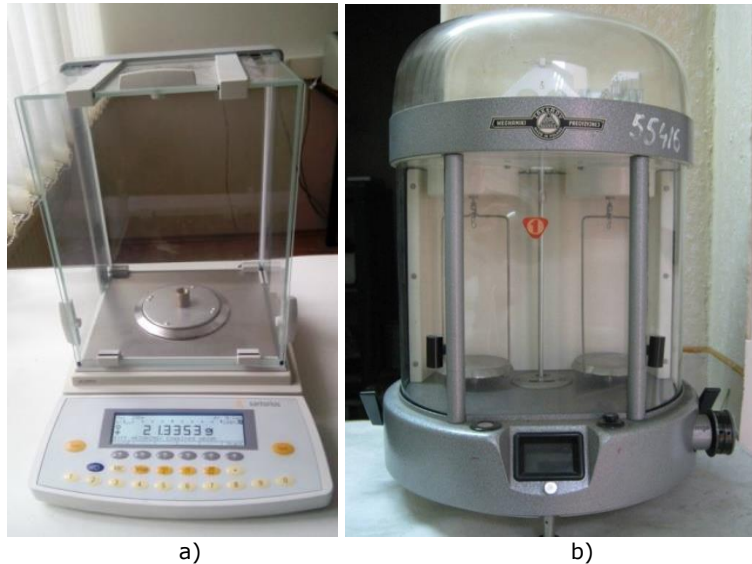


Fig.2.8. Balanțe folosite la determinarea masei probelor de cavitație:
a) balanța electronică; b) balanța analitică de tip Zatkłady Mechaniki Precyzyjnej WP1

2.2.2. Investigații microstructurale

Modificările structurale apărute în sistemul strat – substrat, în urma tratamentelor aplicate, au fost analizate prin următoarele metode de investigare: microscopie optică, fig.2.9 și electronică cu baleiaj (SEM), fig.2.10, spectroscopie pentru determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X (EDX), respectiv de determinare a fazelor existente prin analize de difracție cu raze X, fig.2.11.

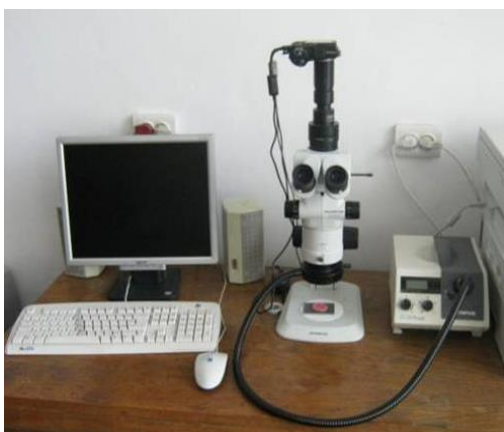


Fig.2.9. Microscopul OPLIMPUS SYX7



Fig.2.10. Microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax

2.2.3. Determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X

Analizele de dispersie în energie a razelor X (EDX), care au permis identificarea elementelor chimice existente în probele testate, s-au realizat cu ajutorul microscopului electronic TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax, prezentat în fig.2.10.

În urma indexării, s-au pus în evidență elementele de aliare și proporțiile acestora, în funcție de natura constituienților structurali prezenți în zona investigată.

2.2.4. Determinarea fazelor existente prin analize de difracție cu raze X

Punerea în evidență a fazelor constitutive prezente în straturile superficiale ale probelor testate, s-a realizat pe un difractometrul de raze X (X'Pert de la firma Philips) prezentat în fig.2.11, prin analize de difracție cu raze X, folosindu-se o radiație monocromatică $\text{Cu K}\alpha$, cu lungime de undă de 1.541840 Å.

Parametri de proces au fost:

- intensitatea: 30 [mA]
- tensiunea: 40 [KV]
- mărimea pasului: 0,04mm
- timpul pe pas: 0,5 [s]
- timp de scanare: 0,08 [s]
- unghiul de scanare : 20 – 90 [°]

Identificarea cristalografică a fazelor din probe s-a realizat folosind baza de date JCPDS.



Fig.2.11. Difractometrul de raze X (X'Pert de la firma Philips)

2.2.5. Măsurarea rugozității suprafețelor atacate cavitațional

După finalizarea perioadei de testare de 165 minute, suprafețele atacate au fost examinate microscopic, fotografiate și li s-a determinat rugozitatea pe trei direcții dispuse la 120 °, cu aparatul Mitutoyo, prezentat în fig.2.12.

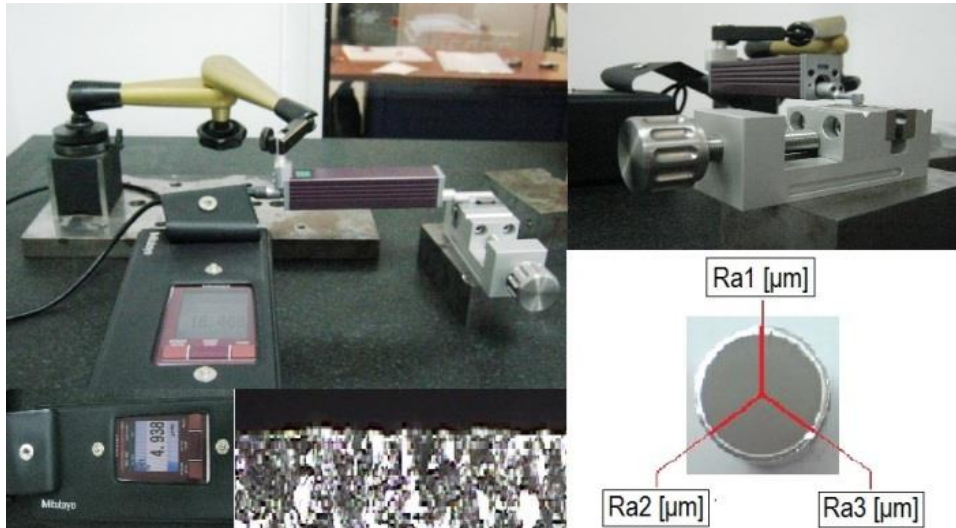


Fig.2.12. Măsurarea rugozității cu rugozimetru digital Mitutoyo pe trei direcții.

2.2.6. Investigatii sclerometrice.

După măsurarea parametrilor rugozității cu aparatul Mitutoyo, probele au fost tăiate în lungul axei (fig.13.a), lustruite, atacate chimic cu nital și examinate la microscop, pentru cercetarea structurii metalografice și a adâncimii de pătrundere a eroziunii cavității (fig.13.c). Totodată s-a măsurat și variația durității pe grosimea stratului tratat (fig.13.b).

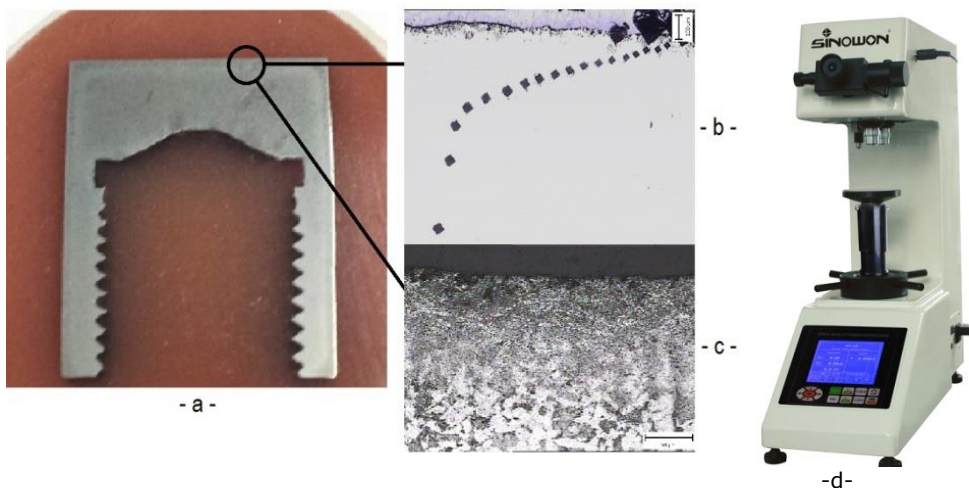


Fig.2.13. Secțiune prin piesa tratată : a – stratul de suprafață afectat, b – dispunerea punctelor de măsurare a durității pe grosimea stratului durificat, c – imaginea stratului durificat, obținut în urma atacului metalografic, d- durimetru digital Vickers model HV-50AC.

2.3. Metode de evaluare și de predicție a eroziunii produse prin cavitație

Odată cu dezvoltarea unor tehnologii performante de testare a rezistenței materialelor la eroziune cavitațională, care folosesc principiul magnetostrictiv sau pizoceramic și asigură viteze mari de eroziune, într-un interval de timp relativ redus (de ordinul a 165 de minute/probă), s-a putut face o clasificare și evaluare a acestora din punct de vedere cavitațional, după diverși parametri, în concordanță cu tradiția Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara și cu respectarea normelor internaționale ASTM G32-2010 [124].

2.3.1. Evaluarea pe baza curbelor caracteristice

Evaluarea și predicția eroziunii produse de cavitația vibratoare este realizată conform cutumei laboratorului și a cerințelor ASTM G32-2010 [13, 26, 32, 102, 124], pe baza curbelor și parametrilor specifici, determinați după procedura descrisă mai jos.

Așa cum s-a precizat la subpunctul 2.2.1, la sfârșitul fiecărei perioade de testare, proba a fost curățată în acetonă, uscată cu jet de aer și cântărită pe balanța analitică cu sensibilitate de 10^{-5} g [32, 124], pentru determinarea pierderilor masice aferente Δm_i .

Pentru evaluarea comportării materialului la eroziune cavitațională, pentru fiecare regim de tratament aplicat, s-au determinat pierderile masice cumulate M_i ca sumă a pierderilor masice $\Delta m_{i,j}$, conform relației de mai jos:

$$M_i = \sum_{j=1}^{12} \Delta m_{i,j} \quad (2.1)$$

Cu ajutorul acestor determinări s-a calculat adâncimea medie de eroziune MDE_i , respectiv viteza de pătrundere a acesteia $MDER_i$:

$$MDE_i = \sum_{j=1}^{12} \Delta MDE_{i,j} = \sum_{j=1}^{12} \frac{4 \cdot M_{i,j}}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} [\mu m] \quad (2.2)$$

$$MDER_i = \frac{\Delta MDE_i}{\Delta t_i} [\mu m/min] \quad (2.3)$$

unde:

- i reprezintă perioada de testare;
- Δm_i reprezintă pierderile masice aferente perioadei intermediare i , determinate pe balanța analitică [g];
- Δt_i reprezintă durata atacului cavitațional [min];
- M_i reprezintă pierderile masice cumulate [g];
- ΔMDE_i reprezintă adâncimea medie de eroziune corespunzătoare duratei Δt_i ;

- $\rho = 7,81 \times 10^{-3}$ [g/mm³] reprezintă densitatea oțelului;
- $d_p = 15,9$ [mm] reprezintă diametrul suprafeței erodate de cavitație.

În baza acestor mărimi au fost ridicate curbele caracteristice de cavitație, ce aproximează valorile experimentale, folosind relațiile de mai jos, stabilite în cadrul laboratorului [14, 33, 61, 63, 66, 77, 90, 105, 124]:

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-Bt}) \quad (2.4)$$

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-Bt}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-Bt} \quad (2.5)$$

unde:

$MDE(t)$ - variația adâncimii medii de eroziune cu durata de atac al cavitației;

$MDER(t)$ - variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata de atac al cavitației;

t [min] - durata atacului cavitației;

A - reprezintă un parametru de scară, stabilit statistic pentru construirea curbei de mediere/aproximație, cu condiția ca abaterile punctelor experimentale față de această curbă să fie minime;

B - reprezintă un parametru de formă a curbei, ce rezultă din condițiile de aproximare a valorilor experimentale, cu eroare cât mai mică.

Utilizarea acestor curbe a permis analiza comportării și rezistenței suprafeței expuse la cavitație, la diferite durate, funcție de dispersia punctelor experimentale față de acestea. Astfel, din evoluțiile acestor curbe, după panta curbelor $MDE(t)$ și valoarea spre care tinde să se stabilizeze $MDER(t)$ se remarcă comportari și rezistențe diferite în funcție de tipul de tratament ales.

Pentru reducerea erorilor de experiment (cum ar fi defecte de material, erori de cântărire, abateri de la valorile prestabilite ale parametrilor funcționali ai aparatului, etc.) s-a recurs la prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale, cu verificarea nivelului erorilor. În prelucrare s-au utilizat valorile experimentale obținute pe cele trei probe din fiecare set și s-au calculat valoarea medie a pierderilor masice, adâncimile medii de eroziune MDE (cu relația 2.2), respectiv vitezele medii de pătrundere a eroziunii $MDER$ (cu relația 2.3). Pentru această verificare statistică s-a construit banda de dispersie. Prelucrarea statistică a permis determinarea erorii standard de estimare și a curbelor de regresie polinomiale. Avantajul utilizării curbelor de regresie constă în faptul că ele oferă o imagine mai exactă asupra rezultatelor experimentale.

Curbele de regresie au fost obținute, după caz, cu ajutorul programelor Microsoft Excel sau Mathcad. 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 experimentale. În plus, programul mai afișează ecuația curbei de regresie și coeficientul de corelare al acesteia. Ecuația generală a curbei de regresie polinomiale este [33, 61, 63]:

$$Y = a \cdot x \cdot (1 - e^{-bx}) \quad (2.6)$$

unde:

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

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

$$s^2 = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.7)$$

unde:

- s^2 este dispersia parametrului calculat (pierderi masice cumulate, adâncimea medie cumulată, timp, etc.);
- n este numărul încercărilor efectuate;
- x_i este valoarea experimentală a parametrului calculat;
- \bar{x} este media aritmetică a valorilor parametrului calculat.

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

$$s_{xy} = \left[\frac{\sum (y_i - Y_i)^2}{n-1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

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 (vezi exemplul din fig.2.15), care reprezintă numărul de puncte experimentale ce trebuie să se regăsească în banda de dispersie, pentru ca aceasta să poată fi considerată bună. Limita superioară a intervalului de toleranță, notată cu S , s-a obținut prin adunarea valorii erorii standard de estimare cu valoarea dată de curba de regresie. Limita inferioară a intervalului de toleranță, notată cu I , s-a obținut prin scăderea valorii erorii standard de estimare din valoarea dată de curba de regresie.

Pentru intervale de toleranță de 99% sau 95%, limitele intervalului s-au calculat astfel:

- *Interval de toleranță 99%:*

$$P99S(xc) = YmE(xc) + 3s_{xy}; P99I = YmE(xc) - 3s_{xy}; \quad (2.9)$$

- *Interval de toleranță 95%:*

$$P95I(xc) = YmE(xc) + 2s_{xy}; P95I = YmE(xc) - 2s_{xy}; \quad (2.10)$$

unde, în cadrul acestei teze:

P99S(xc) – limita superioară a intervalului de toleranță;

P99I(xc) – limita inferioară a intervalului de toleranță;

y_1, y_2, y_3 – adâncimile medii cumulate de eroziune, corespunzătoare fiecăreia dintre cele trei probe;

y_m - media aritmetică a adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii, aferente celor trei probe;

$YmE(xc)$ - curba analitică de regresie.

Bordeașu [14], pornind de la propriile relații stabilite și din interpretarea curbelor de variației MDE(t) și MDER(t) cu durata de atac cavitațional t și folosind indicațiile din ASTM G32-2010 [124], a stabilit cele două relații pentru parametrii rezistența normalizată la cavitație (R_{ns}) și rezistența la cavitație (R_{cav}), astfel:

$$R_{ns} = \frac{v_s}{v_{se}} \quad (2.11)$$

unde:

R_{ns} - rezistența la cavitație normalizată;

v_s – valoarea la care adâncimea de pătrundere a eroziunii cavitaționale tinde să se stabilizeze, pentru materialul analizat;

v_{se} – valoarea la care adâncimea de pătrundere a eroziunii cavitaționale tinde să se stabilizeze, pentru un material etalon;

Cel de-al doilea parametru, des utilizat în aprecierea comportamentului la cavitație, rezistența la cavitație, R_{cav} , este definită ca invers al valorii la care tinde să se stabilizeze viteza medie de pătrundere a eroziunii în structura materialului, $MDER_s$, conform relației [66, 105, 124]:

$$R_{cav} = \frac{1}{MDER_s} [min/\mu m] \quad (2.12)$$

unde:

$MDER_s$ –reprezintă viteza medie de pătrundere a eroziunii la finalul perioadei de testare stabilite t .

Evaluarea cu acest parametru se face prin compararea cu valorile obținute pentru materialele de referință care, în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara sunt: oțelul inoxidabil OH12NDL, folosit în fabricarea paletelor turbinelor Kaplan de la Porțile de Fier I și oțelul slab aliat 41Cr4. Ambele oțeluri sunt considerate ca fiind cu bună rezistență la eroziunea produsă de cavitația generată de aparatul vibrator standard folosit în aceste experimente [14, 33, 45-47, 66, 88, 89].

2.3.2. Evaluarea pe baza energiei de deformare necesară declanșării curgerii materialului

În urma unor astfel de investigații R. Garcia și F.G. Hammit [44] au apreciat rezistența la cavitație K_R ca fiind proporțională cu energia de deformare UR (ultimate resilience – introdusă de Hobbs, fig.2.14), necesară declanșării curgerii materialului.

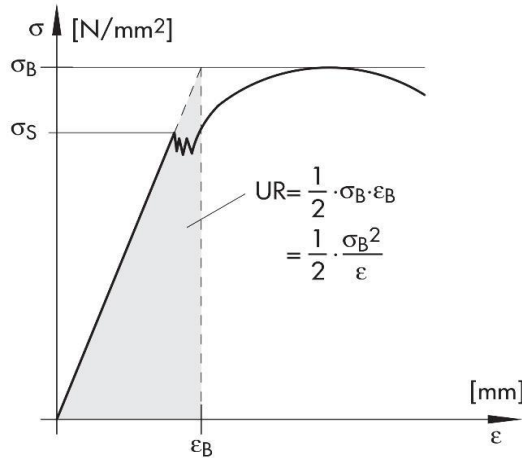


Fig.2.14. Curba de deformare a materialelor

Relația rezistenței la cavitație a lui Garcia și Hammit [44]

$$K_R = \sqrt{UR} \quad (2.13)$$

unde:

K_R - rezistența la cavitație;

UR [N/mm²] - energia minimă de deformare plastică;

σ_B [N/mm²] - rezistența la rupere;

σ_S [N/mm²] - limita de curgere;

ϵ [mm] - alungirea materialului.

Datorită aparatelor ultraperformante, de investigare structurală și a programelor de calcul, azi această metodă de evaluare nu mai este utilizată, locul ei fiind luat de analiza simultană a rezistenței la cavitație pe studierea structurii erodate la microscopul electronic cu baleiaj, și pe baza parametrilor definiți de curbele caracteristice, așa cum se procedează și în prezenta teză.

2.3.3. Evaluarea pe baza caracteristicilor materialului

Berger [4] descrie rezistența la cavitație, ținând cont de caracteristicile materialului astfel:

$$K_R = \frac{R_m^{1.071} \cdot W^{0.125} \cdot HV^{1.971}}{E^{0.562} \cdot R_{p0.2}^{0.618}} \quad (2.14)$$

unde:

R_m [N/mm²] - rezistența la rupere;

$R_{p0.2}$ [N/mm²] - limita de curgere;

E [N/mm²] - modulul de elasticitate;

HV - duritate Vickers;

W [N/mm²] - tensiunea de deformare.

Întrucât mecanismul de degradare prin eroziune, este dependent de structura materialului, influențată de tehnologiile de tratament, s-a renunțat și la această relație, datorită erorilor mari care apar în compartiiile metalelor din clase diferite, caracterizate de structuri diferite.

2.3.4. Evaluarea pe baza parametrului rugozitate

O altă metodă de evaluare a rezistenței la cavitația generată de aparatul vibrator, folosită în ultima perioadă în Laboratorul de cavitație al UPT [61, 63, 66, 90, 124], este cea a comparării valorilor calculate ale adâncimii medii de pătrundere a eroziunii MDE după 165 minute de cavitație, cu valorile rugozităților R_z măsurate pe suprafața cavitată.

Folosirea parametrului R_z este dată de faptul că acesta este o valoare medie măsurată pe o anumită lungime din suprafața cavitată chiar dacă există diferențe foarte mici față de valorile calculate ale adâncimii medii de eroziune MDE. Cauza este dată de faptul că modul de efectuare a măsurătorilor este puternic influențat de erodarea neuniformă a suprafeței de atac (prezența celor trei zone – marginală – de trecere – centrală) [46, 90].

În capitolul 7, din prezenta teză, se propune un nou mod de evaluare a rezistenței materialelor la eroziunea prin cavitație, și anume prin parametrul rugozitate R_z a suprafețelor afectate.

2.4. Concluzii

Materialele selectate pentru experimentări sunt destinate fabricării pieselor mobile din aparatura hidraulică, de comandă, distribuție și reglare, de tipul: sertare, ventile, etc, 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

3.1. Tratamente aplicate

Prezentul capitol își propune să analizeze influența microstructurii generate de tratamentul termochimic de carburare, combinat cu tratamentul termic de călire de suprafață prin inducție asupra uzurii prin cavitație generată într-un aparat vibrator standard asupra unui oțel slab aliat Cr-Mn.

Oțelul slab aliat 16MnCr5 având procente mici în carbon și elemente de aliere, efectul de mărire a durității prin călire este nesemnificativ, fiind necesară creșterea concentrației de carbon prin tratamente termochimice. Prin aplicarea unor astfel de tratamente se estimează o reducere semnificativă a costurilor de fabricație, respectiv a consumului de energie necesar obținerii unor rezultate asemănătoare prin alte metode.

Probele pentru experimente au fost realizate prin prelucrări mecanice prin așchiere (conform fig.2.6 capitolul 2) dintr-o bară cilindrică cu diametrul de 20 mm, supusă în prealabil unui tratamentului termic de recoacere pentru înmuiere.

Recoacere pentru înmuiere [78, 79, 81, 83] reprezintă un tratament termic preliminar aplicat oțelului cercetat înaintea prelucrărilor mecanice, având ca scop corectarea structurilor defectuoase (eliminarea structurilor dendritice, eliminarea tensiunilor interne și a ecrusărilor mecanice, finisarea și uniformizarea structurii) rezultate din procesul de elaborare a semifabricatelor, precum și asigurarea unor proprietăți tehnologice favorabile prelucrărilor ulterioare [98].

Tratamentul constă în încălzirea materialului la 670 ± 10 °C și menținerea, la această temperatură, timp de o oră, urmată de răcire lentă în cuptor.

Suprafața frontală de atac a fiecărei probe a fost rectificată și lustruită la o rugozitate $Ra=0,4 \div 0,8$ μm, conform cerințelor standard (ASTM G32-2010) și ca urmare a cutumei laboratorului, izvorâtă din experiența de peste 70 de ani, pentru evitarea dispersiei valorilor experimentale, ce pot fi afectate de rugozitatea obținută în urma debitării [10, 14, 18].

Ulterior prelucrării mecanice, o parte din probe au fost supuse tratamentului termochimic de carburare în mediu gazos.

Carburarea (sau cementarea) [78, 79, 81, 83] - reprezintă un tratament termochimic de îmbogățire în carbon a straturilor superficiale ale pieselor executate din oțeluri nealiate sau aliate cu un conținut redus de carbon (până la 0,25 %C) cunoscute sub denumirea de oțeluri de cementare, având ca scop obținerea în suprafața pieselor, pe o adâncime de circa 1–2 mm, a unui conținut în carbon de 0,7 ... 1,1 %.

Literatura obligă derularea carburării la temperaturi superioare punctului critic Ac_3 (cuprinse între $870 \div 950$ °C), în mediu solid, lichid sau gazos, capabile să

pună în libertate atomii de C și menținere în funcție de adâncimea dorită, urmată de răcire în anumite condiții.

Alegerea procedurii de carburare se face din considerente tehnico-economice, ele clasificându-se astfel [81, 83]:

- carburarea în mediu solid (mangal, cocs, cărbune de proveniență animală) și activatori (carbonații metalelor alcalino-pământoase sau alcaline, cloruri);

- carburarea în mediu lichid (compoziția mediului: 75-85% Na_2CO_3 ; 10-15% NaCl și 5-10% SiC);

- carburarea în mediu gazos (medii naturale de gaz, medii produse prin piroliza unor hidrocarburi, în atmosferă controlată cu amestec de 92÷0,95% endogaz și 5 ÷8% metan);

- carburare în plasmă (carburare ionică).

În prezenta lucrare, am optat pentru carburare în mediu gazos. Pentru aceasta, materialul a fost introdus în cuptor cu atmosferă controlată și menținut la temperatura de (880 ± 10) °C, superioară punctului critic A_{c3} , timp de 8 ore, urmată de răcire lentă în cuptor până la 400 °C, apoi în aer.

În urma tratamentului, adâncimea utilă de cementare, caracterizată prin adâncimea la care conținutul de C în strat a scăzut până la o valoare limită, luată convențional de 0,40÷0,45% pentru oțelurile nealiatate, respectiv 0,30÷0,35% pentru oțelurile aliate [83], a ajuns la cca. 0,8÷1 mm.

După carburare, un set de probe a fost supus unui tratament de călire de suprafață prin inducție urmată de revenirea la temperatura joasă, care vizează obținerea unei structuri martensitice în stratul marginal fără tensiuni interne prea mari, care să confere o duritate superficială mare (în jur de 59÷65 HRC), o rezistență mare la uzură și presiune de contact. În acest fel se poate asocia piesei o tenacitate ridicată a miezului (acesta rămâne relativ moale după călire datorită conținutului scăzut în carbon), o duritate înaltă a suprafeței, rezistență la uzură, la presiunea de contact și la oboseală [78, 79, 81, 83, 84].

S-a recurs la călirea de suprafață prin inducție deoarece utilizează proprietățile curenților induși de înaltă frecvență, de a se concentra în suprafața conductorilor, pe o adâncime cu atât mai mică cu cât frecvența este mai mare [78, 74, 81, 83, 84, 86]. Astfel, la trecerea curentului alternativ de înaltă frecvență, printr-un inductor se formează un câmp electromagnetic variabil, ce induce, în piesa care reprezintă indusul (aflată în interiorul inductorului), un flux electromagnetic variabil atât ca valoare, cât și ca direcție, deci o tensiune electromotoare. Ca urmare a acestui efect pelicular, energia indusă în straturile de suprafață ale piesei este maximă și se transformă în căldură, prin efect Joule, producând încălzirea zonelor de la suprafață. Călirea superficială folosește acest principiu la trecerea unui curent alternativ prin inductor, stratul superficial al piesei plasate în inductor ajunge, după câteva secunde, la o temperatură ridicată în domeniul austenitic.

Aducerea bruscă a oțelului la temperaturi supracritice, cu vitezele mari de încălzire prin inducție ridică valorile punctelor critice A_{c1} , A_{c3} și A_{cm} [82] determină o creștere a vitezei de germinare a austenitei, iar absența timpului de menținere la temperatura de austenitizare favorizează o finisare accentuată a grăunților cristalini de austenită (punctajul 10–12), comparativ cu călirea volumică la care încălzirea se face în cuptor (punctajul 7 -8).

Prin răcirea acestui strat (cu un duș de apă, ulei sau alt mediu) se realizează călirea martensitică.

Viteza de răcire mai mare decât cea critică de călire a condus la obținerea în stratul de suprafață a unei microstructuri optime cu o duritate maximă.

Ținând seama de aceste considerente, pentru probele cercetate în cadrul tezei, au fost calculați parametrii procesului de călire prin inducție, astfel: puterea specifică, $\Delta P=0,9 \text{ kW/cm}^2$; durata încălzirii, $t = 4\text{s}$; frecvența, $f=32 \text{ kHz}$; răcirea în jet de apă.

Întrucât elementele mobile ale echipamentelor hidraulice sunt solicitate în special la uzură, eroziune cavitațională și oboseală, s-a urmărit ca grosimea stratului călit, conform recomandărilor din [83] să nu depășească $1,5\div 3 \text{ mm}$. După călire piesele au fost supuse unui tratament termic de revenire la temperatură joasă, care s-a realizat conform procedurilor descrise în [74, 83].

Transformarea martensitică nefiind completă, în stratul călit a rămas o anumită cantitate de austenită reziduală, ceea ce a indus tensiuni interne semnificative.

În timpul tratamentului termic final de revenire la $180 \text{ }^\circ\text{C}$, timp de 90 de minute, s-a favorizat descompunerea soluției solide suprasaturate, cu precipitarea unor particule fin dispersate de carburi ϵ coerente cu rețeaua de bază, având drept rezultat diminuarea tensiunilor interne.

Pentru identificare, în descrierea de mai jos, sunt utilizate următoarele notații:

- 1 - proba din material în stare recoaptă;
- 2 - proba din material în stare carburată,
- 3 - proba din material tratat Duplex.

Regimul de tratament, aplicat oțelului 16MnCr5, este realizat conform ciclogramei din fig.3.1.

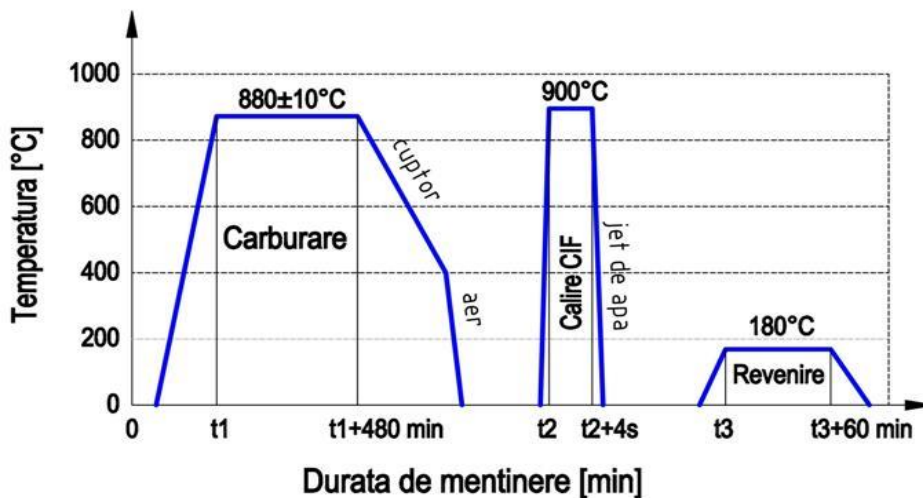


Fig.3.1. Ciclograma tratament Duplex.

Efectul de mărire a durtății prin călire, după cum se va vedea mai jos, este vizibil doar în stratul carburat, cu conținut crescut în C, substraturile adiacente celui carburat păstrându-și caracteristicile materialului de bază.

3.2. Teste de cavitație

3.2.1 Curbe caracteristice

Pentru aprecierea comportării la eroziune cavitațională, probele au fost supuse atacului cavitațional pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, timp de 165 minute, această durată fiind împărțită, după cum s-a menționat la capitolul 2, în 12 perioade (câte una de 5 minute, respectiv 10 minute, iar următoarele 10 perioade de câte 15 minute). Pe tot parcursul experimentului s-a respectat procedura de cercetare [29,112], pentru toate cele trei probe testate, din fiecare regim (în total 9 probe).

În fig.3.2 sunt date imagini fotografice al suprafețelor degradate, realizate la timpi semnificativi de expunere la cavitație.

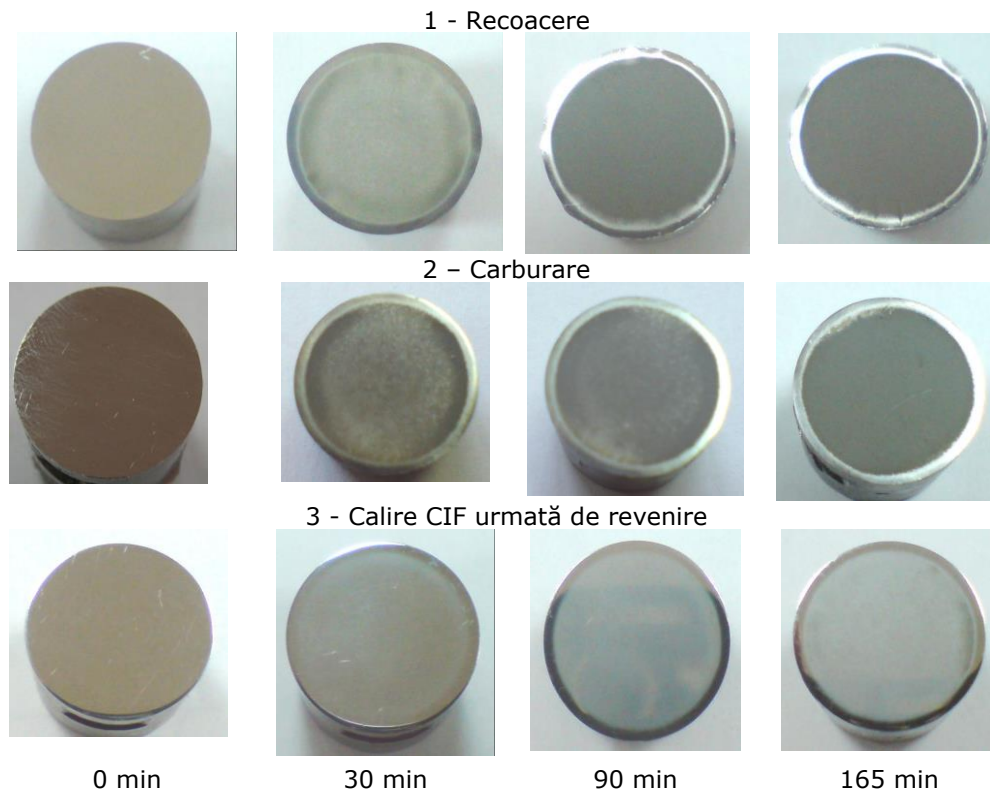


Fig.3.2. Degradarea suprafeței de atac la diferite durate de atac al cavitației

Pentru evaluarea comportării materialului la eroziune cavitațională, pentru fiecare regim de tratament aplicat, s-a respectat metodologia de evaluare și de predicție a eroziunii prezentată în capitolul 2, subcapitolul 2.3 [14, 73, 124].

Astfel, au fost ridicate curbele caracteristice de eroziune cavitațională prezentate în fig.3.3, 3.4 și 3.5, care indică variația cu durata atacului cavitației, generată de aparatul vibrator standard, a pierderilor cumulate de masă $m(t)$, a vitezei de eroziune $v(t)$, respectiv a mărimilor derivate din acestea: adâncimea medie de

pătrundere a eroziunii MDE(t), respectiv viteza medie de pătrundere a eroziunii MDER(t).

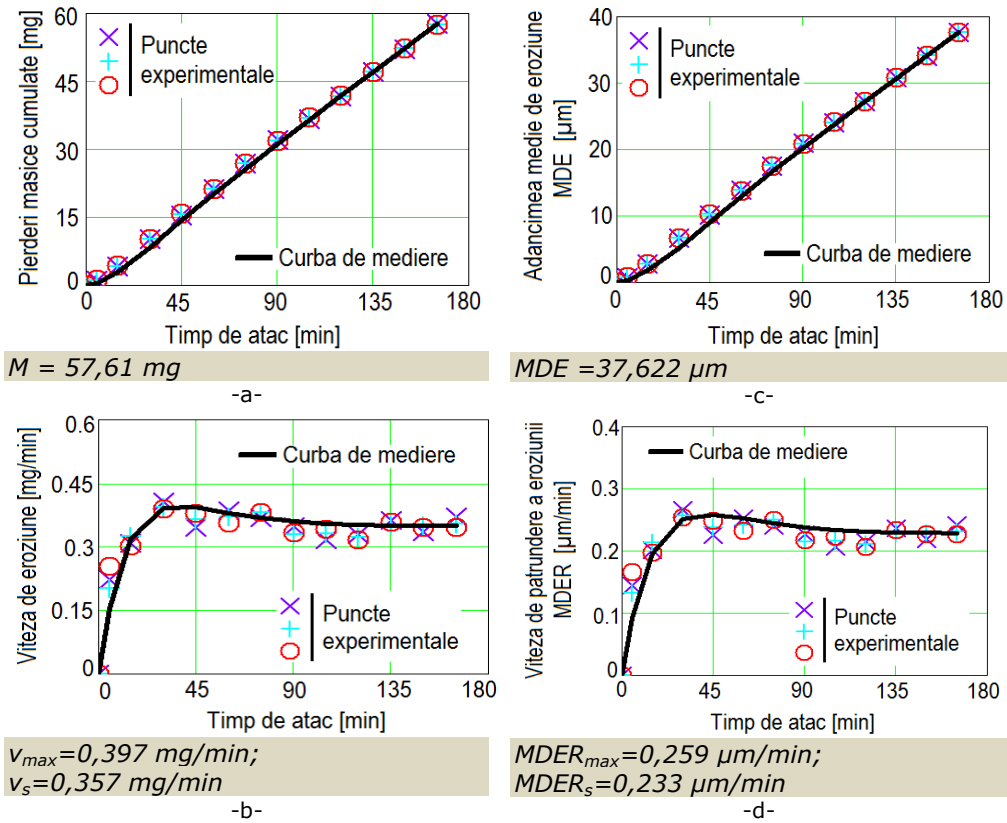
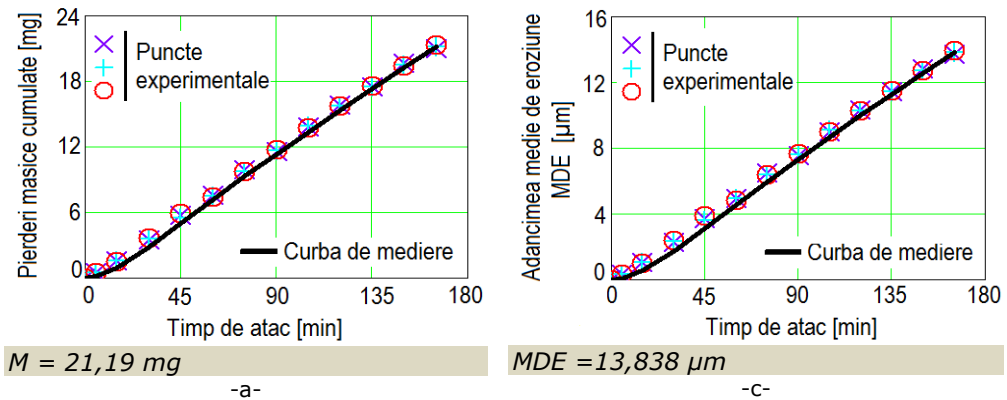


Fig.3.3. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 1, din oțelul 16MnCr5, aflat în stare recoaptă: a – Pierderi masice cumulate; b – Viteza de eroziune; c – Adâncimea medie de eroziune; d – Viteza medie de pătrundere a eroziunii



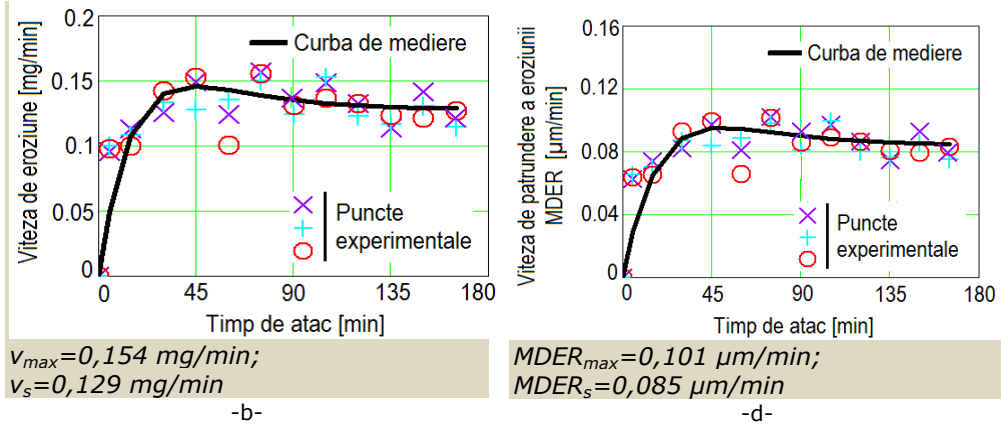


Fig.3.4. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 2, din oțelul 16MnCr5, aflat în stare carburată: a – Pierderi masice cumulate; b – Viteza de eroziune; c – Adâncimea medie de eroziune; d – Viteza medie de pătrundere a eroziunii

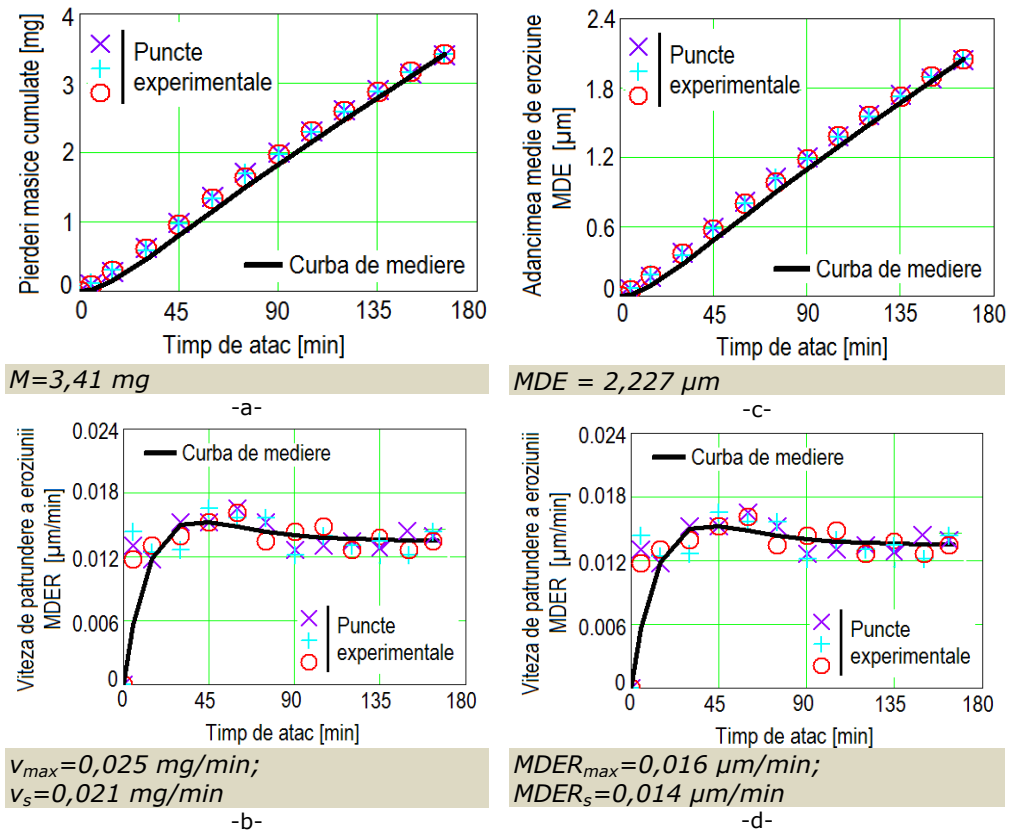


Fig.3.5. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 3, din oțelul 16MnCr5, tratat Duplex (carburare + călire CIF): a – Pierderi masice cumulate; b – Viteza de eroziune; c – Adâncimea medie de eroziune; d – Viteza de pătrundere a eroziunii

Analiza dispersiei valorilor (punctelor) experimentale, față de curbele de mediere, conduce la următoarele concluzii:

- indiferent de starea oțelului (recopt, carburat sau tratat Duplex) și după 60 minute de expunere la cavitație dispersia este una redusă, specifică materialelor cu foarte bună rezistență la cavitația vibratoare, generată de aparatul standard utilizat [10, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 32, 33, 61, 63, 66, 73, 75, 90, 91, 124]. Această dispersie redusă denotă și o omogenitate ridicată din punct de vedere structural, dar și o uniformitate a proprietăților mecanice în suprafața cavitată;
- în anumite perioade de atac al cavitației (75-165 minute-pentru starea reacoaptă, 75-120 minute-pentru starea carburată, respectiv 45-75 minute și 120-150 minute-pentru starea Duplex), seturile de probe, testate pentru fiecare stare, se comportă identic. Intervalul ridicat pentru starea reacoaptă se explică prin faptul că, dincolo de omogenitatea structurală, are loc și o ecruisare timpurie (începând de la minutul 60) care contribuie la creșterea durității suprafeței expuse cavitației, caracteristică cu importanță majoră în creșterea rezistenței la solicitările ciclice ale microjeturilor și undelor de șoc, create la implozia bulelor cavitaționale; Intervalele reduse de comportare identică a celor trei probe carburate și tratate Duplex își are explicația în generarea diferită a fisurilor și expulzarea de material, ca urmare a sporirii caracteristicilor mecanice (în special a durității), care conduce la scăderea substanțială a adâncimii de eroziune și a vitezei de pătrundere;
- curbele de mediere MDE(t), evoluează liniar pe cea mai mare parte a duratei cavitației, fenomen specific, după cum s-a mai afirmat, materialelor cu foarte mare rezistență la eroziunea cavitației;
- diferențele foarte mici, dintre valorile maxime și cele spre care tind să se stabilizeze vitezele de eroziune (indiferent de tip: viteza pierderilor de masă, sau viteza medie de pătrundere a eroziunii) este, de asemenea, o caracteristică a oțelurilor cu bună și foarte bună rezistență la eroziunea cavitației;
- având în vedere scara vitezelor de eroziune (fig.3.3.b, 3.4.b și 3.5.b), se poate afirma că prin aplicarea tratamentelor termochimic de cementare și Duplex structura suferă modificări din punct de vedere al proprietăților mecanice, dar și al gradului de finețe (vezi și subcapitolele de analiză pe baza rugozității, de investigație structurală și analize difracționale), care determină valori reduse ale pierderilor de masă, adâncimilor medii de eroziune și vitezelor medii de eroziune.

Verificarea acurateții cercetării experimentale este dată de curbele de regresie, din fig.3.6. Prin prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale s-a dorit reducerea erorilor de experiment (cum ar fi defecte de material, erori de cântărire, abateri de la valorile prestabilite ale parametrilor funcționali ai aparatului, etc.) și verificarea nivelului erorilor, conform metodologiei descrise în *capitolul 2*, subcapitolul 2.3 [14, 33, 35].

În fig.3.6, pe lângă curbele de regresie sunt date și valorile parametrilor statistici calculați pentru fiecare regim în parte.

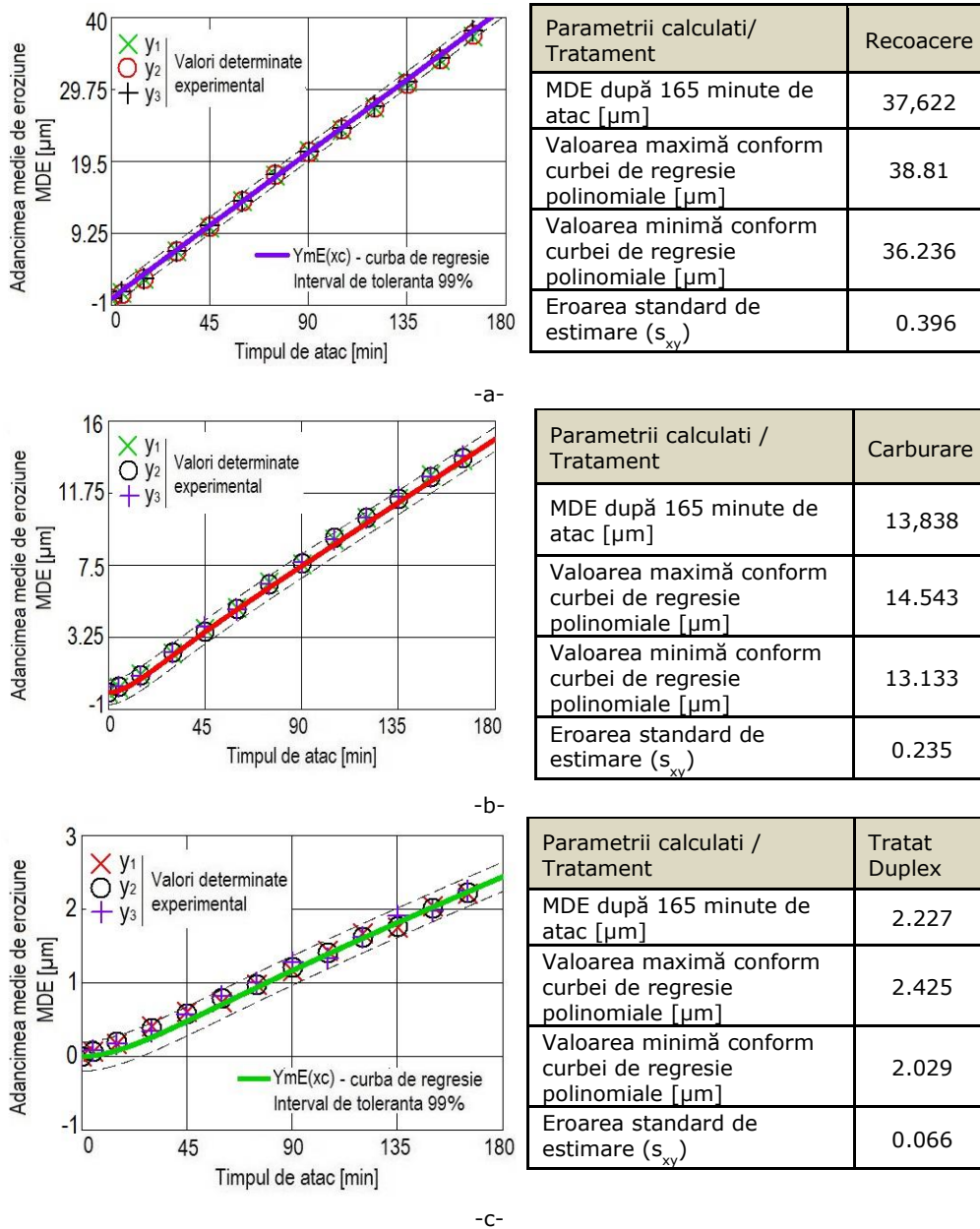


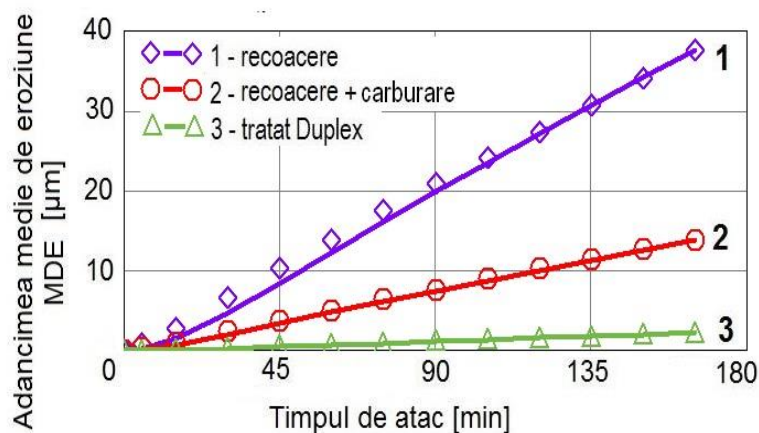
Fig.3.6. Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici pentru setul de probe supus tratamentului de: a – recoacere; b – cementare; b - tratat Duplex.

Valoarea mică a abaterii standard (sub 0,5), pentru oricare dintre regimuri, conform datelor afișate, sugerează că eroziunea produsă în suprafețele expuse cavitației, este realizată în mod uniform [33, 35, 61, 63, 96, 124]. Valorile reduse ale erorii standard sunt expresii ale uniformității proprietăților mecanice din

structura suprafeței, responsabile de rezistența la impactul cu microjeturile și undele de șoc, dezvoltate la implozia bulelor de cavitație [90].

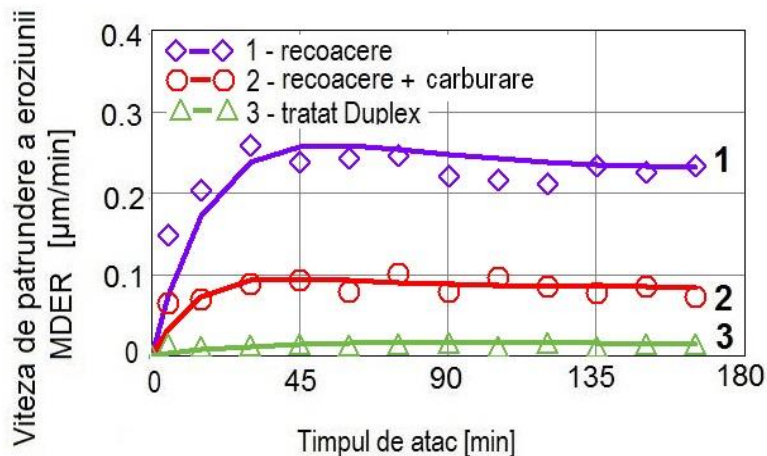
Intervalul de toleranță de 99 % certifică repetabilitatea rezultatelor pentru cele trei probe testate, ca urmare a omogenității structurale și a valorilor apropiate ale proprietăților mecanice (responsabile de comportarea și rezistența la atacul cavitației) uniform dispersate în suprafețele expuse cavitației [39, 40, 41, 44, 55, 56, 107, 108, 109].

Analiza comparativă a rezistenței la cavitație a celor trei regimuri este realizată pe baza curbelor caracteristice specifice: adâncimea medie cumulată pătrunderii eroziunii MDE(t), respectiv vitezei de pătrundere a eroziunii MDER(t), prezentate în fig.3.7 și 3.8.



MDE1 = 37,622 μm ; MDE2 = 13,838 μm ; MDE3 = 2,227 μm

Fig.3.7. Comparatii ale variației adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitațional, specifice celor trei regimuri de tratament



MDER1 = 0,233 $\mu\text{m}/\text{min}$; MDER2 = 0,085 $\mu\text{m}/\text{min}$; MDER3 = 0,014 $\mu\text{m}/\text{min}$

Fig.3.8. Comparatii ale variației vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitațional, specifice celor trei regimuri de tratament

Din evoluțiile acestor curbe, după panta curbelor $MDE(t)$, fig.3.7 și valoarea spre care tinde să se stabilizeze $MDER(t)$ (în jurul valorii $MDER_s$), fig.3.8, se observă rezistențe diferite ale celor trei tipuri de probe.

Astfel, adâncimea medie de eroziune cavitațională, care este proporțională cu pierderile masice, are valori minime la început datorita valorilor neglijabile ale acestora. Aceasta perioadă este caracteristică producerii de fisuri și deformații elasto-plastice [2, 14]. În schimb, valorile ridicate ale vitezelor experimentale (v sau $MDER$), din primele 15 minute, sunt efectul eliminării prafului și ruperii vârfurilor asperităților, care nu este o caracteristică a mecanismului mecanic de comportare a materialului la impactul cu microjeturile și undele de șoc generate prin hidrodinamica cavitației vibratoare [10, 14, 38, 42].

După această perioadă se constată o creștere semnificativă a pierderilor de masă. După minutul 45, indiferent de stare de regim, evoluția este aproximativ liniară, fenomen caracteristic materialelor omogene din punct de vedere al structurii și proprietăților mecanice [10, 14, 38, 42]. Utilizarea tratamentelor termochimice de carburare, respectiv a unor combinații de tratamente termice și termochimice sub forma unor tratamente tip Duplex (carburare urmată de călire CIF + revenire), aduce o îmbunătățire substanțială a comportării și rezistenței la cavitație. Astfel, comparativ cu starea recoaptă (1), la sfârșitul perioadei de testare (165 minute), adâncimea medie de pătrundere a eroziunii în probele carburate (2) scade de cca. 2,7 ori, iar a probelor tratate Duplex (3) scade de aproximativ 17 ori.

Evoluțiile curbelor de variație a vitezei de pătrundere a eroziunii $MDER(t)$, fig.3.8.b, arată, de asemenea, comportări diferite în funcție de starea de tratament.

Astfel, probele recoapte (1), după perioada inițială, prezintă pierderi masice masive datorate expulzărilor masive de grăunți cristalini și părți din aceștia. Conform detaliilor oferite în paragrafele anterioare, din capitolul 2, s-a observat că materialul în această stare se caracterizează prin microstructură grosieră, compusă din ferită și perlită, constituenți cu slabe caracteristici mecanice și de rezistență la eroziune cavitațională. După această perioadă, viteza de eroziune tinde să se stabilizeze la valori inferioare celei maxime, datorită ecruisării materialului și pătrunderii aerului în cavernele mari rezultate, comportare caracteristică materialelor cu plasticitate ridicată [38].

Diferențele de comportare și rezistență la cavitație, conferite de cele trei tipuri de tratamente, pot fi explicate prin:

1. oțelul în stare carburată (notat cu 2) prezintă o alură asemănătoare stării recoapte, dar valoarea vitezei, din zona de stabilizare, este de cca 2,7 ori mai mică, din cauza conținutului ridicat de carbon și al carburilor metalice din stratul superficial, rezultate în urma tratamentului termochimic, ceea ce îi conferă duritate și caracteristici mecanice mărite [53, 54, 58, 83]. Corelat cu imaginile microscopice de la subcapitolul 3.3 de investigare structurală, sporul de rezistență la cavitație este dat de mecanismul de eroziune a stratului suprafeței, bogat în carburi + perlită, care nu a fost depășit de eroziune; stratul de bază fiind cu o structură de perlită și ferită, care nu a fost atacat de cavitație;

2. la oțelul tratat Duplex (notat 3), viteza de eroziune $MDER$ crește constant și tinde să se stabilizeze la valoarea maximă, comportare specifică materialelor cu duritate și caracteristici mecanice ridicate [10, 14, 44, 61, 63, 77, 105]. Valoarea acesteia este de cca. 17 ori mai mică, comparativ cu probele recoapte (notate cu 1) și de cca. 6 ori mai mică comparativ cu probele carburate (notate cu 2). Acest lucru se datorează structurii de martensită fină din stratul marginal, constituent cu cea mai bună comportare la eroziune cavitațională [71, 83, 98].

3.2.2. Măsurători de rugozitate

Degradarea suprafeței atacate prin cavitație este pusă în evidență de profilogramă, respectiv de valorile rugozității rezultate după 165 minute. Prin urmare, la finalizarea încercărilor s-au realizat măsurători de rugozitate, pe un aparat tip Mitutoyo SJ 201 P. Acestea au fost efectuate pe trei direcții dispuse la 120°, fig.3.9-3.12.

Pentru analiză am luat în considerare adâncimea medie a rugozității R_z în zece puncte, ale cărei valori au fost măsurate pe un profil cu lungimea de 4 mm, care cuprinde atât zona centrală cât și zona de trecere.

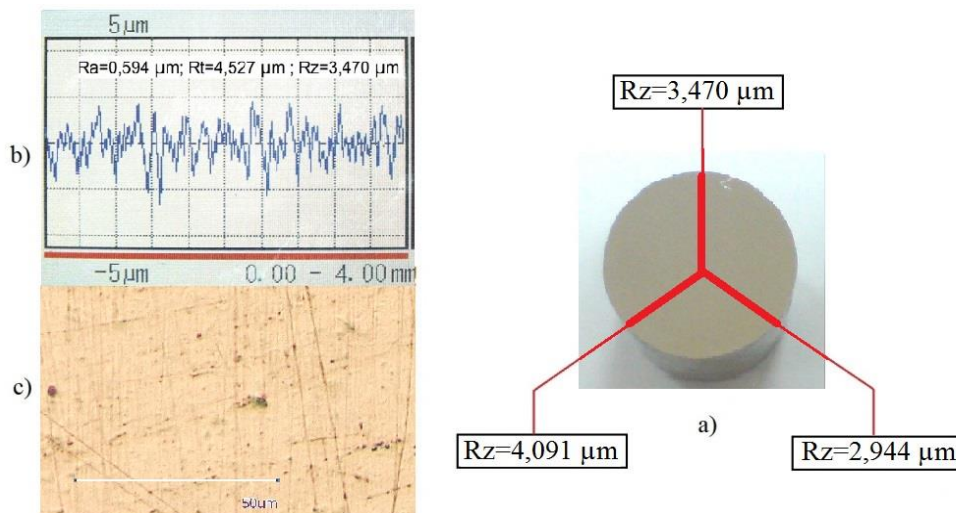


Fig.3.9. Rugozitatea suprafeței lustruite înainte de testarea cavitațională: a – rugozitățile probei pe trei direcții, b- variația rugozității suprafeței pe una dintre direcții, c-micrografia suprafeței x 1750.

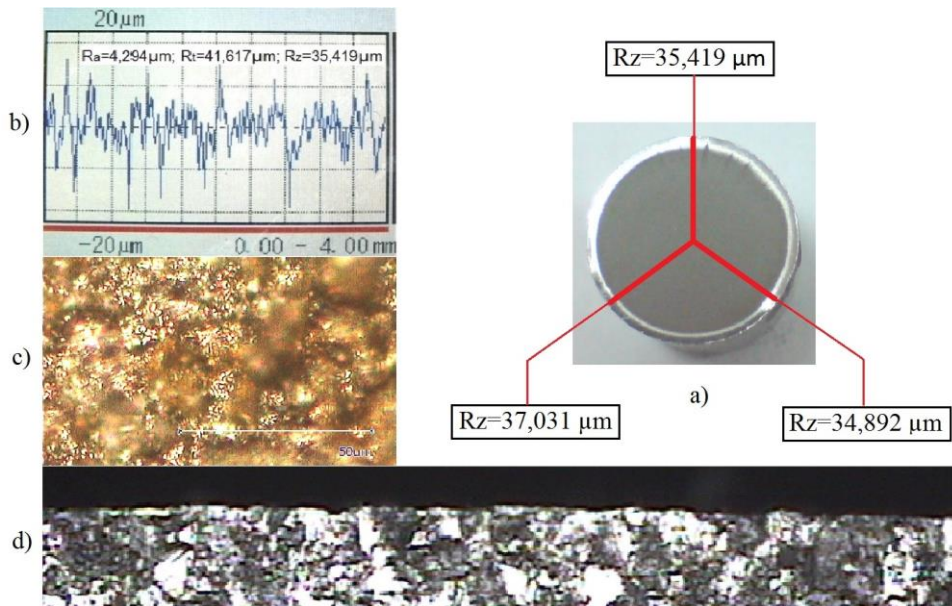


Fig.3.10. Proba în stare recoaptă și testată la cavitație: a - rugozitățile probei pe trei direcții, b- variația rugozității suprafeței pe una dintre direcții, c-micrografia suprafeței x1750, d- imagine SEM a suprafeței în secțiune x200.

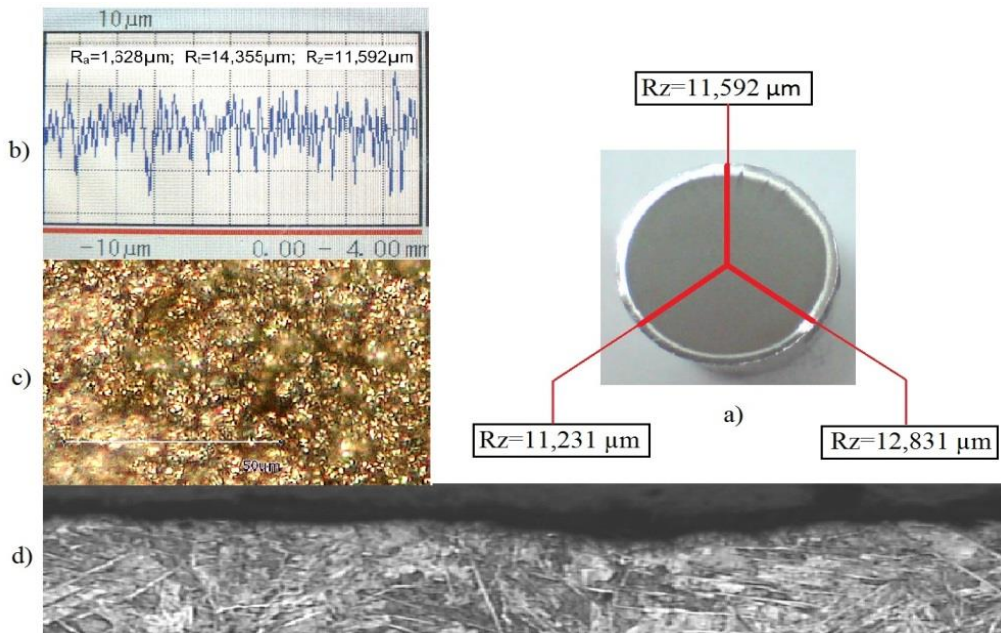


Fig.3.11. Proba în stare recoaptă + carburată, testată la cavitație: a-rugozitățile probei pe trei direcții, b-variația rugozității suprafeței pe una dintre direcții, c-micrografia suprafeței x 1750, d- imagine SEM a suprafeței în secțiune x200.

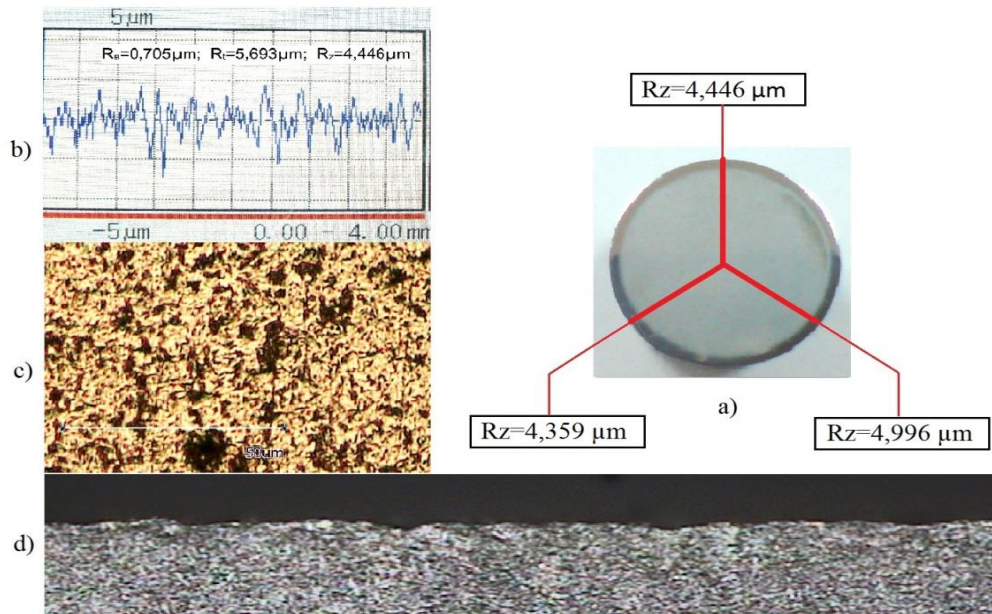


Fig.3.12. Proba tratată Duplex și testată la cavitație: a - rugozitățile probei pe trei direcții, b - variația rugozității suprafeței pe una dintre direcții, c - micrografia suprafeței x 1750, d- imagine SEM a suprafeței în secțiune x200.

Din analiza valorilor rugozităților măsurate, respectiv a microstructurii vizualizate cu ajutorul microscopului optic, reiese faptul că suprafețele cavitate prezintă un relief care variază de-a lungul razei suprafeței de atac. Astfel se disting trei zone:

- zona centrală a suprafeței, caracterizată prin distrugeri moderate;
- zona de trecere, caracterizată de distrugeri masive și adâncimi mari de eroziune;
- zona de margine, cca. 2 mm pe conturul suprafeței de atac care nu a suferit deteriorări.

3.2.3. Corelația dintre adâncimea de pătrundere a eroziunii - rezistența la cavitație - rugozitate.

Pentru evidențierea rezistenței oțelului 16MnCr5, opusă atacului cavitației vibratoare, în histograma din fig.3.13 sunt comparate valorile principalilor parametri ce caracterizează rezistența la cavitație pentru stările recoaptă, carburată, respectiv tratată Duplex, cu cele aferente oțelului etalon 41Cr4 (în stare recoaptă). Acești parametri sunt: adâncimea medie de pătrundere a eroziunii MDE calculate la finalul testului (după 165 minute), rugozitatea R_z , măsurată pe suprafața cavitată, respectiv rezistența la cavitație R_{cav} .

Precizare: Oțelul 41Cr4 este luat ca referință pentru oțelurile aliate, datorită bunei rezistențe la eroziunea cavitației, având o largă utilizare la fabricarea

sertarelor aparatelor de comandă, distribuție și control din sistemele hidraulice de acționare [10, 14]. Rezistența la cavitație, R_{cav} , este exprimată prin $1/MDER_s$ (inversul valorii spre care tinde să se stabilizeze curba $MDER(t)$), iar parametrul R_z , de profil al rugozității este cel măsurat cu aparatul Mitutoyo, conform procedurii descrise în capitolul 2.

Din compararea valorilor rugozităților R_z , măsurate pe suprafețele degradate de cavitație, aferente celor trei tipuri de proceduri de tratament, constatăm că rugozitatea probelor recoapte (notate cu 1) este de cca 3 ori mai mare decât cea a probelor carburate (notate cu 2), respectiv de cca 8 ori mai mare decât a probelor tratate Duplex (notate cu 3).

Între valorile R_z măsurate și adâncimea medie de eroziune, cumulată finală, obținută în urma testelor de cavitație, prin calcule, se observă foarte mici diferențe, care sunt firești, dat fiind faptul că unele sunt obținute prin măsurare, pe o lungime redusă (de maxim 4 mm), cu un aparat de o anumită precizie (aparatul Mitutoyo), iar adâncimile MDE sunt raportate la întreaga suprafață, expusă cavitației și iau în calcul toți factorii ce influențează pierderile de masă și implicit, profunzimea degradării (praful abraziv, vârfurile asperităților, etc), care nu se pot elimina în procesul de cântărire [10, 14, 61, 63, 66, 77, 90, 105].

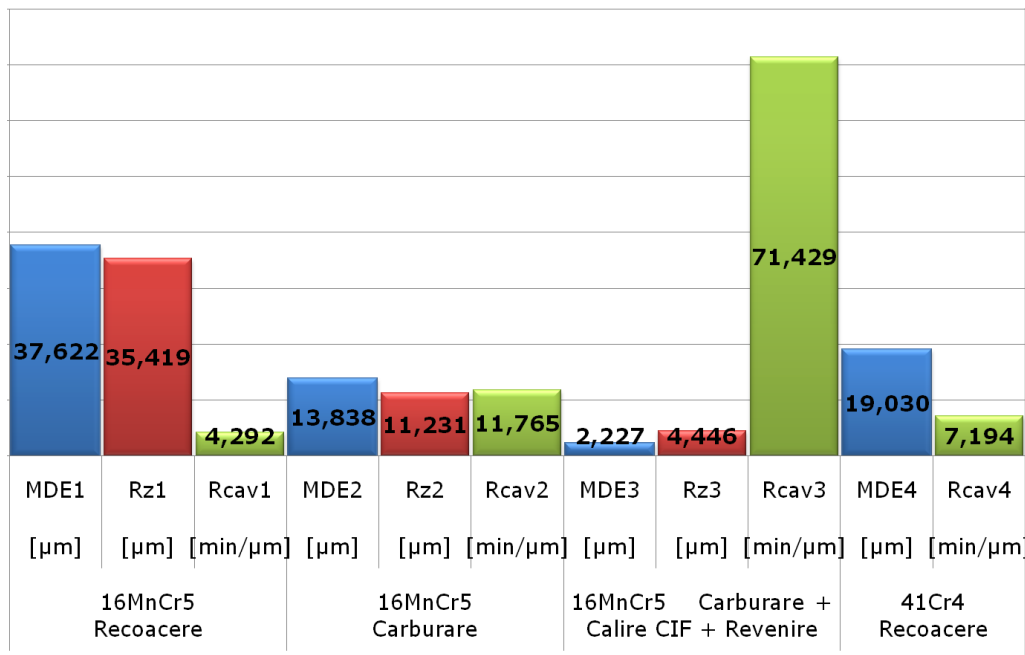


Fig.3.13. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat

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.

Din compararea cu 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 călire superficială prin curenți de înaltă frecvență, se realizează creșteri importante, în special prin tratamentul duplex, 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.

Această comparație, cu oțelul etalon, sugerează că suprafețele pieselor aparatelor hidraulice de comandă, distribuție și reglare, ce funcționează în zone cu curenți cavitaționali, să fie durificate, în vederea îmbunătățirii caracteristicilor sale de rezistență la eroziunea cavitației.

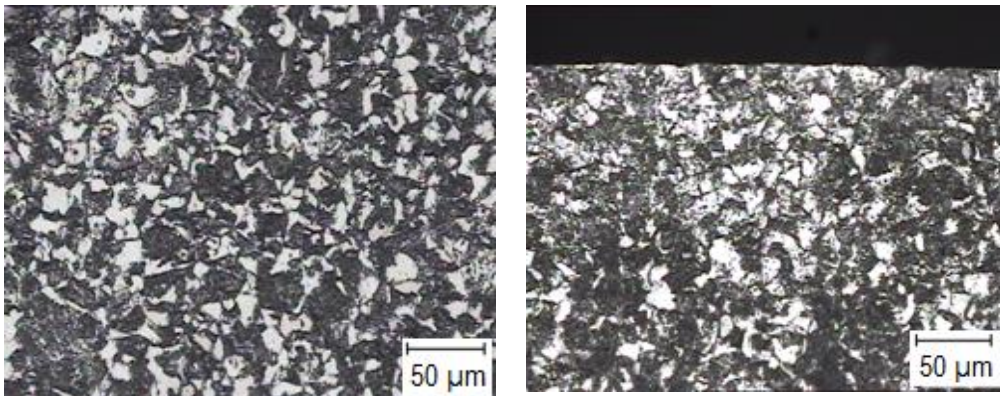
Ținând cont de aceste considerente, coroborate cu prețul scăzut al materialului și condițiile de prelucrare mecanică prin așchiere a materialului în stare recoaptă, și de posibilitatea aplicării ulterioare a unor astfel de tratamente termochimice și Duplex, justifică pe deplin alegerea acestui material în realizarea de sertare și ventile pentru aparatura din sistemele hidraulice de acționare.

3.3. Investigații microstructurale

3.3.1. Microscopie optică.

Investigațiile realizate cu ajutorul microscopului optic la diferite grade de mărire au pus în evidență natura constituenților structurali aferenți fiecărei etape de tratament în parte, așa cum reiese din imaginile de mai jos, fig.3.14, 3.15, 3.16.

În stare recoaptă fig.3.14 microstructura obținută este constituită din ferită separată între temperaturile critice $Ar3...Ar1$ și din perlită formată la atingerea temperaturii $Ar1$ [49, 82, 83]. La un conținut în carbon de cca. 0,16% ar trebui ca proporția de ferită proeutectoidă să fie mai mare decât cea de perlită. Prezența elementelor de aliere (Cr și Mn) în compoziția chimică a oțelului micșorează concentrația în carbon a punctului eutectoid și mărește stabilitatea la transformare a austenitei subrăcite. De aceea, microstructura obținută este formată din 65 – 70 % perlită (culoare închisă) și 30 – 35 % ferită (culoare albă).

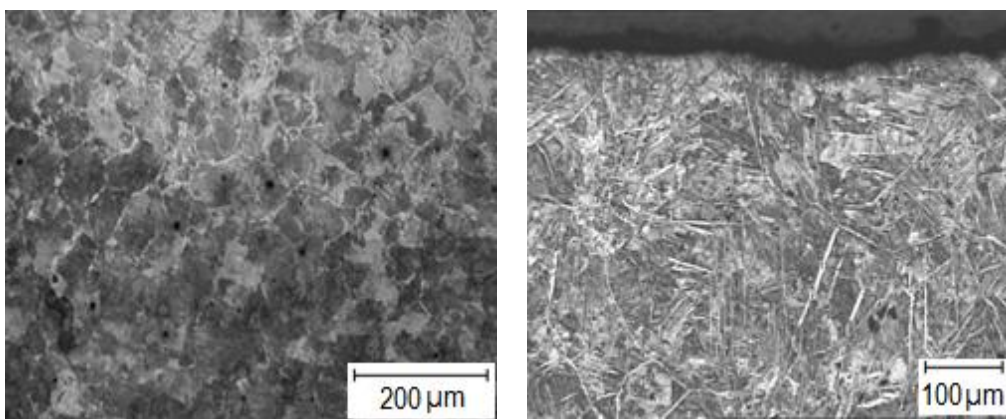


- a -

- b -

Fig.3.14. Microstructura oțelului 16MnCr5 în stare recoaptă: a - x 200 (imaginea frontală a suprafeței recoapte); b - x 200 (imaginea în secțiune a stratului)

Tratamentul termochimic de carburare desfășurat la o temperatură superioară punctului critic Ac_3 , într-un mediu gazos capabil să pună în libertate atomi activi de carbon, a favorizat formarea în stratul de suprafață a unei microstructuri de austenită bogată în carbon [83]. La temperatura de $880 \pm 10^\circ C$ folosită pentru tratament, concentrația în carbon a stratului nu a depășit limita de solubilitate a acestui element în austenită și ca urmare, prin răcire lentă au rezultat trei substraturi caracteristice (fig.3.15) și anume: 1 – perlită + carburi (oțel hipereutectoid); 2 – perlită (oțel eutectoid); 3 – perlită + ferită (oțel hipoeutectoid).



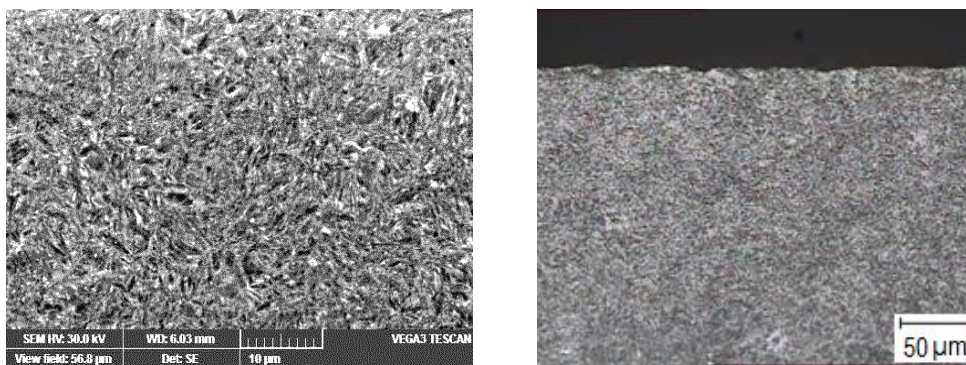
- a -

- b -

Fig.3.15. Microstructura stratului carburat al oțelului 16MnCr5 :

a – x 500 (imaginea frontală a suprafeței carburate); b – x 500 (imaginea în secțiune a stratului carburat).

Deoarece transformarea martensitică nu este completă, în stratul călit rămâne întotdeauna o anumită cantitate de austenită reziduală. În timpul tratamentului termic final de revenire la $180^\circ C$ s-a favorizat descompunerea soluției solide suprasaturate cu precipitarea unor particule fin dispersate de carburi ϵ coerente cu rețeaua de bază [83]. Morfologia acestor cristale este aceeași cu cea a martensitei inițiale (fig.3.16), dar cu o densitate mai mică de defecte ale rețelei cristaline.



- a -

- b -

Fig.3.16. Microstructura stratului tratat Duplex: a – x 2500 (imaginea structurii martensitice); b – x 200 (imaginea în secțiune a stratului tratat Duplex)

3.3.2. Microscopie electronică cu baleiaj, topografia suprafețelor

Suprafețele erodate prin cavitație ale probelor au fost fotografiate macroscopic și examinate la microscopul optic și electronic cu baleiaj, ieșind la iveală următoarele topografii ale suprafețelor, prezentate în fig.3.17...3.22.

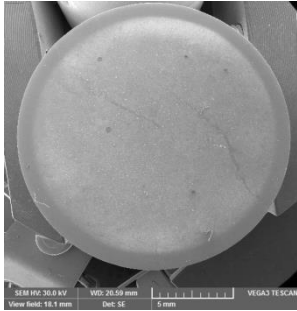
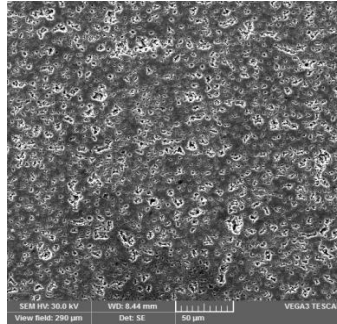
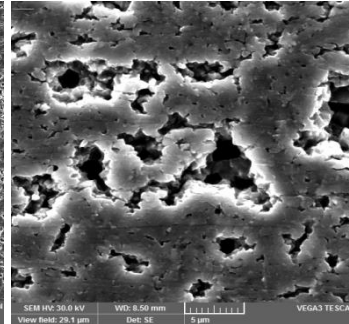


Fig.3.17. Macrografia suprafeței cavitate a probelor recoapte.



- a -



- b -

Fig.3.18. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor recoapte: a-x500; b-x 2500

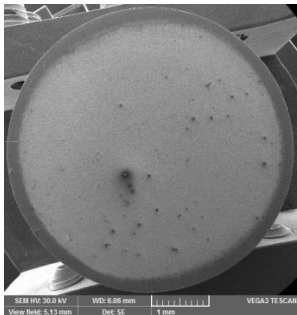
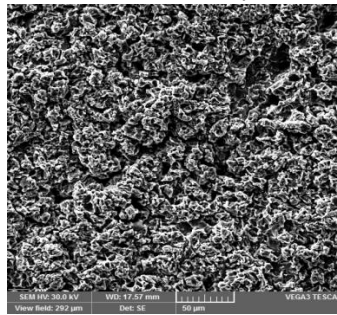
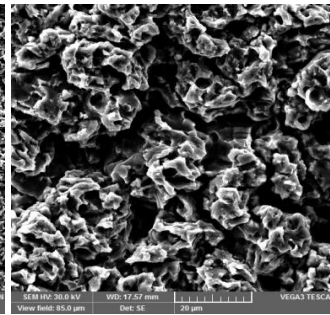


Fig.3.19. Macrografia suprafeței probelor carburate: x8



- a -



- b -

Fig.3.20. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor carburate: a-x500; b-x 2500

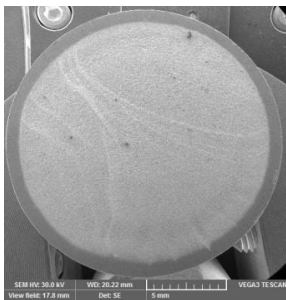
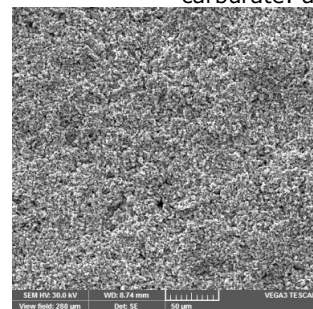
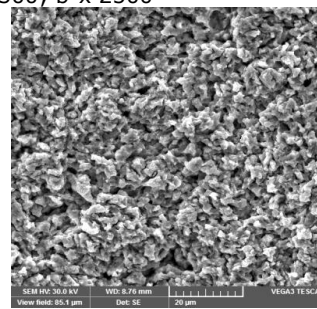


Fig.3.21. Macrografia suprafeței probelor tratate Duplex: x 8



- a -



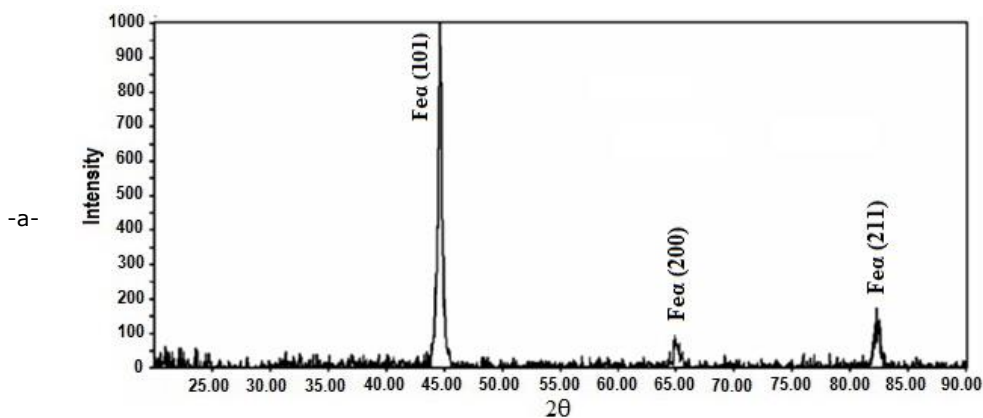
- b -

Fig.3.22. Imaginea SEM suprafeței cavitate a probelor tratate Duplex: a-x800; b-x2500

Din analiza acestora se poate constata 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. O situație asemănătoare, din punct de vedere calitativ, apare și la probele carburate cu răcire ulterioară în cuptorul de tratament, în sensul că inițierea fisurilor se produce tot în zonele de ferită, constituent moale și plastic, cu slabe caracteristici de rezistență mecanică. Este evident că proporția de ferită, din microstructura acestor probe, fiind redusă, alături de zonele puternic cavitate, se declanșează și un început de distrugere a coloniilor de perlită, constituent cu o rezistență mecanică mai ridicată. 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. Urmare a înalțelor caracteristici de rezistență mecanică ale structurii martensitice, aspectul suprafeței cavitate este uniform, iar ruperea are un caracter fragil.

3.3.3. Determinarea fazelor existente prin analize de difracția cu raze X.

Figurile 3.23. (a,b,c) arată imaginile de difracție cu raze X, care au permis identificarea fazelor existente în probele aflate în cele trei stări de tratament.



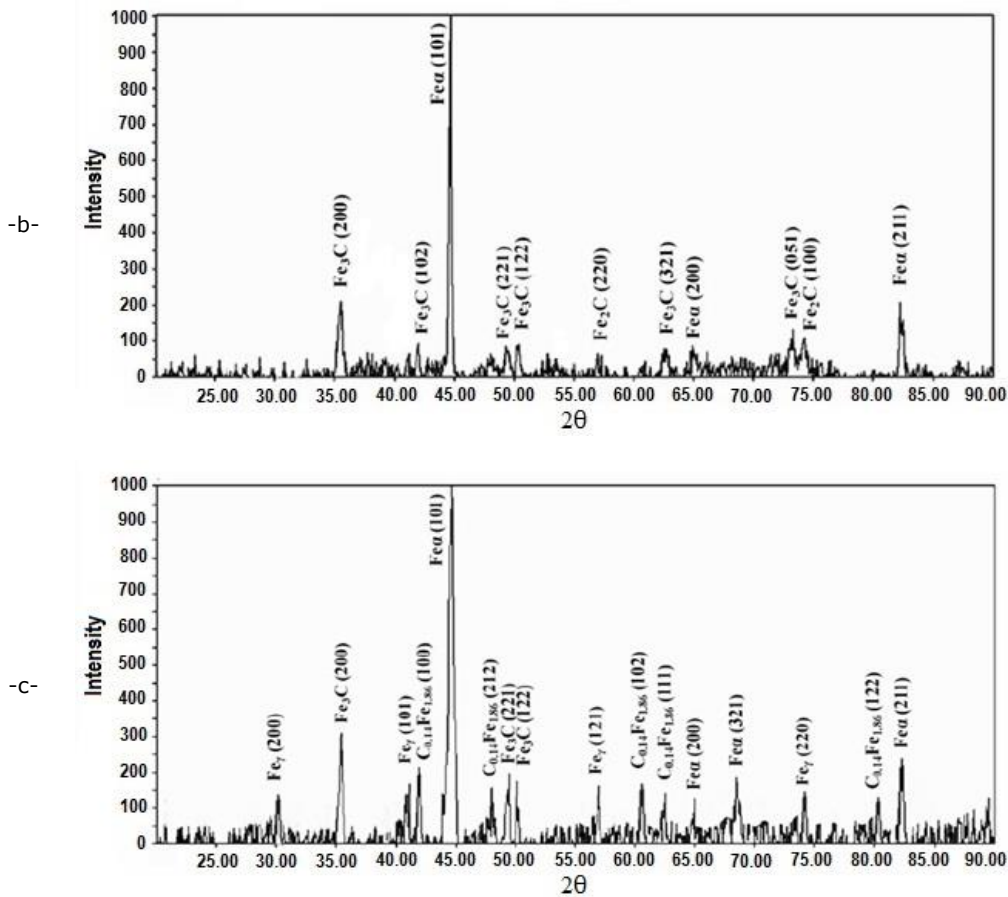


Fig.3.23. Spectrele de difracție ale probelor: a-stare recoaptă; b-stare carburată; c-stare tratată Duplex

În urma indexării acestora, s-a putut constata faptul că la probele recoapte apar doar picuri de interferență caracteristice feritei, $Fe\alpha$ (fig.3.23.a), la cele carburate apar în plus picuri ale carburii de fier, Fe_3C (fig.3.23.b), iar la cele tratate Duplex se mai poate observa prezența martensitei ($C_{0.14}Fe_{1.86}$) și a austenitei reziduale $Fe\gamma$ (fig.3.23.c).

3.3.4. Examinări sclerometrice.

Analizele realizate pe baza parametrilor și a microfotografiilor structurilor erodate, confirmă importanța alegerii tehnologiei în tratarea suprafeței expuse atacului cavitației, pentru obținerea unei durități adecvate, cu o structură fină și omogenă din punct de vedere al proprietăților mecanice.

Intensitatea schimbărilor microstructurale produse în sistemul strat – substrat, prezentat în fig.3.24, a fost evaluată prin măsurători de microduritate, HV0.3.

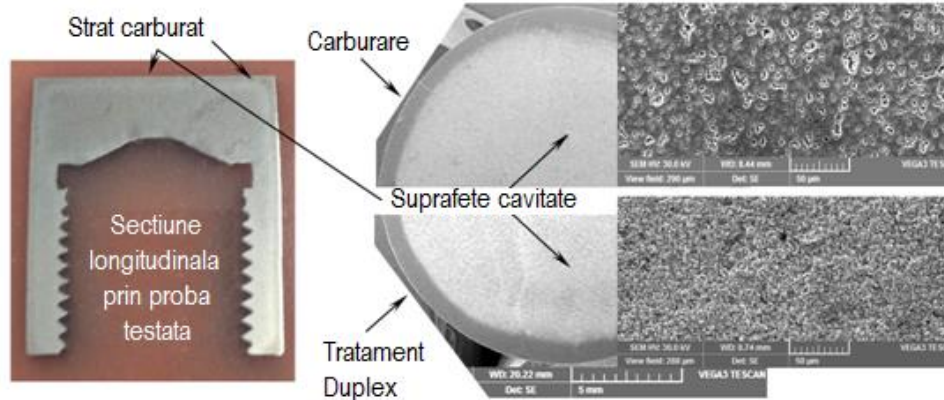


Fig.3.24. Vizualizarea sistemului strat-substrat obținut în urma tratamentului Duplex

Variația durității pe secțiunea transversală a probelor carburate și călite prin curenți de inducție, înainte și după tratamentul de revenire este redată în fig.3.25.

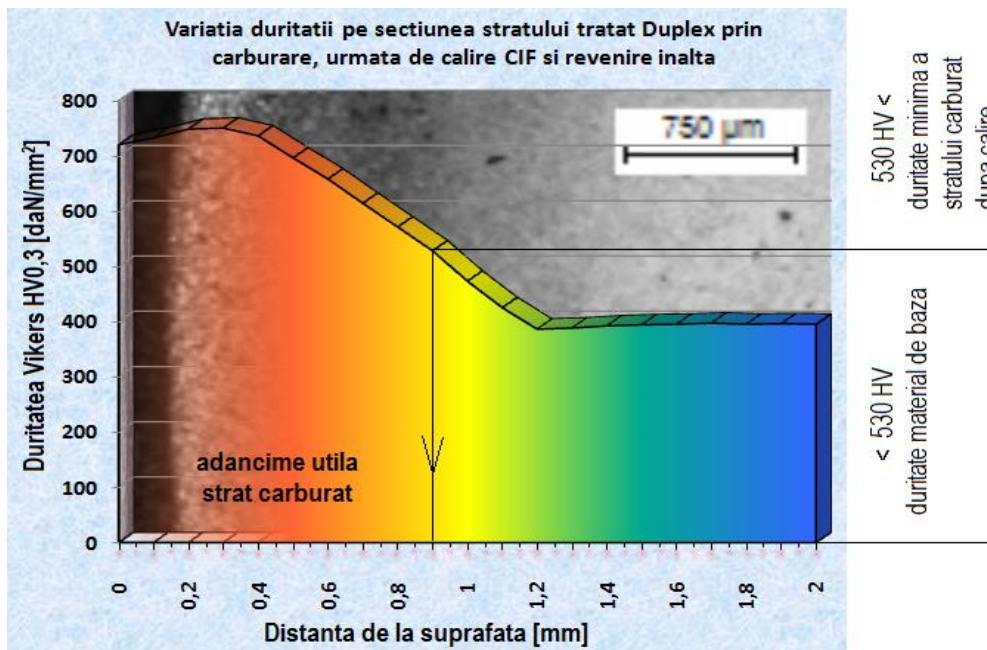


Fig.3.25. Variația durității pe secțiunea stratului tratat Duplex.

Așa cum era de așteptat, curbele gradient de duritate corespund distribuției constituenților structurali prezenți în piesele supuse acestui tratament Duplex. Stratul călit la martensită având cea mai mare concentrație în carbon dizolvat interstițial în rețeaua cristalină a soluției solide α , respectiv o densitate mare de defecte ale rețelei cristaline, va prezenta cele mai mari valori de duritate.

În zona marginală, apar valori de duritate, $HV0.3 = 710 - 740 \text{ daN/mm}^2$, maximul acestora fiind situat la o distanță de $0,2 - 0,3 \text{ mm}$ de suprafață. Fenomenul se explică prin proporția mai ridicată de austenită reziduală la suprafața materialului datorată unei concentrații mai mari în carbon. Austenita reziduală diminuează duritatea, limita de curgere și limita de oboseală a oțelurilor călite [82].

În zona de tranziție dintre strat și miez, răcirea s-a produs cu o viteză mai mică decât cea critică de călire, microstructura este constituită dintr-un amestec fin de ferită + carburi (sorbită și troostită de călire), iar duritatea scade continuu între 550 și 400 daN/mm^2 . Adâncimea utilă de carburare [83], definită prin adâncimea la care conținutul de carbon în strat a scăzut până la o valoare limită luată convențional, de $0,35 - 0,30 \%$ (pentru oțeluri aliate) pentru care se mai obține după călirea martensitică o duritate de $500 - 550 \text{ daN/mm}^2$, este de $0,9 - 1 \text{ mm}$ (fig.3.25).

3.4. Concluzii

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.

Topografiile tipice ale suprafeței cavitate 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 perlitei și o rezistență maximă la fisurare oferită de structura martensitică realizată prin tratamentul Duplex.

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.

Urmare a înaltelor caracteristici de rezistență mecanică ale structurii martensitice, aspectul suprafeței cavitate este uniform, iar ruperea are un caracter fragil.

Analiza rezultatelor pe baza curbelor și parametrilor specifici eroziunii prin cavitație, corelată cu investigațiile morfologice ale structurii erodate, arată că prin tratamentele aplicate, comportarea și rezistența la cavitație se îmbunătățesc substanțial, contribuind, astfel, la creșterea duratei de viață, în condiții de cavitație intens dezvoltată.

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 strat, mult mai fine, care justifică îmbunătățirea semnificativă a rezistenței la degradare prin cavitație.

4. ROLUL TRATAMENTULUI RECOACERE URMATĂ DE ECRUISARE MECANICĂ CU FASCICUL LASER ÎN CREȘTEREA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELULUI SLAB ALIAT 16MnCr5

4.1. Tratamente aplicate

Ecruisarea cu fascicul laser (cunoscută în literatură sub denumirea de Laser peening LP sau Laser shock peening LSP) [45, 50, 60, 65, 71, 91, 94, 111, 115, 116, 120, 127, 128] se încadrează în grupa tratamentelor mecanice descrise în capitolul 1 și 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, 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.

Astfel, materialele utilizate pot fi prelucrate în stare recoaptă, ceea ce reprezintă un avantaj din punctul de vedere al prelucrabilității prin așchiere, urmând ca piesele executate să fie durificate la suprafață, iar miezul acestora să rămână moale și plastic pentru a putea prelua solicitările dinamice din exploatare.

În fig.4.1 sunt date imagini ale etapelor procesului de ecruisare cu laser, după [127,128].

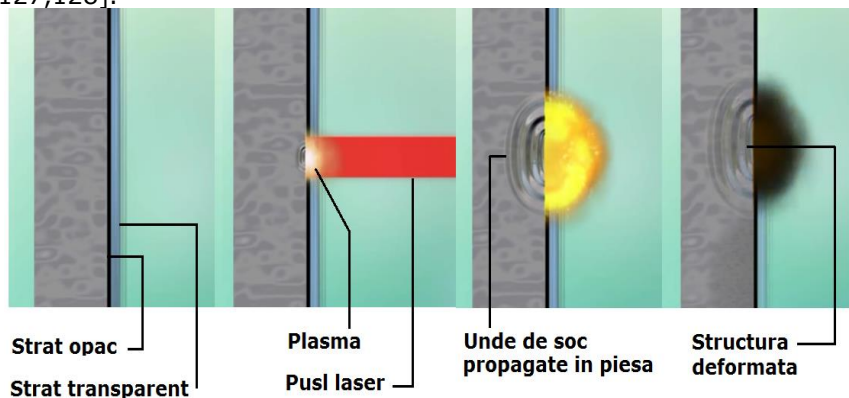


Fig.4.1. Etapele de realizare a ecruisării cu fascicul laser LSP [127,128].

Procedeu [127, 128] constă în aplicarea unui strat absorbant opac pe suprafața ce urmează a fi tratată, care poate fi vopsea sau bandă adezivă de culoare neagră. Peste acesta se intercalează un mediu transparent care poate fi apă sau sticlă transparentă de cuarț (cca. 3 mm grosime), cu rolul de a menține pe suprafața piesei gazele rezultate din vaporizarea stratului opac.

Sub acțiunea impulsului laser, gazele rezultate prin vaporizarea stratului opac se ionizează și se creează starea de plasmă care, în continuare, absorbând energia fasciculului se destinde foarte rapid.

Fenomenul generează unde de presiune, care induc tensiuni de compresiune de valori ridicate în stratul de suprafață și în substraturile adiacente acestora. Deformațiile microstructurale apărute produc o ecrusare mecanică locală, respectiv o creștere semnificativă a durității și a nivelului tensiunilor reziduale.

Similar procedurii descrise în cap.3, de pregătire prealabilă a probelor pentru testele de cavitație, acestea au fost realizate dintr-o bară cilindrică cu diametrul de 20 mm care, mai întâi, a fost supusă tratamentului termic de recoacere pentru înmuiere prin încălzirea materialului la 670 ± 10 °C, menținere la aceasta temperatură timp de o oră, urmată de răcire lentă în cuptor.

După acest tratament, suprafața ce urma să fie supusă atacului cavitației a fost rectificată și lustruită la o rugozitate $Ra=0,2\div0,5$ μm. Apoi, pe suprafața probelor destinate tratamentului de ecrusare mecanică cu fascicul laser, s-a aplicat o peliculă de vopsea neagră, peste care s-a suprapus o placă din sticlă de cuarț cu grosimea de 3mm.

Tratamentul de ecrusare mecanică s-a efectuat la Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale din Timișoara, pe instalația de sudare - tăiere cu fascicul laser Nd:YAG, marca Trumpf HL 124 P prezentată în fig.4.2.

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 $0,3\div20$ ms;
- frecvența maximă de puls cu LCU 1 kHz.



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

Parametrii de proces ai tratamentului de ecrusare sunt următorii: putere în puls a razei laser $P=240W$; 39 spoturi/cm²; durata pulsului $t = 8$ ms; diametrul spotului de cca. 2 mm. Energia absorbită de stratul opac de vopsea este aproximativ $E = 1,92$ J și calculată cu relația:

$$E = P \cdot t \text{ [W}\cdot\text{s]} \quad (4.1)$$

Adâncimea stratului ecrusat rezultat a fost determinată prin ridicarea curbelor gradient de duritate HV0.3 și prin investigații microstructurale realizate la microscopul optic.

S-a recurs la acest procedeu, deoarece se estimează o reducere semnificativă a costurilor de fabricație comparativ cu alte procedee clasice de durificare, respectiv a consumului de energie necesar obținerii unor rezultate asemănătoare [82, 90, 127,128]. De altfel metoda poate fi aplicată pe anumite zone care prezintă interes, și pe suprafețe interioare ale diferitelor piese, acolo unde nu se poate interveni prin metode clasice.

4.2. Teste de cavitație

4.2.1. Curbe caracteristice

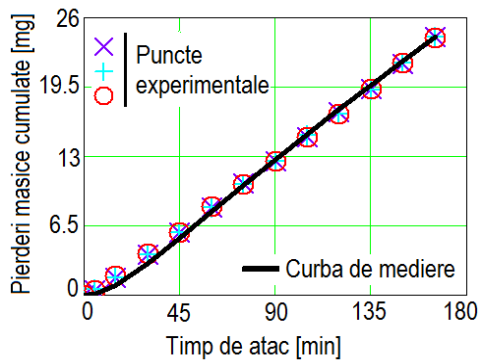
Pregătirea probelor înainte de debutul testelor și procedura parcursă în timpul derulării (cântărire, spălare, uscare, înregistrare pierderi de masă, calculul mărimilor experimentale (MDE, MDER) sunt cele specifice laboratorului și prevăzute în normele internaționale ASTM G32-2010 [124]; așa cum sunt descrise în capitolul 2 și detaliate în capitolul 3 [14, 73, 124], cu diferențiere prin tratamentul aplicat.

În fig.4.3, sunt prezentate suprafețele rezultate în urma ecrusării cu fascicul laser și supuse atacului cavitațional, la diferite intervale de timp. Se remarcă aspect vălurit, datorat deformațiilor superficiale, a aplatizării și vaporizării survenite în urma impactului cu fasciculul, care s-a menținut până la expirarea duratei totale de atac, confirmând că stratul ecrusat nu a fost depășit de eroziunea gavităției.



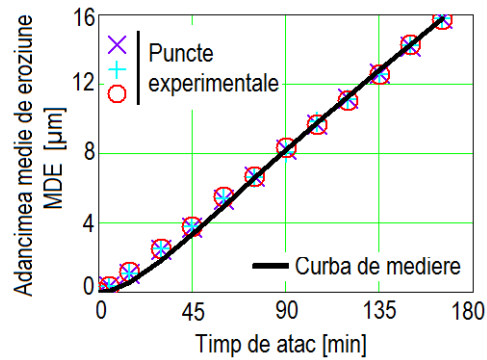
Fig.4.3. Degradarea suprafeței de atac la diferite intervale de timp

Pe baza pierderilor masice, înregistrate la finalul fiecărei perioade de testare (de 5, 10 și 15 minute), utilizând relațiile specifice [14, 73, 124] s-au determinat valorile experimentale ale pierderilor masice cumulate M , ale vitezelor de eroziune v , ale adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii MDE, respectiv ale vitezelor medii de pătrundere a eroziunii MDER, aferente fiecărei durate intermediare de atac și au fost ridicate curbele de mediere $M(t)$, $v(t)$, MDE(t) și MDER(t), ce caracterizează comportarea globală la eroziunea cavitației, fig.4.4.



$M = 24,15 \text{ mg}$

-a-



$MDE = 15,771 \text{ μm}$

-c-

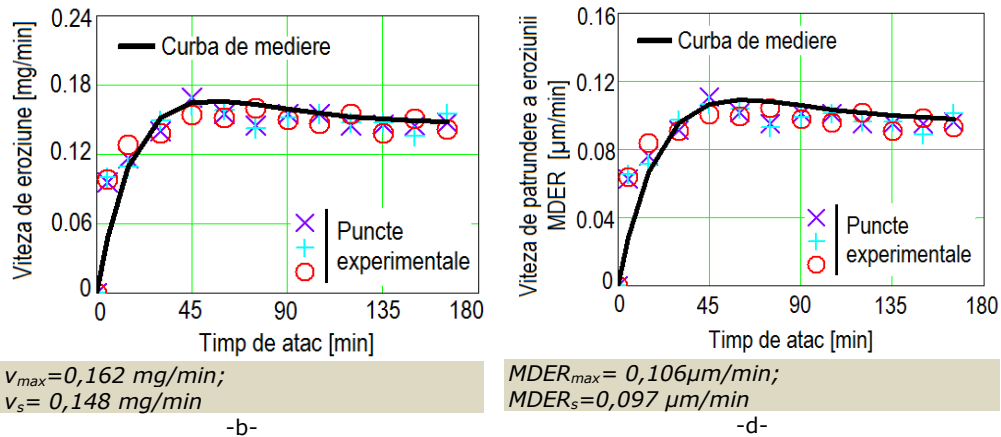


Fig.4.4. Valorile experimentale și curbele caracteristice eroziunii cavitației, pentru setul 2, din oțelul 16MnCr5, ecrusat mecanic cu fascicul laser (LSP): a – Pierderi masice cumulate; b – Viteza de eroziune; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER

Dispersia redusă a punctelor experimentale față de curbele de mediere (MDE(t) și MDER(t)) este rezultatul durității stratului ecrusat cu rază laser.

Suprapunerea valorilor experimentale ale vitezei de eroziune (fig.4.4.b și d), pe intervalul (60-165) minute arată comportarea similară a celor trei probe testate, datorită acurateții derulării procesului de ecrusare, cu menținerea constantă a parametrilor de lucru, printr-un control riguros.

Spre deosebire de tratamentele termice și termochimice (vezi capitolul 3, 5 și 6), unde în primele minute de atac, viteza de eroziune are valori foarte mari, care depășesc cu mult gradul de dispersie pe zonele de atenuare și stabilizare, în acest caz se remarcă valori reduse ale vitezei de eroziune, pe intervalul 5-60 minute. Explicația se regăsește în durificarea suprafeței realizată sub pelicula de vopsea, fără a se aduce alte impurități, care să fie eliminate la primele contacte cu microjeturile și undele de șoc, sau prin vibrație; perioada respectivă fiind caracterizată prin producerea de fisuri și deformații elasto-plastice [14, 73]

Evoluția liniară, a curbelor M(t) și MDE(t), precum și diferența foarte mică, dintre valorile de maxim $MDER_{max}$ și cea spre care tinde să se stabilizeze viteza medie de pătrundere a eroziunii, $MDER_s$, conform curbei MDER(t), arată că stratul ecrusat conferă suprafeței cavitate o rezistență sporită la cavitație.

Curbele de regresie obținute și parametrii calculați, conform metodologiei descrise în capitolul 2, subcapitolul 2.3 [14, 73, 124], care arată acuratețea cercetării experimentale (interval de toleranță de 99 %), se prezintă în fig.4.5.

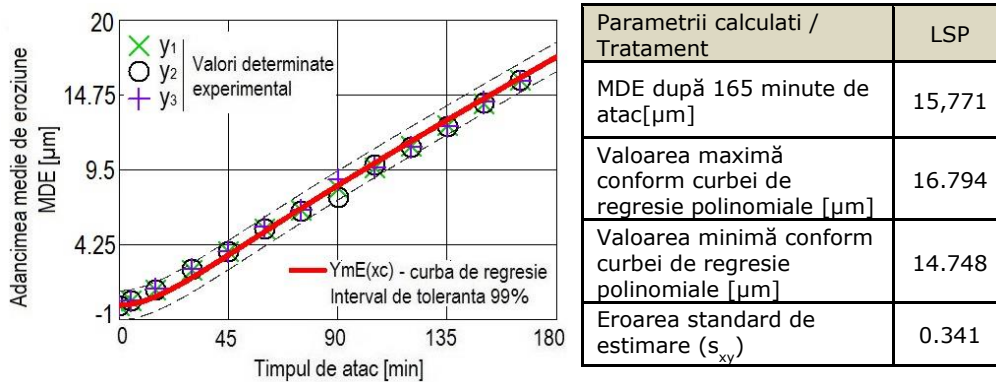
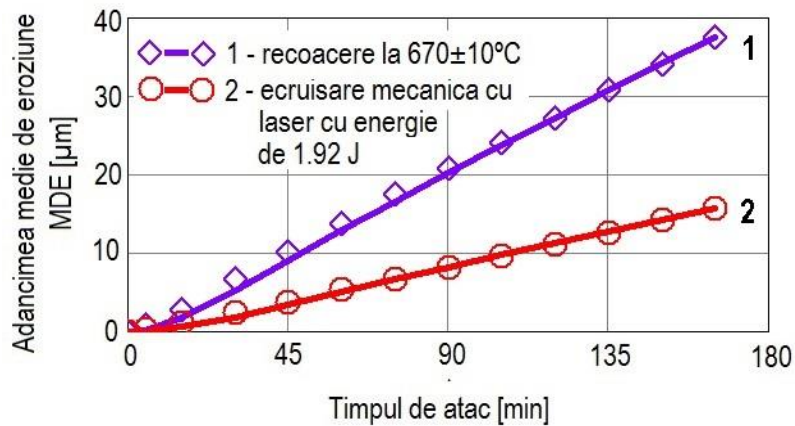


Fig.4.5. Banda de dispersie pentru setul de probe supus tratamentului de ecrusare mecanică cu fascicul laser

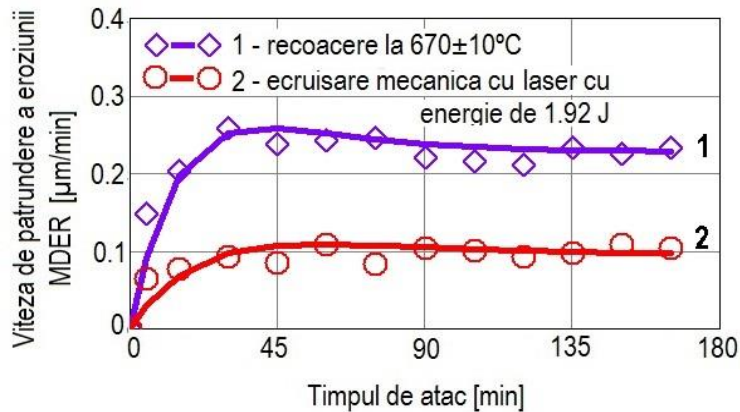
Și în acest caz valoarea abaterii standard este sub 0,5 sugerând că eroziunea produsă în suprafețele expuse cavitației este realizată în mod uniform, ca urmare a distribuției omogene a durității din structura suprafeței, responsabilă de rezistența la atacul cavitației.

Pentru punerea în evidență a sporului de rezistență, dar și a comportării în timpul cavitației, în fig.4.6 și 4.7 este realizată comparația cu starea recoaptă, pe baza curbelor specifice MDE(t) și MDER(t).



MDE1=37,622 μm ; MDE2=15,771 μm

Fig.4.6. Variația adâncimii medii de eroziune cu timpul de atac.



MDER1=0,233 $\mu\text{m}/\text{min}$; MDER2=0,097 $\mu\text{m}/\text{min}$
 Fig.4.7. Variatia vitezei de pătrundere a eroziunii cu timpul de atac.

Având în vedere cele precizate la capitolul 2 despre analiza degradării structurale a probelor recoapte, realizată pe baza dispersiei punctelor experimentale, față de curba de mediere, precum și pe seama formei de evoluție a curbelor MDE(t) și MDER(t), comparația din fig.4.6 și 4.7 arată că suprafața ecrusată (curba 2) este greu de distrus prin rețelele de fisurare și de deformare, pierderile de masă fiind mici datorită fragmentării și finisării structurii cristaline a oțelului care au ca efect creșterea durității și a celorlalte caracteristici de rezistență mecanică.

Rapoartele adâncimilor medii cumulate de pătrundere a eroziunii cavitationale, 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.

4.2.2. Compararea cu materiale de referință

Conform cutumei laboratorului [14, 33, 45, 46, 47, 48, 76], sporul de rezistență obținut printr-o tehnologie aplicată acestui oțel, este certificat de comparația cu materialul etalon 41Cr4. Pentru aceasta, în histograma din fig.4.8 sunt comparate valorile adâncimii medii de eroziune MDE, după 165 minute de expunere la cavitație și ale parametrului rezistență la cavitație R_{cav} (calculat conform relației 2.12 din capitolul 2) cu valorile aferente stării recoapte și oțelului etalon 41Cr4. În aceeași diagramă sunt date și valorile obținute după tratamentul Duplex, cu scopul identificării celui mai bun procedeu din punct de vedere al creșterii duratei de viață în condițiile funcționării în cavitație dezvoltată.

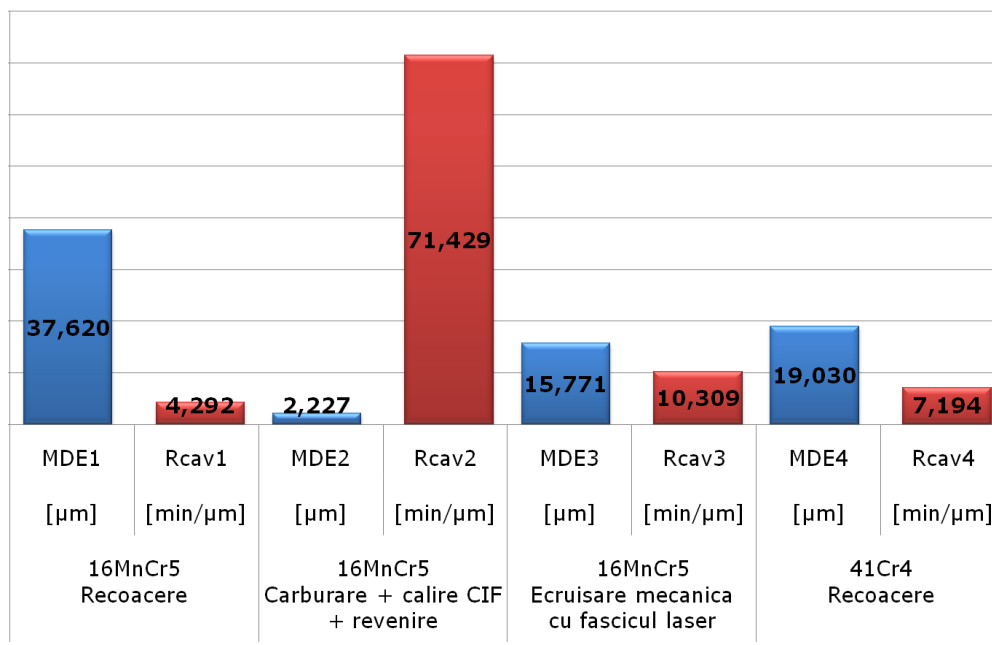


Fig.4.8. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat

Din analiza datelor din histogramă (fig.4.8) rezultă că prin ecrusare mecanică cu fascicul laser oțelul 16MnCr5 realizează creșterea rezistenței la cavitație de cca. 2,4 ori comparativ cu starea recoaptă, respectiv cu cca 43 % comparativ cu oțelul etalon 41Cr4. Apreciem că acest spor este cauzat de duritatea stratului ecrusat, pentru care nu s-au putut realiza măsurători de duritate, direct pe suprafață, din cauza formei vălurite.

Comparația cu tratamentul Duplex, evidențiază o rezistență net inferioară, adâncimea de eroziune fiind de circa 7 ori mai mare. Deși tratamentul de ecrusare mecanică cu fascicul laser nu oferă beneficii similare cu cele obținute prin tratament Duplex de carburare, urmată de călire prin curenți de înaltă frecvență și revenire, totuși, procedeul oferă avantajul unui cost redus, cu randament ridicat și posibilități de automatizare, putând fi aplicat pe zone reduse, în spații greu accesibile.

4.3. Investigații microstructurale

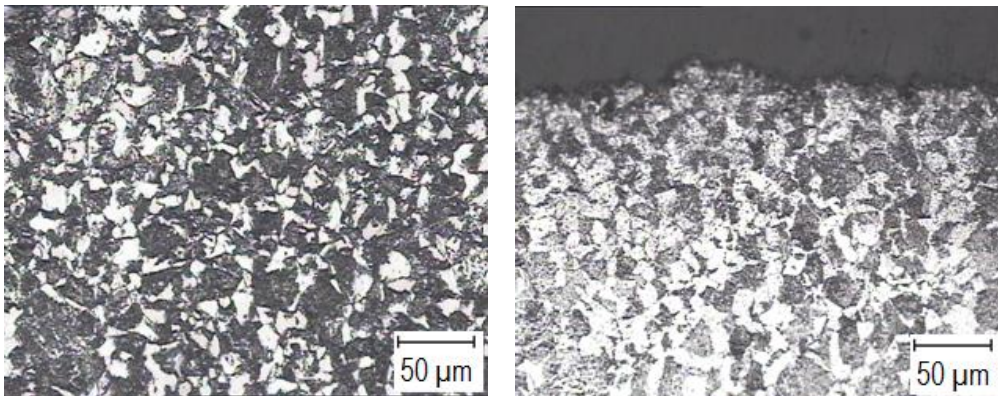
4.3.1. Microscopie optica

Investigațiile realizate cu ajutorul microscopului optic, la diferite ordine de mărire, înainte și la finalul cavitației vibratoare, au pus în evidență natura constituenților structurali aferenți fiecărei etape de tratament în parte, așa cum reiese din imaginile de mai jos (fig.4.9 pentru starea recoaptă și fig.4.10 pentru starea ecrusată mecanic cu laser):

În fig.4.10 este redată microstructura stratului ecrusat mecanic cu fascicul laser, înainte de atacul cavitațional (fig.4.10.a), respectiv după finalizarea acestuia

(fig.4.10.b). Se observă ca fenomenul de ecruisare provoacă o fărâmițare și o finisare accentuată a structurii ferito-perlitice, care devine puternic saturată cu dislocații, ceea ce determină un grad redus de pătrundere a eroziunii cavitației în stratul marginal.

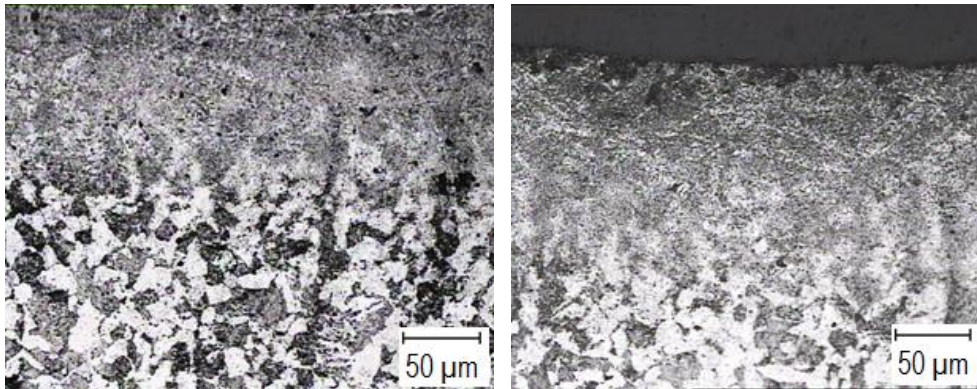
Analizând, comparativ, imaginile din fig.4.9.b și fig.4.10.b, se remarcă, cu ușurință, rezistența mai mare a suprafeței ecruisate, la distrugerea produsă de impactul cu microjeturile și undele de șoc generate de implozia bulelor cavitaționale. Aceste imagini pun în evidență efectul benefic ce îl poate avea ecruisarea mecanică cu fascicul laser, asupra rezistenței la eroziune a suprafețelor ce funcționează în câmpuri hidrodinamice cavitaționale.



- a -

- b -

Fig.4.9. x 200 Microstructura oțelului 16MnCr5 în stare recoaptă: a) x200 materialul de bază, b) x200 secțiune prin zona cavitață



- a -

- b -

Fig.4.10. Microstructura oțelului 16MnCr5 ecruisat superficial cu fascicul laser: a) x200 zona dintre stratul ecruisat și materialul de bază, înainte de cavitație; b) x200 secțiune prin zona cavitață

4.3.2. Examinări sclerometrice

Intensitatea schimbărilor microstructurale produse în stratul de suprafață a fost evaluată și prin măsurători de microduritate, HV0.3. Variația durității pe grosimea stratului ecruisat este redată în fig.4.11.

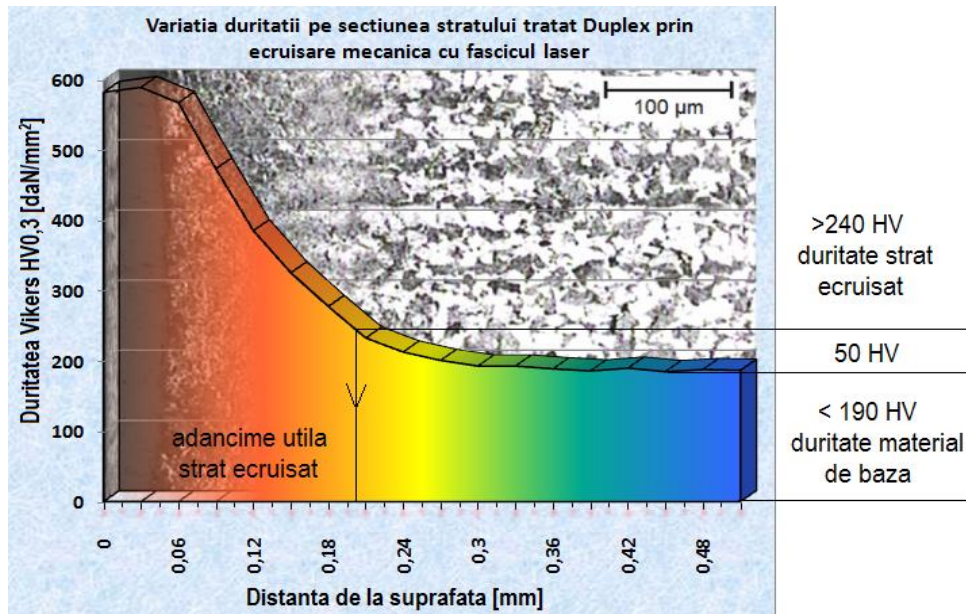


Fig.4.11. Curba gradient de duritate

Analizând la microscopul optic, în secțiune, stratul rezultat în urma tratamentului, s-au observat modificări de structură caracteristice fenomenului de ecruisare mecanică, pe o adâncime de 0,25 mm. De altfel, la suprafața piesei, s-a mai observat un strat topit pe o adâncime foarte mică de până la 5 μm, de culoare închisă, cu oxizi rezultați în urma impactul suprafeței cu fasciculul laser. Între stratul de bază și stratul ecruisat se observă o zonă influențată termic, pe o adâncime de cca 10 μm.

În zona marginală, apar valori de duritate HV0.3 = 560 - 597 daN/mm², maximul acestora fiind situat la o distanță de 0,03 mm de suprafață. Fenomenul se datorează stratului superficial afectat termic, care se caracterizează prin valori ceva mai mici ale durității. După acest maxim, valorile durității punctelor măsurate încep să scadă cu creșterea adâncimii stratului, ajungând după cca. 0.3 mm la valoarea durității materialului de bază în stare recoaptă HV0.3 = 190 daN/mm².

Adâncimea utilă [83] care se ia în considerare se află la cca. 0.2 mm de la suprafața tratată, corespunzătoare unei valori a durității HV0.3 = 230 ±250 daN/mm².

4.4. Concluzii

Analiza rezultatelor pe baza curbelor de variație a parametrilor cavitaționali MDE(t) și MDER(t), a curbei gradient de duritate pe grosimea stratului ecrusat, corelate cu investigațiile metalografice, care privesc morfologia structurilor erodate, rezultă că rezistența la cavitație a oțelului slab aliat 16MnCr5, prin tratamentul de ecrusare mecanică cu fascicul laser, crește de aproximativ 2,4 ori față de cea obținută prin tratamentul de recoacere, contribuind astfel la creșterea duratei de viață a echipamentelor, în condiții de cavitație intens dezvoltate.

Microstructura secțiunii stratului de suprafață cavitat, la probele tratate termic diferit (fig.4.9.b și 4.10.b), evidențiază o degradare preferențială a zonelor de ferită, constituent microstructural moale și plastic, cu o rezistență scăzută la inițierea fisurilor, un rol important având și dimensiunea grăuntelui cristalin.

Prin tratamentul de ecrusare mecanică cu fascicul laser, adâncimea medie de pătrundere a eroziunii cavitaționale, rezultată după perioada de testare de 165 de minute, se reduce cu cca. 21 % față de a oțelului etalon 41Cr4 în stare recoaptă.

Structura cristalină puternic deformată și saturată cu dislocații, rezultată în urma tratamentului de ecrusare mecanică cu fascicul laser, este caracterizată de un grad de fragmentare și finisare accentuat, care favorizează creșterea durității și a celorlalte caracteristici mecanice, și o reducere a vitezei de eroziune prin cavitație de cca. 2.4 ori comparativ cu starea recoaptă.

5. TRATAMENTUL TERMIC DE ÎMBUNĂTĂȚIRE URMATĂ DE NITRURARE ÎN MEDIU GAZOS ȘI INFLUENȚA LOR ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE A OȚELULUI ALIAT 34CrNiMo6

5.1. Tratamentele aplicate

Materialele supuse nitrurării sunt de regulă oțelurile cu un conținut mediu de C [25, 27, 28, 29, 30, 31, 48, 49, 54, 58, 69, 83], aliate cu Cr-Mo-V (34VCrMo350, 34CrNiMo6, etc.), respectiv Cr-Al-Mo (34MoAlCr15, 34MoCrAl09, etc.), cunoscute sub denumirea de oțeluri de îmbunătățire: uneori se supun nitrurării și oțelurile de scule înalt aliate, oțelurile refractare austenitice și inoxidabile, la care li se mărește mult rezistența la uzură, fără a diminua celelalte caracteristici [82, 83, 84, 117].

Pentru identificare, în descrierea de mai jos, sunt utilizate următoarele notații:

- cu 1 - probe din oțel în stare recoaptă;
- cu 2 - probe din oțel în stare recoaptă + îmbunătățită;
- cu 3 - probe din oțel tratat Duplex - recoapt + îmbunătățit + nitrurat în gaz;

Aceste procedee au respectat succesiunea operațiilor tehnologice de prelucrare a pieselor din oțel, ordinea acestora fiind următoarea:

- recoacerea pentru înmuiere a semifabricatelor;
- prelucrări mecanice la cote apropiate de cele finale;
- aplicarea unui tratament termic de îmbunătățire (călire martensitică urmată de revenire înaltă la temperaturi superioare celei de nitrurare);
- rectificare la cote finale;
- nitrurare;
- o eventuală superfinisare;
- control tehnic de calitate.

Variantele de obținere a stratului nitrurat sunt funcție de dotarea tehnică a firmei, de productivitate și de costuri. Acestea sunt:

- nitrurare în mediu gazos,
- nitrurare ionică;
- nitrurare cu fascicul laser (laser nitriding).

În cadrul lucrării, am optat pentru două procedee [25, 27, 28, 29, 30, 31, 48, 49, 50, 60, 83, 85, 89, 119, 121, 122, 123], unul de nitrurare în mediu gazos tratat în prezentul capitol, și unul de nitrurare cu fascicul laser, tratat în capitolul 6. Alegerea celor două procedee am făcut-o ținând cont că modalitățile de conducere a procesului, timpii de execuție și caracteristicile straturilor nitrurate obținute, diferă foarte mult.

Pentru programul de cercetare experimentală, probele pentru testare au fost realizate dintr-o bară cilindrică din oțel aliat 34CrNiMo6, cu diametrul de 25 mm, supusă în prealabil tratamentului termic de recoacere pentru înmuiere, după care a urmat tratamentul termic de îmbunătățire și prelucrarea prin rectificare + lustruire la o rugozitate $R_z = 0,2 \div 0,5 \mu\text{m}$ a suprafeței supuse atacului cavitației. După rectificare+lustruire, o parte din probele îmbunătățite au fost supuse tratamentului termochimic de nitrurare în mediu gazos, urmate din nou de lustruirea suprafeței nitrurate, fără a se depăși grosimea stratului nitrurat.

a. *Recoacerea pentru înmuiere* [83] reprezintă un tratament termic aplicat oțelului, înaintea prelucrărilor mecanice, având ca scop corectarea structurilor defectuoase rezultate din procesul de elaborare a semifabricatelor, precum și asigurarea unor proprietăți tehnologice favorabile prelucrărilor ulterioare. Tratamentul a constat în încălzirea materialului la $670 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, menținerea la această temperatură timp de o oră, urmat de o răcire lentă în cuptor până la temperatura camerei.

b. *Tratamentul termic de îmbunătățire* [31, 83, 104] s-a realizat prin două tratamente termice distincte, respectiv o călire martensitică volumică de la o temperatură superioară punctului critic A_{c3} ($850 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$), cu răcire rapidă în ulei, urmată de o revenire înaltă la o temperatură de $600 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$, inferioară punctului critic A_{c1} cu menținere timp de 1 oră și răcire în aer [1].
Procedeele sunt descrise în ciclograma din fig.5.1.

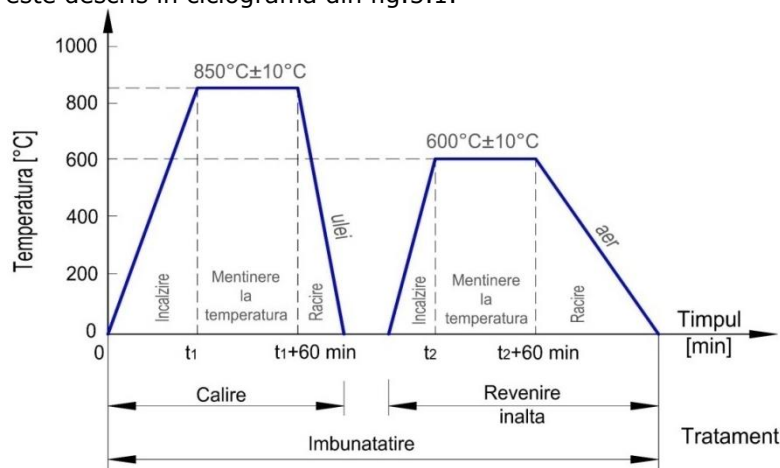


Fig.5.1. Ciclograma tratamentului termic de îmbunătățire

c. *Nitrurarea în mediu gazos* [31, 59, 83, 99, 119, 122] este un tratament termochimic de îmbogățire în azot a straturilor superficiale ale pieselor, având ca rezultat formarea de nitruri ce favorizează creșterea semnificativă a durtății [83].

Ciclul termic aplicat este prezentat în fig.5.2. și a constat din încălzirea pieselor, rectificată la cote finale și lustruită pe suprafața ce urma să fie expusă la cavitație, într-un cuptor cu atmosferă controlată, de azot, obținut prin disocierea amoniacului și menținerea la temperatura de $520 \text{ }^\circ\text{C} \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ o perioadă de cca 40 ore. Aceste condiții de temperatură și timp sunt dictate de solubilitatea redusă a azotului în ferită (la $500 \text{ }^\circ\text{C}$ este de circa 0,04%) la o durată de nitrurare foarte mare ($24 \div 90$ ore) [83]. La temperatura de experiment, din ciclograma din fig.5.2., datorită duratei mari de timp, azotul aflat în stare atomică în atmosfera cuptorului a pătruns prin difuzie în straturile superficiale ale materialului metalic al probelor, combinându-se chimic atât cu fierul, cât și cu elementele de aliere, dând naștere unor nitruri. Răcirea s-a realizat odată cu cuptorul de tratament, în atmosfera de amoniac, până la cca. $150 \text{ }^\circ\text{C}$, după care s-a continuat în aer, la temperatura mediului ambiant.

În aceste condiții, grosimea stratului nitrurat rezultat poate atinge $0,4 \div 0,6$ mm, cu o durtate deosebit de ridicată.

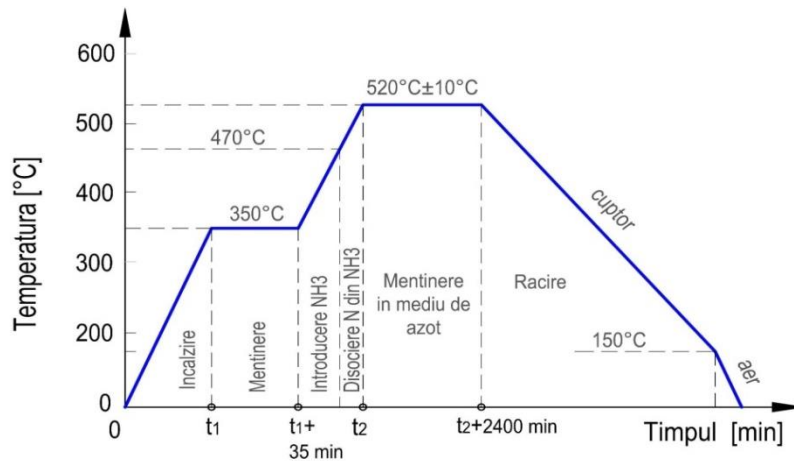
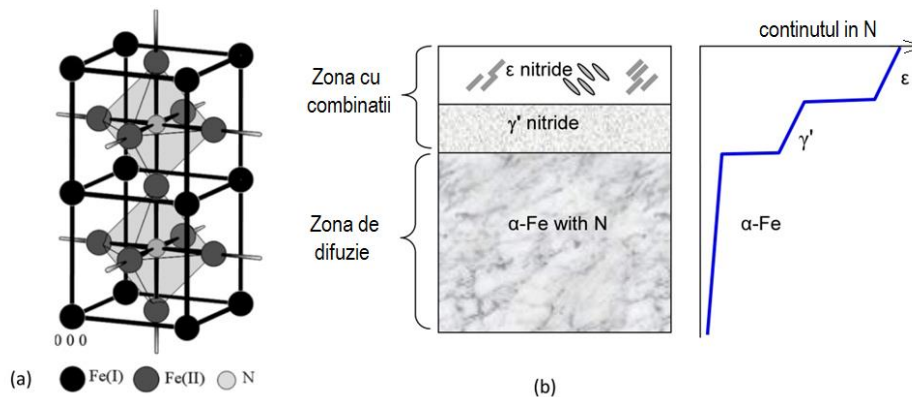


Fig.5.2. Ciclograma tratamentului termochimic de nitrurare în gaz.

Microstructura formată (nitruri simple și complexe dispersate într-o soluție solidă îmbogățită în azot), fig.5.3., împiedică deplasările atomilor de-a lungul planelor de alunecare ale rețelei cristaline și implicit, creșterea valorilor caracteristicilor mecanice, în special a durității [30].

Fig.5.3. Stratul nitrurat: a- structura compusului γ' -Fe₄N, b- distribuția fazelor pe grosimea stratului nitrurat și variația concentrației de azot [30]:

Datele culese din literatură [30] arată că, în raport cu carburarea, stratul nitrurat este mult mai dur și mai rezistent la uzură, oboseală și coroziune, nu necesită tratamente termice ulterioare, având o stabilitate termică mai mare, duritatea înaltă menținându-se la temperaturi de exploatare de 500 ÷ 550 °C .

Avantajele utilizării tratamentelor termochimice de nitrurare sunt:

- duritatea superficială a pieselor nitrurate are valori ridicate 600÷1200 HV, în funcție de compoziția chimică a oțelului;
- crește rezistența la uzură și oboseală;
- crește rezistența la coroziune în aerul atmosferic, apă, vapori;
- pe lângă posibilitatea menținerii caracteristicilor de plasticitate și tenacitate ale miezului pieselor, crește și rezistența la oboseală prin sollicitări de încovoiere și torsiune cu cca. 25 - 30%.

Conform DIN 50190 Teil 5, adâncimea stratului nitrurat se consideră ca fiind distanța de la suprafața piesei până la punctul în care duritatea stratului depășește cu 50 HV duritatea miezului.

Creșterea volumului stratului îmbogățit în azot nu provoacă modificări dimensionale semnificative, doar unele deformări funcție de temperatura de nitrurare și grosimea acestuia.

Pe parcursul derulării nitrurării, conform uzanțelor, suprafețele, care nu trebuiesc nitrurate, au fost protejate prin acoperire electrolică cu Sn.

5.2. Teste de cavitație

5.2.1. Curbele caracteristice

Testele de comportare și rezistență la eroziunea cavitației au fost derulate tot pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație, al Universității Politehnica Timișoara, conform procedurilor experimentale, precizate în capitolele anterioare.

Imaginile fotografice înregistrate, pe întreaga perioadă de testare, după fiecare perioadă intermediară de atac al cavitației, la diferite intervale de timp, evidențiază încă din primele 30 de minute moduri de degradare diferite, funcție de starea de tratament.

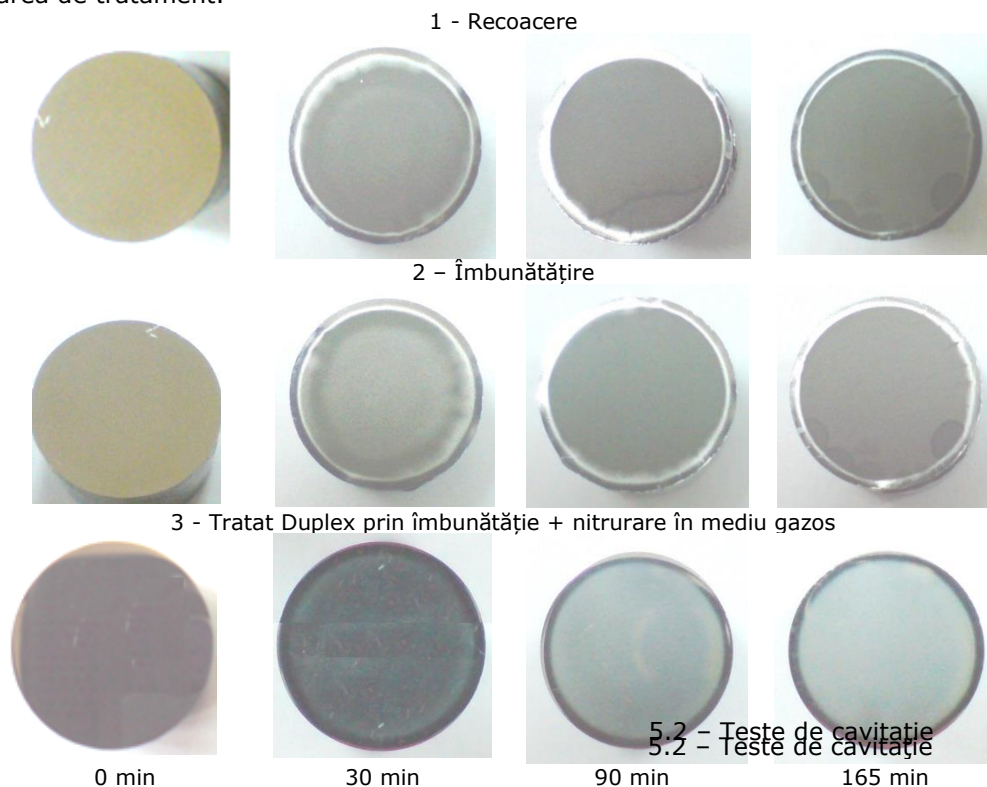


Fig.5.4. Degradarea suprafeței de atac la diferite intervale de timp

Figura 5.4. este elocventă în acest sens, prin imaginile de la trei durate semnificative de expunere la cavitația vibratoare, care arată intensitatea atacului cavitației vibratoare, exprimată de degradarea generată de impactul cu microjeturile și undele de șoc, create prin implozia bulelor de cavitație.

Distrugerea diferită a suprafețelor, funcție de tratamentul la care proba a fost supusă, este susținută și de concluziile rezultate din analiza curbelor caracteristice de eroziune cavitațională pentru cele 3 seturi de probe testate, pentru fiecare regim de tratament în parte, prezentate în fig. 5.5, 5.6, 5.7. Aceste curbe indică variația pierderilor masice $m(t)$, a vitezei de eroziune $v(t)$, a adâncimii medii de pătrundere a eroziunii $MDE(t)$, respectiv a vitezei medii de pătrundere a eroziunii $MDER(t)$, cu durata atacului cavitației vibratoare, t .

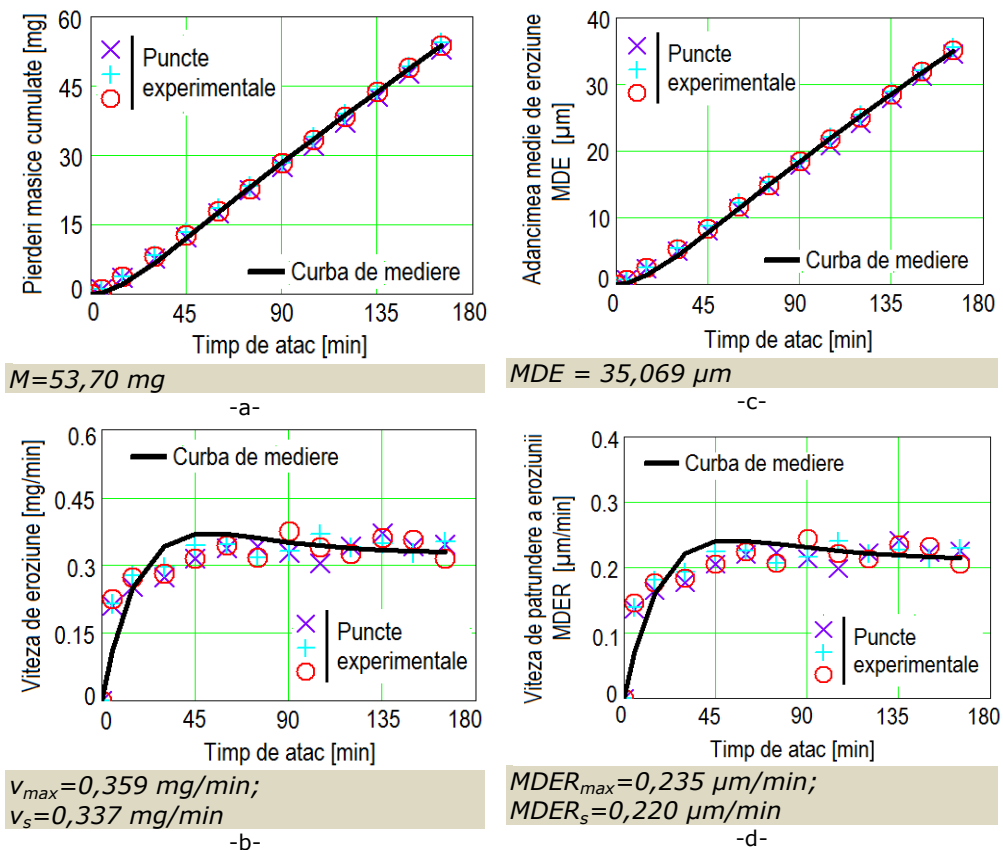


Fig.5.5. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 1, din oțelul 34CrNiMo6, aflat în stare recoaptă: a – Pierderi masice cumulate [mg]; b – Viteza de eroziune [mg/min]; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [$\mu\text{m/min}$]

Suprapunerea punctelor experimentale pe curbele de mediere, ce dau variațiile pierderilor cumulate de masă, fig.5.5.a, sau a adâncimii medii de eroziune, fig.5.5.c, sunt o expresie a omogenității structurale și proprietăților mecanice (rezistența la rupere, limita de curgere, duritatea materialului) și a celor de tenacitate (alungirea și gătuirea), specifică materialelor cu bună și foarte bună

rezistență la eroziunea cavitației, generată de aparatul vibrator utilizat [10, 14, 17, 19, 20, 21, 22, 32, 33, 61, 63, 66, 73, 75, 90, 91, 124]. Această caracteristică a oțelului, în stare recoaptă, este confirmată și de dispersiile punctelor experimentale față de curbele vitezelor de eroziune, din fig.5.5.b și 5.5.d, în care se poate observa ca la foarte multe durate de atac al cavitației sunt comportări identice a cel puțin două din cele trei probe. Acest mod de comportare este caracteristic doar acelor materiale care au omogenitate structurală și proprietăți mecanice uniforme distribuite în suprafața cavitată [39, 40, 41, 44, 55, 68, 76, 95, 112, 114].

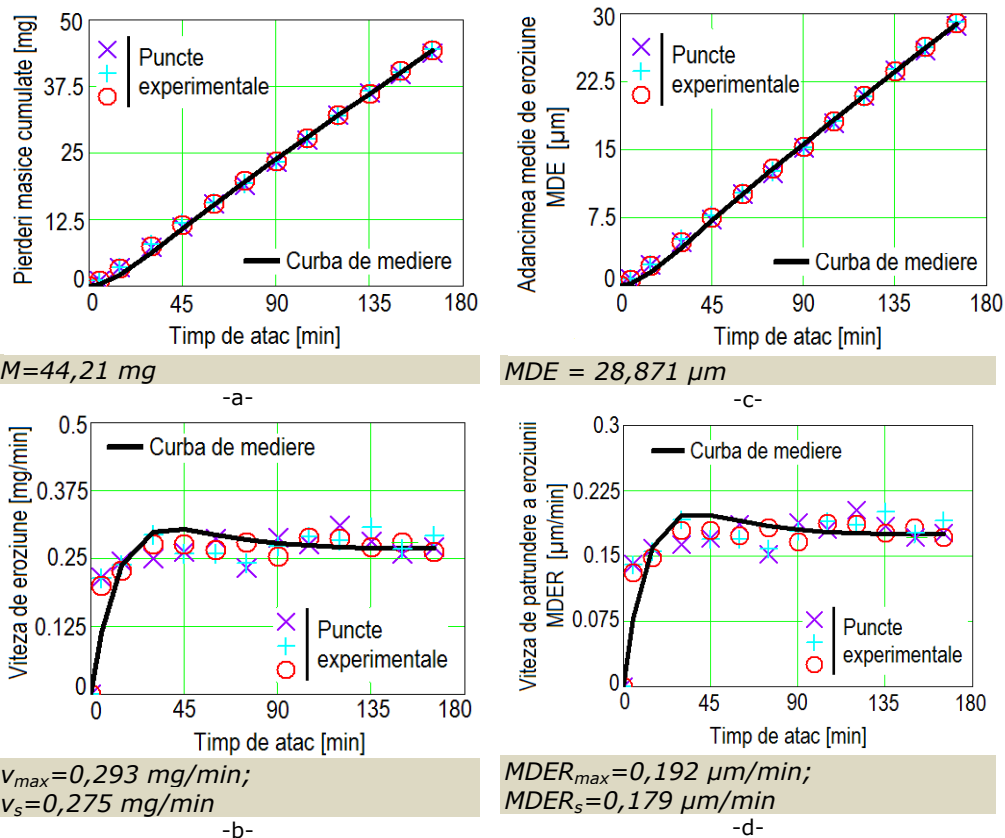


Fig.5.6. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 2, din oțelul 34CrNiMo6, aflat în stare îmbunătățită: a - Pierderi masice cumulate [mg]; b - Viteza de eroziune [mg/min]; c - Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d - Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [$\mu\text{m/min}$]

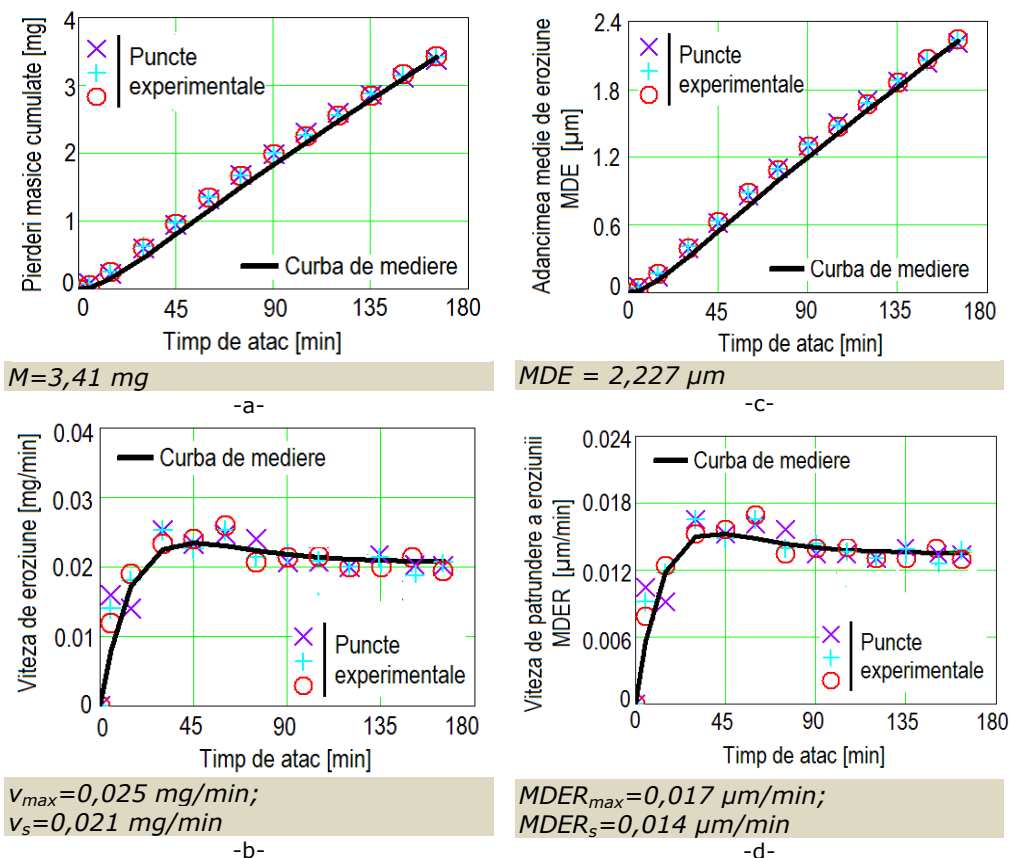


Fig.5.7. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 3, din oțelul 34CrNiMo6, tratat Duplex (îmbunătățire + nitrurare în mediu gazos): a – Pierderi masice cumulate [mg]; b – Viteza de eroziune [mg/min]; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [$\mu\text{m/min}$]

Concluziile ce rezultă din dispersiile punctelor experimentale, față de curbele de mediere, din fig.5.6. și fig.5.7., sunt identice cu cele prezentate la analiza realizată pe starea recoaptă, cu următoarele completări:

1- dispersia punctelor experimentale față de curba de mediere, mult mai redusă la suprafața nitrurată, arată o creștere a gradului de omogenizare și uniformizare a microstructurii stratului nitrurat, respectiv o creștere a caracteristicilor mecanice care influențează rezistența la cavitație, în special a durtății (așa cum se va vedea și în subcapitolul 5.3.5.). Explicația are la bază modificările de structură și de tensiuni remanente generate de tratamentul termochimic de nitrurare, precum și aderența bună a stratului de suprafață la substrat.

Prelucrarea statistică a rezultatelor experimentale, cu verificarea nivelului erorilor s-a făcut conform metodologiei descrise în *capitolul 2*, subcapitolul 2.3. [14, 33, 35].

Curbele de regresie obținute și parametrii calculați pentru seturile de probe aflate în stare recoaptă, îmbunătățită, respectiv tratată Duplex prin îmbunătățire urmată de nitrurare în mediu gazos, sunt prezentate în fig.5.8.

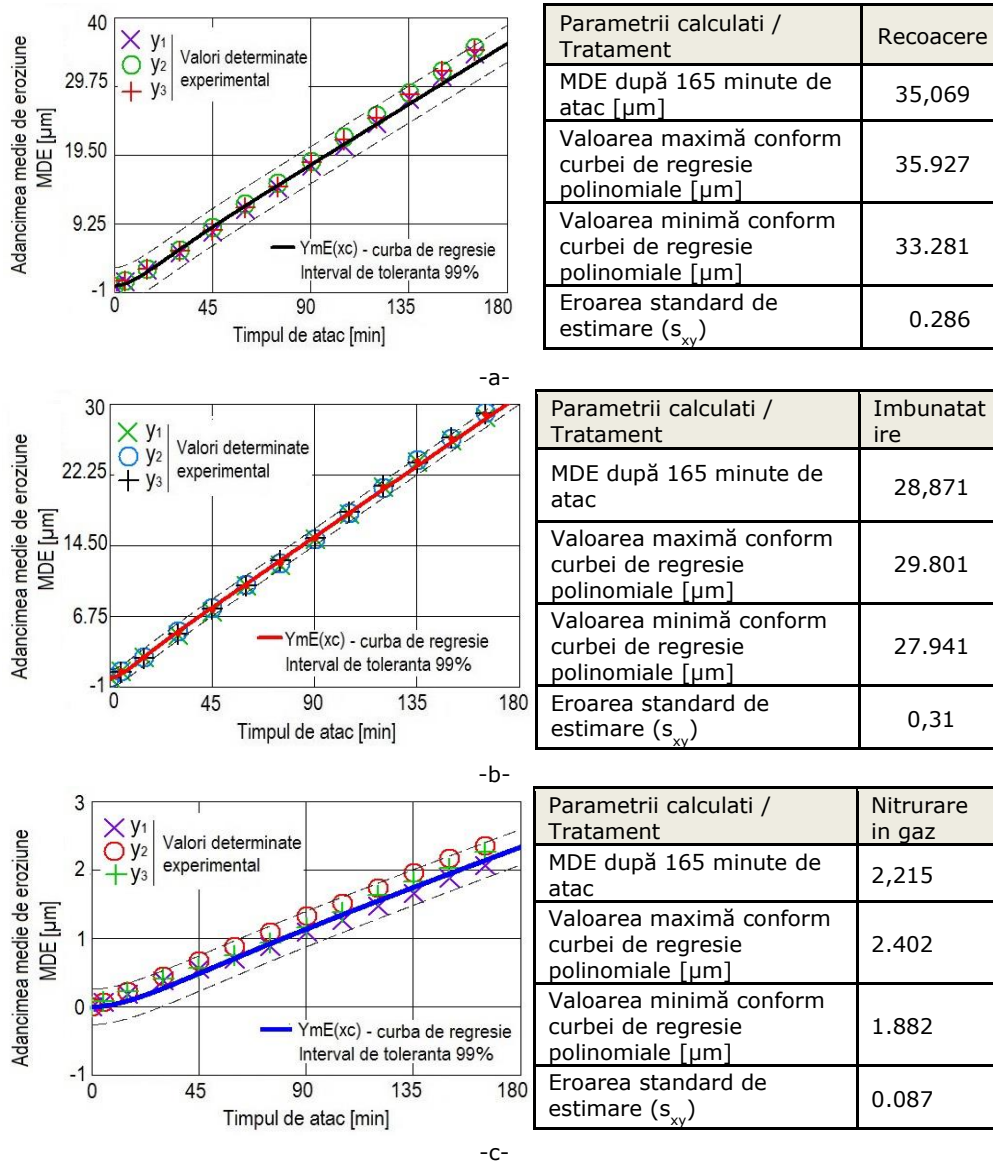
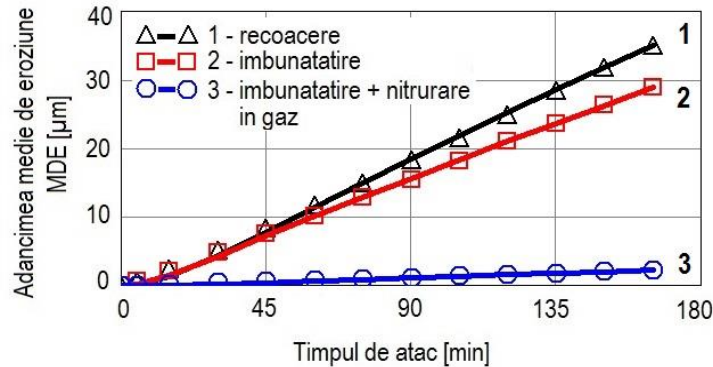


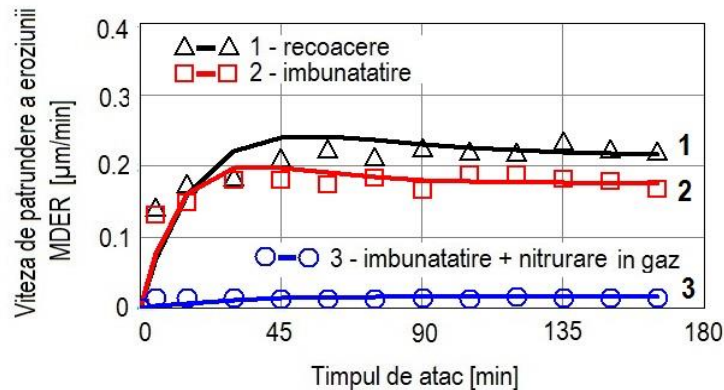
Fig.5.8. Banda de dispersie și valorile parametrilor statistici pentru setul de probe supus tratamentului de: a) recoacere, b) îmbunătățire , c) îmbunătățire + nitrurare în gaz

Valorile foarte mici ale erorii standard de estimare [22, 105], mult sub 0,5 și intervalul de toleranță de 99 % confirmă acuratețea desfășurării experimentului și gradul ridicat al omogenității structurii, respectiv distribuției uniforme a caracteristicilor mecanice ce conferă rezistență la cavitație suprafețelor expuse atacului.

În fig.5.9. și fig.5.10., este comparată rezistența la cavitație, realizată prin cele trei regimuri, pe baza curbelor caracteristice specifice: adâncimea medie cumulată de pătrundere a eroziunii MDE(t), respectiv a viteza medie de pătrundere a eroziunii MDER(t).



MDE1=35,069 μm; MDE2=28,871 μm; MDE3=2,227 μm
 Fig.5.9. Variația adâncimii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației



MDER1=0,22 μm/min; MDER2=0,179 μm/min; MDER3=0,014 μm/min.
 Fig.5.10. Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Datele din cele două fig. 5.9. și 5.10. arată că:

- suprafețele probelor aflate în stare recoaptă (curbele 1), după perioada inițială de incubatie, prezintă pierderi de masă, respectiv adâncimi de eroziune mai mari, care se datorează expulzării masive de grăunți cristalini și părți din aceștia.

Conform investigațiilor din paragrafele anterioare, s-a observat că materialul în această stare se caracterizează printr-o structură microscopică alcătuită din ferită și bainită, constituenți cu caracteristici mai reduse de rezistență mecanică și la eroziune cavitațională [14, 82, 135]. După această fază, viteza de eroziune tinde să se stabilizeze la valori ușor inferioare celei maxime, datorită ecruisării materialului și pătrunderii aerului în cavernele mari rezultate, comportament caracteristic materialelor cu plasticitate ridicată.

- la probele aflate în stare îmbunătățită (curbele 2), formarea structurii sorbitice de revenire (ferită + carburi globulare), caracterizată prin valori ridicate ale limitei de curgere, gâtuirii la rupere și rezilienței, are ca efect creșterea rezistenței suprafeței expuse la eroziune cavitațională.

- probele supuse tratamentului de nitrurare (curbele 3), caracterizate de o creștere semnificativă a durității în stratul superficial (vezi subcapitolul 5.3.5.), au

un comportament superior la eroziune cavitațională, comparativ cu cele mai sus amintite.

- din curbele de variație a adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii MDE(t) fig.5.9., după cele 165 minute de atac, se observă că, rezistența probelor nitrurate, comparativ cu starea recoaptă scade de cca. 15,75 % ori și de circa 12.96 ori față de a probelor îmbunătățite.

În primele 15 minute adâncimile de eroziune sunt neglijabile, deoarece aceasta este perioada de inițiere de fisuri și deformații elasto-plastice [9,10].

- curbele MDER(t) ale probelor aflate în starea recoaptă și îmbunătățită au o evoluție specifică materialelor cu bune caracteristici de ductilitate și tenacitate. Cu o suficientă aproximație se poate constata faptul că până la minutul 30 curbele se suprapun, urmând ca după această durată să se diferențieze, datorită diferențelor microstructurale, de nivelul valoric al proprietăților mecanice și ca urmare a efectului de ecruisare mecanică, diferit ca și grad de durificare, viteza de eroziune a stării îmbunătățite scăzând față de a stării recoapte cu circa 23 %.

- după aplicarea tratamentului termochimic de nitrurare în mediu gazos, valoarea vitezelor medii de pătrundere a eroziunii, cu tendință de stabilizare la valoarea de maxim, comportament specific materialelor cu duritate ridicată și foarte bună rezistență la cavitație, scade de cca. 15,7 ori comparativ cu starea recoaptă, respectiv de 12,8 ori comparativ cu starea îmbunătățită.

5.2.2. Compararea cu materiale de referință

Pentru evidențierea beneficiilor tratamentelor realizate asupra creșterii rezistenței la eroziune cavitațională a oțelului 34CrNiMo6, dar și a stării sale recoapte, în histograma din fig.5.11. sunt comparate valorile adâncimii medii de eroziune MDE, determinate după 165 de minute și ale parametrului rezistență la cavitație (calculat conform relației 2.12 din capitolul 2) cu valorile aferente oțelului etalon 41Cr4 (aflat de asemenea în stare recoaptă).

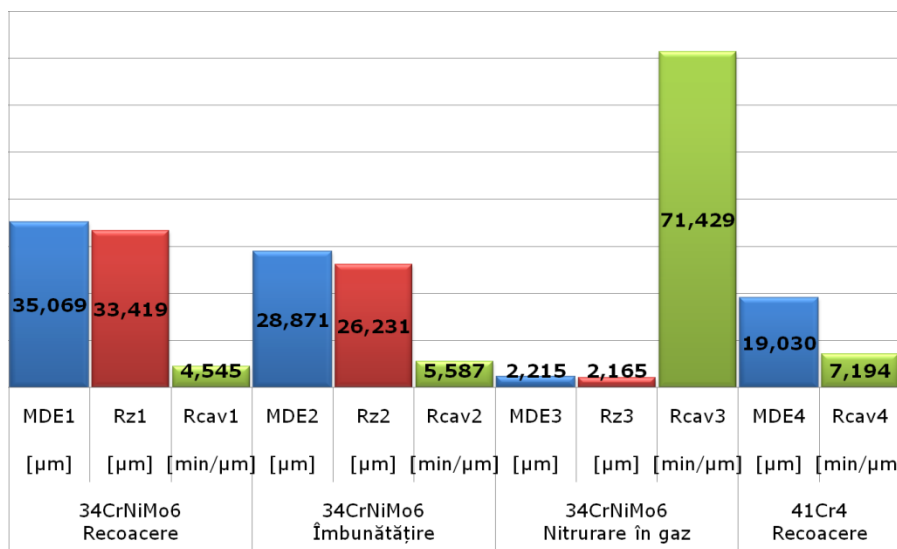


Fig.5.11. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat.

Valorile parametrilor, din histograma din fig.5.11., arată 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.

- față de starea recoaptă a oțelului etalon 41Cr4, starea recoaptă și tratamentul de îmbunătățire aplicate oțelului cercetat 34CrNiMo6, duc la rezistențe inferioare, cu cca. 58 %, respectiv cu cca. 29 %, iar tratamentul duplex, cu nitrurare în mediu gazos, duce la un spor de circa 10 ori.

- adâncimea de pătrundere a eroziunii MDE, determinată pe baza valorilor experimentale, după 165 minute, indiferent de tipul tratamentului (termic sau termochimic), are valori ușor superioare rugozității R_z măsurată cu aparatul Mitutoyo, la finalul testului de cavitație. Apreciez că diferența este cauzată de calculul parametrului MDE, pe baza pierderilor masice, relativ mari din primele minute afectate de praful abraziv și rugozitatea suprafeței, factori ce nu caracterizează efectul mecanic, propriu-zis, al eroziunii cavitației.

5.3. Investigații microstructurale

5.3.1. Microscopie optică

Figurile 5.12., 5.13. și 5.14. prezintă microstructurile de recoacere, de îmbunătățire și cea rezultată în urma nitrurării în mediu gazos, a oțelului 34CrNiMo6, obținute cu ajutorul microscopului optic și electronic cu baleiaj.

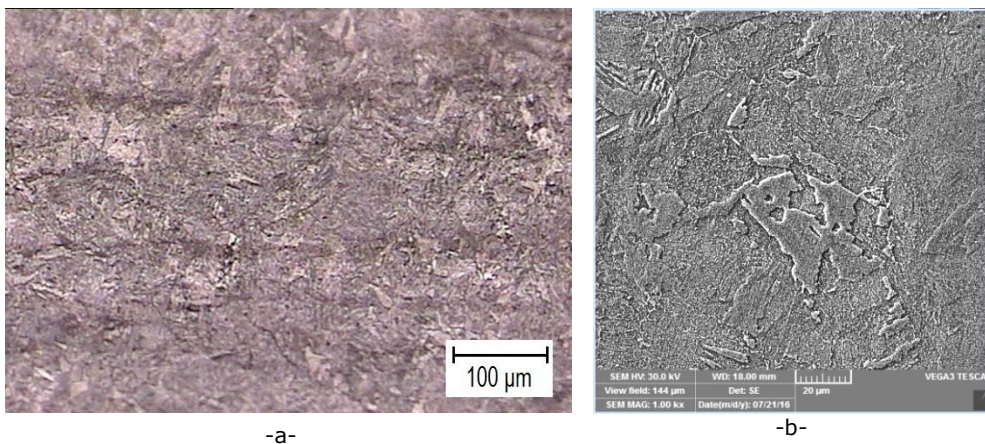


Fig.5.12. Microstructura de recoacere a) x100; b) x500

În stare recoaptă, aceasta este constituită din ferită proeutectoidă și bainită (fig.5.12.) [83]; după îmbunătățire rezultă o structură sorbitică de revenire, formată din ferită aciculară și carburi globulare, care asigură cel mai bun raport între rezistență, ductilitate și tenacitate (fig.5.13.) [83].

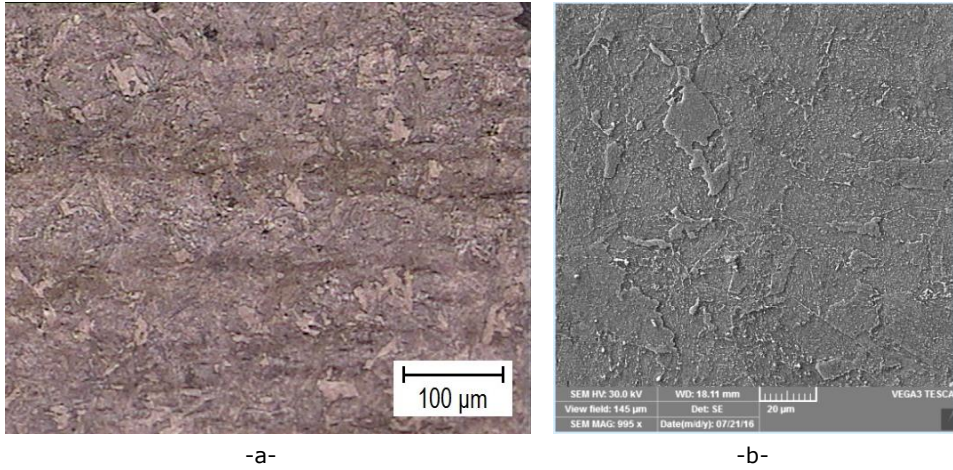


Fig.5.13. Microstructura de îmbunătățire a) x100; b) x500

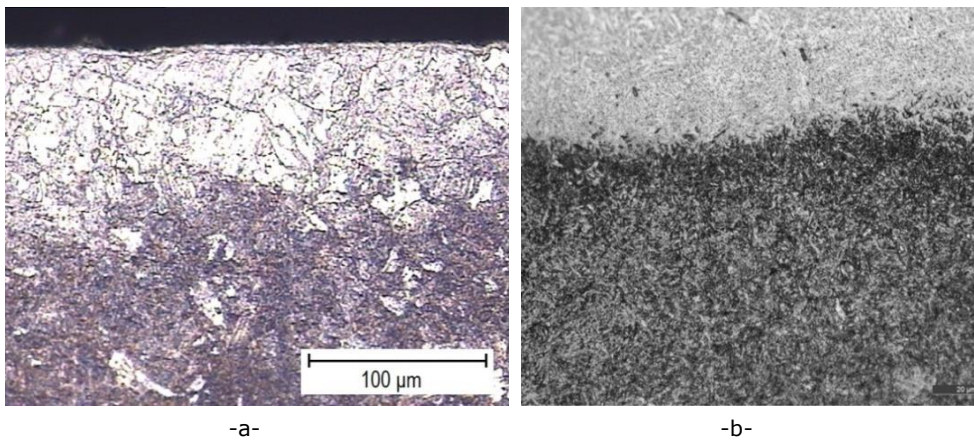


Fig.5.14. Microstructura stratului nitrurat în mediu gazos a) x100; b) x500

În urma tratamentului de nitrurare, apar nitruri în stratul superficial, care îi conferă acestuia o creștere semnificativă de duritate (fig.5.14.).

5.3.2. Determinarea elementelor chimice prin analize de dispersie în energie a razelor X

Figurile 5.15. și 5.16. sunt arătate rezultatele analizelor EDX (analize de dispersie în energie a razelor X), care permit identificarea elementelor chimice existente în probele îmbunătățite, respectiv nitrurate.

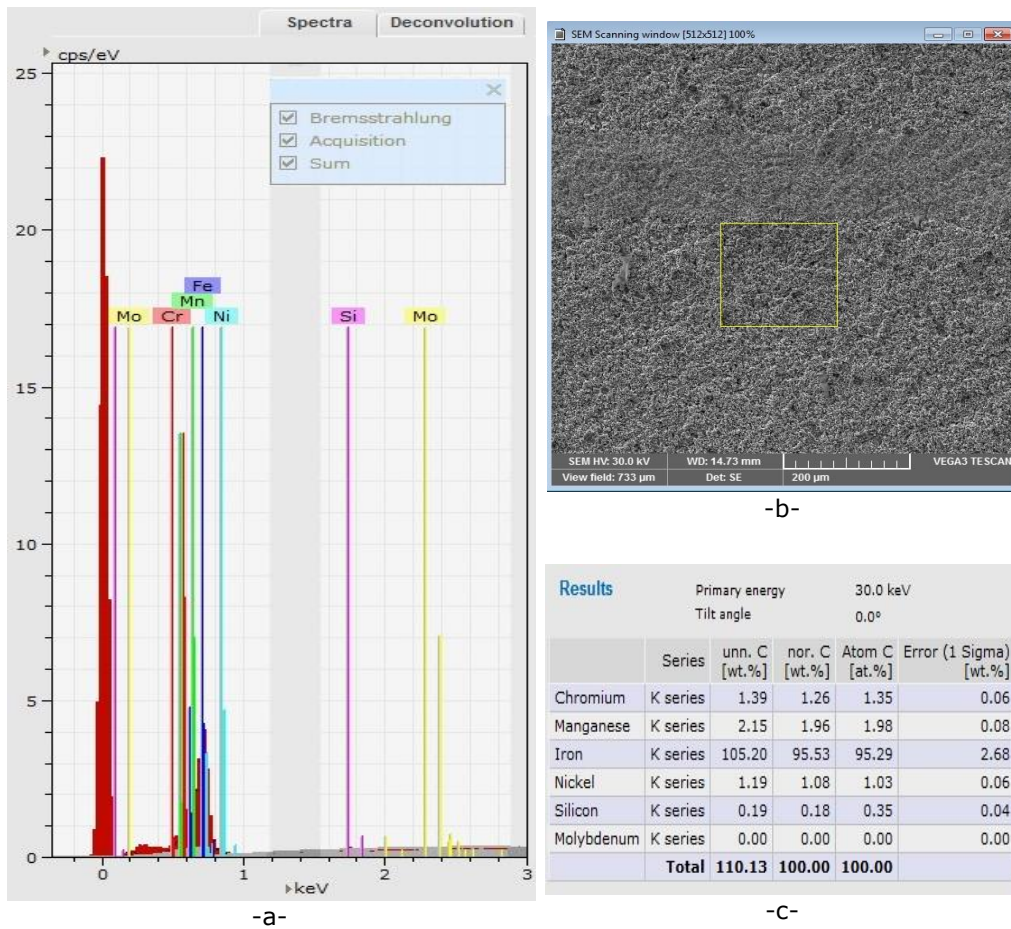


Fig.5.15. Investigații spectrografice ale probelor îmbunătățite: a - spectrele de dispersie; b - imaginea SEM a zonei investigate; c - elementele chimice descoperite

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

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

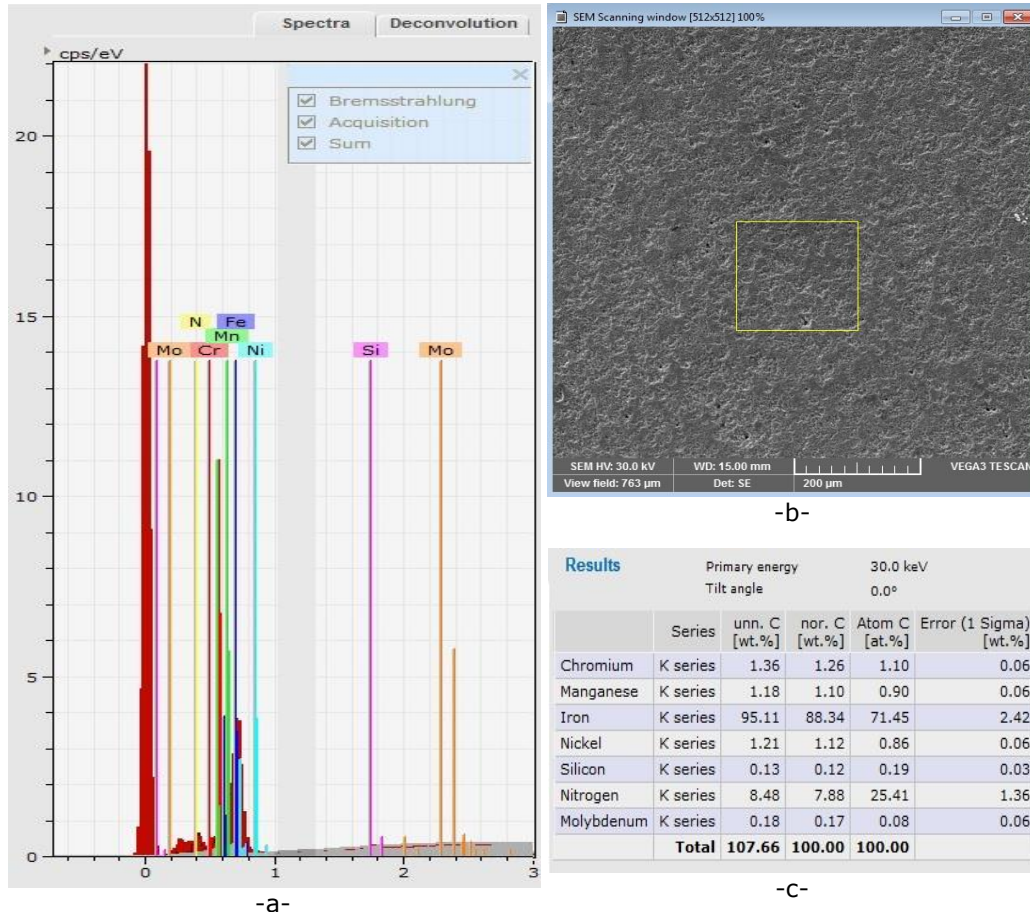


Fig.5.16. Investigații spectrografice ale probei nitrurate: a - spectrele de dispersie;

b - imagine SEM a zonei investigate; c - elementele chimice descoperite.

5.3.3. Determinarea fazelor existente prin analize de difracție cu raze X

Pentru punerea în evidență a fazelor constitutive din probele aflate în stare recoaptă și îmbunătățită, precum și a celor aflate în stare nitrurată în mediu gazos, s-au realizat analize de difracție cu raze X, folosindu-se o radiație monocromatică $\text{Cu K}\alpha$, cu lungime de undă de 1.541840 Å. Parametrii de proces sunt următorii:

- intensitatea: 30 [mA]
- tensiunea: 40 [KV]
- mărimea pasului: 0,04mm
- timpul pe pas: 0,5 [s]
- timp de scanare: 0,08 [s]
- unghiul de scanare : 20 – 90 [°]

Fig.5.17.(a și b) arată imaginile de difracție cu raze X pentru cele două stări de tratament.

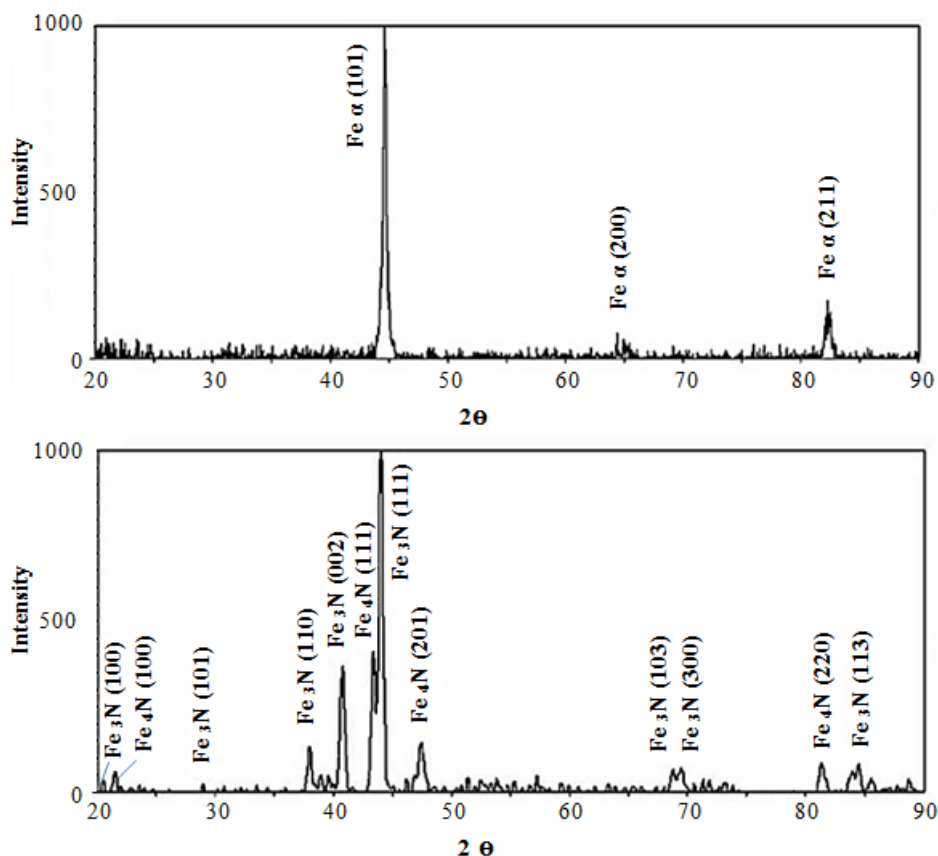


Fig.5.17. Investigații prin difracție cu raze X: a - probe în stare recoaptă și îmbunătățită; b - probe în stare nitrurată în mediu gazos.

Imaginile de difracție ale probelor (fig.5.17.a), scot în evidență doar prezența feritei în structura oțelului aflat în stare recoaptă și îmbunătățită. Reflexiile rețelilor cubice ale feritei produc trei vârfuri, indexate ca (101), (200) și (211), care apar la valori ale unghiului 2θ de aproximativ 46.456° , 72.430° și 82.335° .

În cazul probelor aflate în stare nitrurată în mediu gazos (fig.5.17.b), imaginile de difracție scot în evidență doar prezența nitrurilor în constituția materialului.

Reflexiile structurilor hexagonale ale fazelor ϵ de tipul Fe₃N au scos în evidență opt vârfuri, indexate ca (100), (101), (110), (002), (111), (103), (300) și (113), care apar la valori ale unghiului 2θ de aproximativ 21.850° , 29.898° , 38.326° , 41.256° , 43.742° , 68.293° , 69.301° și 61.262° .

Reflexiile fazele γ de tipul Fe₄N, cu structură cubică, produc patru vârfuri, și anume (100), (111), (200) și (220), care apar la valori ale unghiului 2θ de aproximativ 22.042° , 43.685° , 48.104° și 57.955° .

Prezența nitrurilor în structura materialului confirmă faptul că tratamentul de nitrurare s-a efectuat în mod corespunzător.

5.3.4. Microscopie electronică cu baleiaj, topografia suprafețelor

Îmbogățirea în azot a stratului de suprafață favorizează o creștere semnificativă a durității determinată de nitrurile elementelor de aliere din oțel, ce împiedică deplasările atomilor de-a lungul planurilor de alunecare. Valorile ridicate ale durității stratului de suprafață, alături de o stare mai înaltă a tensiunilor remanente de compresiune, se manifestă printr-o ridicare a limitei de oboseală și implicit a rezistenței la eroziune prin cavitație.

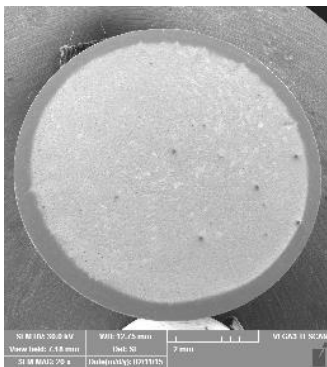
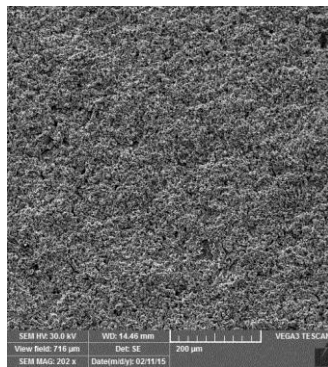
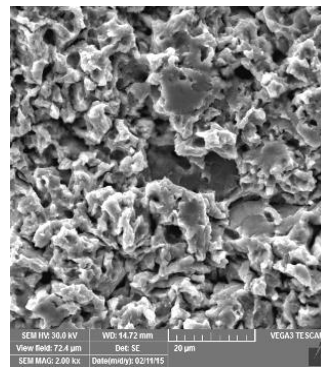


Fig.5.18. Macrografia suprafeței cavitate a probelor recoapte: x 20



- a -



- b -

Fig.5.19. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor recoapte: a) x200; b) x2000

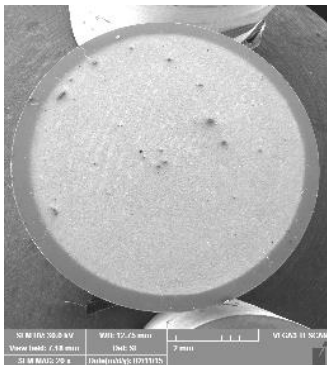
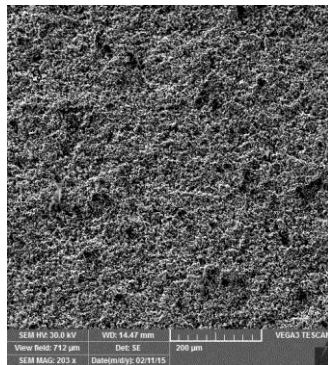
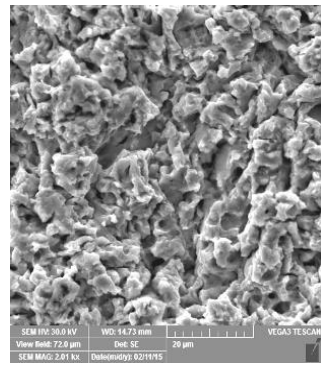


Fig.5.20. Macrografia suprafeței probelor îmbunătățite: x20



- a -

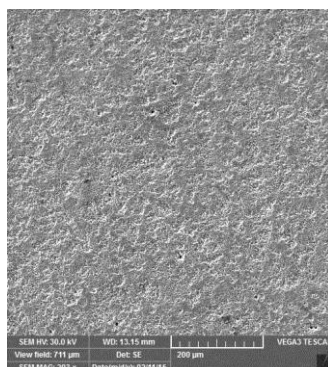


- b -

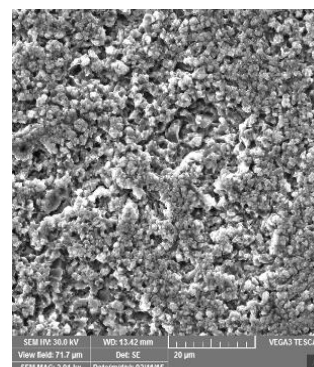
Fig.5.21. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor îmbunătățite: a) x200; b) x 2000



Fig.5.22. Macrografia suprafeței probelor nitrurate: x 20



- a -



- b -

Fig.5.23. Imaginea SEM a suprafeței cavitate a probelor nitrurate: a) x200; b) x2000

Topografiile tipice ale suprafețelor probelor tratate diferit și testate la cavitație sunt exemplificate în fig.5.18...5.23. Din analiza acestora se poate constata 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. 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.

La probele tratate Duplex, amorsele de fisurare sunt determinate de particulele de nitruri 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.

5.3.5. Examinări sclerometrice

Analizele realizate pe baza parametrilor și a microfotografiilor structurilor erodate, confirmă importanța alegerii tehnologiei în tratarea suprafeței expuse atacului cavitației, pentru obținerea unei durități adecvate, cu o structură fină și omogenă, care să asigure valori ridicate ale proprietăților mecanice.

Variația durității pe secțiunea transversală a probelor nitrurate cu fascicul laser, fig.5.24.

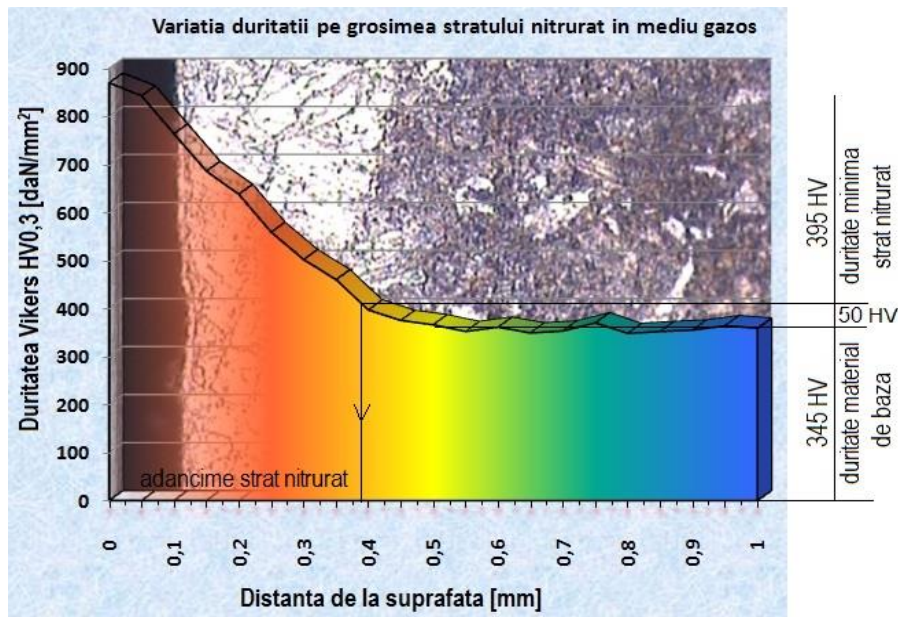


Fig.5.24. Variația durității pe secțiunea stratului tratat Duplex prin nitrurare în mediu gazos.

În zona marginală, apar valori de duritate, $HV_{0.3} = 870 \text{ daN/mm}^2$, acestea urmând să scadă treptat spre interiorul piesei, proporțional cu conținutul de azot și natura constituenților structurali rezultați. Aceste straturi superficiale, constituite din combinații chimice ale azotului, cu Fe și celelalte elemente chimice de aliare, sunt caracterizate printr-o densitate mare de defecte ale rețelei cristaline, ceea ce îi conferă o duritate ridicată.

Adâncimea utilă de nitrurare [83] se consideră ca fiind distanța de la suprafață până în punctul în care duritatea stratului depășește cu 50 HV duritatea miezului, adică este de cca. 0,38 mm.

5.4. Concluzii

Aplicarea tratamentului de nitrurare în mediu gazos, prin nitrurile formate în stratul superficial, favorizează o creștere a rezistenței la eroziune prin cavitație de cca. 17,5 ori comparativ cu starea recoaptă, respectiv de cca 10 ori față de cea a oțelului etalon 41Cr4.

Structura materialului de baza în stare îmbunătățită, formată din ferită și carburi globulare, asigura ce mai bun raport între caracteristicile de rezistență mecanică și cele de ductilitate și tenacitate pentru miezul constituit din materialul de bază.

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.

Topografiile suprafeței cavitare evidențiază o degradare preferențială a zonelor de ferită, constituent microstructural moale și plastic, cu o rezistență mecanică redusă.

Microstructura rezultată în urma nitrurării, având duritate ridicată, suferă o degradare lentă și uniformă, cu ciupituri extreme de fine.

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

6.1. Tratamente aplicate

Probele pentru testare, au fost realizate dintr-o bară cilindrică cu diametrul de 25 mm, din oțel aliat 34CrNiMo6, supusă în prealabil tratamentului termic de recoacere pentru înmuiere după care a urmat tratamentul termic de îmbunătățire și prelucrarea prin rectificare + lustruire la o rugozitate $R_z = 0,2 \div 0,5 \mu\text{m}$ a suprafeței de atac cavitațional.

Ulterior prelucrării prin așchiere, o parte din probele îmbunătățite au fost supuse tratamentului termochimic de nitrurare cu fascicul laser, folosind tot instalația de tăiere cu laser Nd-YAG, marca Triumph HL 124 P LCU, cu putere $P_{\text{instalație}} = 300 \text{ W}$, prezentată în capitolul 4, fig.4.2., respectându-se următorii parametrii de proces:

- puterea pulsului pentru cele trei regimuri: $P = 240 \text{ W};$
 $P = 180 \text{ W};$
 $P = 120 \text{ W};$
- durata pulsului $t = 8 \text{ ms};$
- frecvența de repetiție a pulsului: $10 \text{ Hz};$
- viteză de trecere constantă $v = 4.07 \text{ mm/s}.$

Pentru tratamentul de nitrurare s-a folosit o cameră etanșă, cu atmosfera controlată de azot pur, al cărui debit a fost de 33 l/min.

Pentru identificare, în descrierea de mai jos sunt utilizate următoarele notații:

- 1 – pentru probele realizate din oțel în stare recoaptă + îmbunătățită;
- 2 – pentru probele nitrurate cu fascicul laser la $P = 240 \text{ W};$
- 3 – pentru probele nitrurate cu fascicul laser la $P = 180 \text{ W};$
- 4 – pentru probele nitrurate cu fascicul laser la $P = 120 \text{ W};$

Ca procedură (vezi principiul din fig.6.1.), nitrurare cu fascicul laser (laser nitriding), [30, 31, 49, 51, 57, 59, 65, 91, 115, 116, 119, 123] reprezintă o variantă modernă de tratament termochimic, a constat din introducerea piesei într-o cameră etanșă, din care în prealabil a fost scos aerul și înlocuit cu azot pur la o presiune de 2-3 bar, suprafața piesei fiind bombardată cu un fascicul laser pulsator.

Sub acțiunea razei laser, stratul superficial de metal s-a topit pe o anumită adâncime, dependentă de parametrii fasciculului, la suprafața probei formându-se plasmă bogată în ioni de azot, care au migrat, prin difuzie accelerată, în masa de topitură.

La întreruperea fasciculului, prin răcire rapidă, solubilitatea azotului în soluția solidă a materialului de bază (ferita, austenita) scade, crescând proporția de nitruri dispersate uniform în aceasta [83].

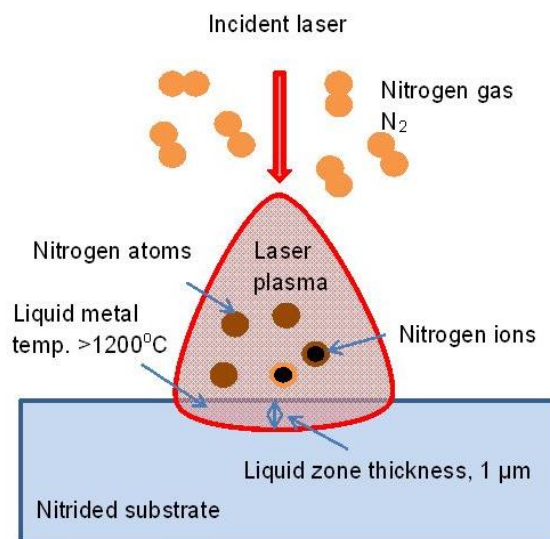


Fig.6.1. Principiul nitrurării cu fascicul laser [30]

Procedeul nu a determinat modificarea semnificativă a caracteristicilor mecanice și structurale ale materialului de bază, cum se întâmplă la procedeele clasice, datorate expunerii la temperaturi mari.

Prin consumul redus de energie și durata mică de execuție, nitrurarea în gaz cu laser este mai avantajoasă și față de metodele clasice de nitrurare (în mediu gazos și în plasmă), care implică consumuri substanțiale de energie și timpi mari de execuție.

Impedimentul nitrurării cu fascicul laser este dat de necesitatea unor instalații mai sofisticate și scumpe, dar care permit randamente mult superioare, în timpi foarte scurți, doar pe anumite zone de interes, nefiind necesară protejarea zonelor care nu trebuiesc nitrurate prin depuneri de Sn. Un alt dezavantaj al nitrurării cu laser constă în deformarea planeității suprafețelor la impactul cu fasciculul laser.

Procedeul de durificare prin nitrurare laser prezintă avantajul reducerii duratei de realizare a tratamentului, respectiv concentrarea pe anumite zone de interes, fără a afecta în profunzime materialul de bază.

6.2. Teste de cavitație

6.2.1. Curbe caracteristice

Suprafețele probelor, degradate de eroziunea cavitației, sunt prezentate în fig.6.2., la trei timpi semnificativi, care arată evoluția deteriorării cu durata atacului. Aceste imagini fotografice pun în evidență aspectul vălurit al suprafețelor și gradul de erodare, care este proporțional cu puterea fasciculului laser.

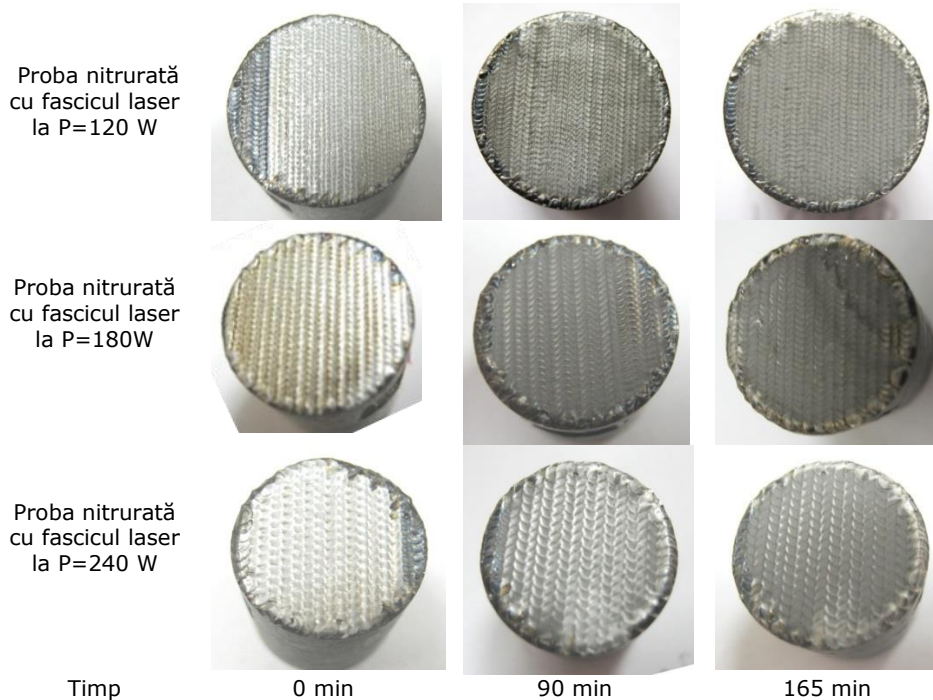
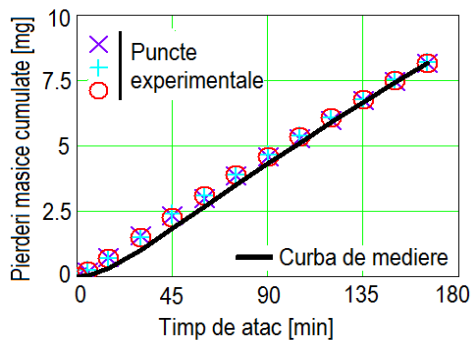


Fig.6.2. Suprafețe tratate prin nitrurare cu fascicul laser la trei regimuri de putere, supuse la cavitație, la diferite intervale de timp

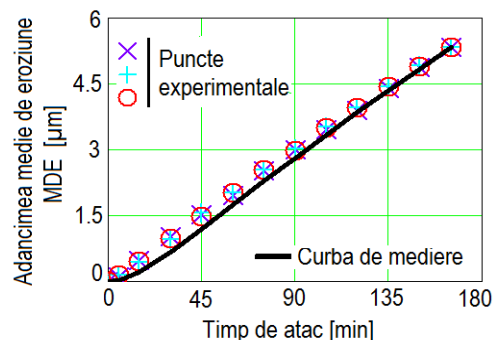
Ca și în cazurile anterioare, programul de testare experimentală la cavitație, s-a realizat conform cutumei Laboratorului de Cavitație [33, 61, 63, 77, 90, 105]; pentru fiecare regim de putere a fasciculului laser testându-se câte trei probe.

Pentru caracterizarea comportării suprafețelor nitrurate, la atacul cavitației vibratoare, în fig.6.3...6.5. sunt afișate rezultatele testului de cavitație, exprimate prin valorile experimentale ale masei erodate, vitezei pierderilor de masă și ale parametrilor derivați (adâncimea medie de eroziune, respectiv viteza medie de pătrundere a eroziunii), mediate de curbele construite cu relațiile analitice prezentate în capitolul 2.



$M = 8,17 \text{ mg}$

-a-



$MDE = 5,335 \mu\text{m}$

-c-

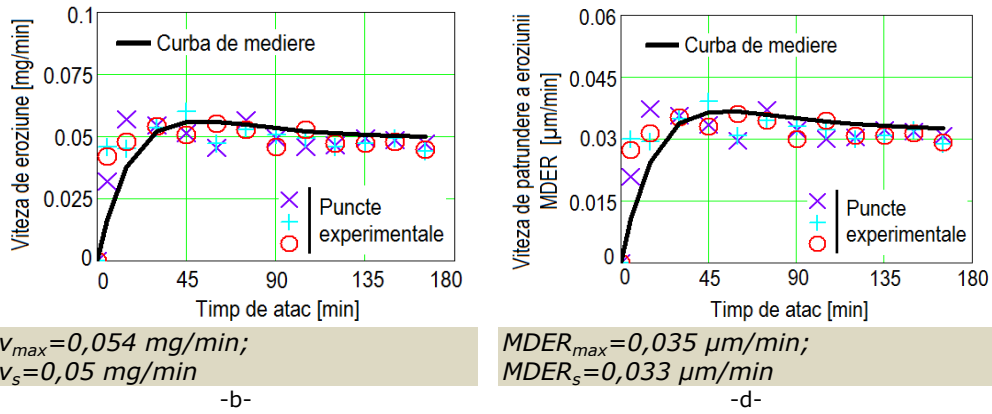


Fig.6.3. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 2, din oțelul 34CrNiMo6, tratat Duplex (îmbunătățire + nitrurare laser la P=240 W: a – Pierderi masice cumulate [mg]; b – Viteza de eroziune [mg/min]; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [μm/min]

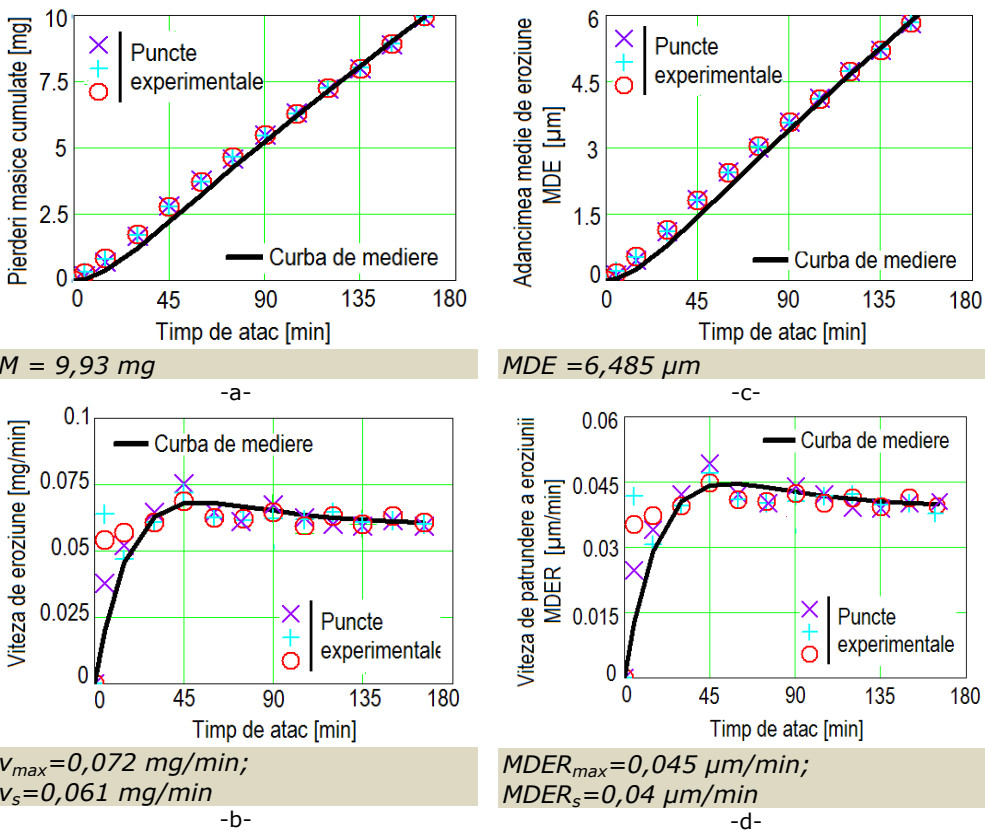


Fig.6.4. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 2, din oțelul 34CrNiMo6, tratat Duplex (îmbunătățire + nitrurare laser la P=180W: a – Pierderi masice cumulate [mg]; b – Viteza de eroziune [mg/min]; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [μm/min]

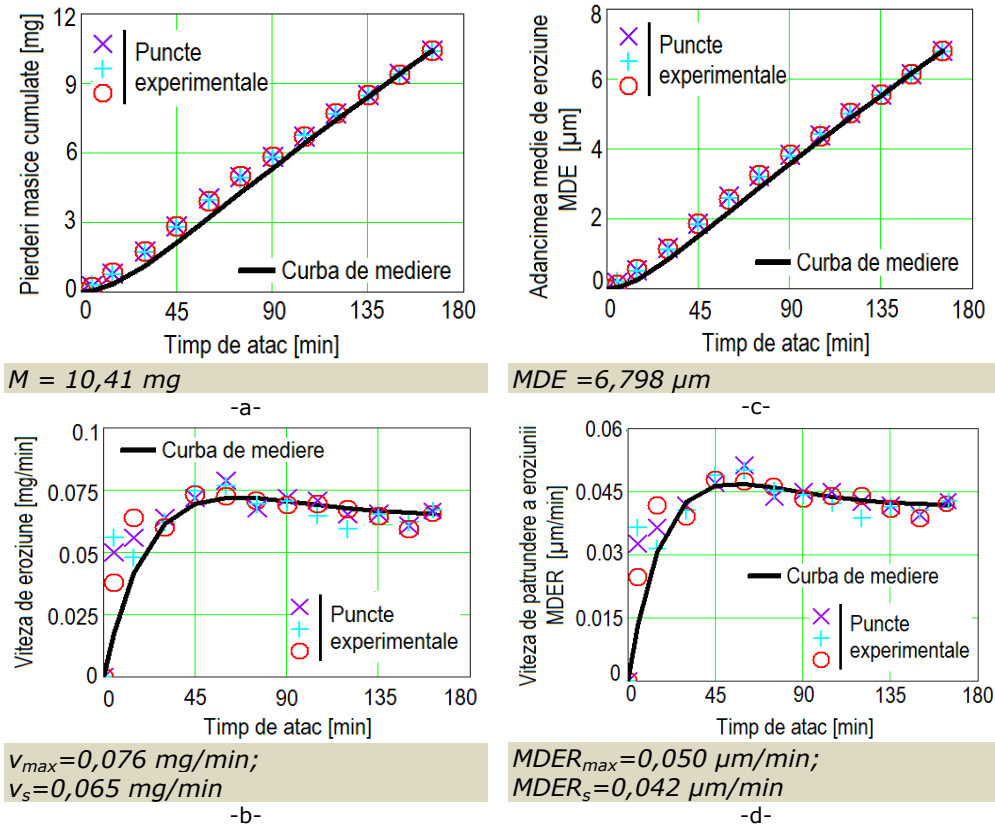


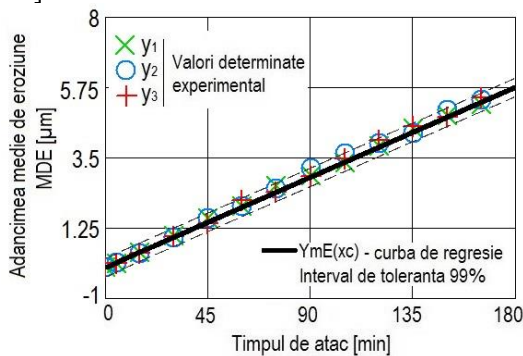
Fig.6.5. Curbele caracteristice de variație a parametrilor cavitaționali, pentru setul 2, din oțelul 34CrNiMo6, tratat Duplex (îmbunătățire + nitrurare laser la P=120W:
 a – Pierderi masice cumulate [mg]; b – Viteza de eroziune [mg/min]; c – Adâncimea medie de eroziune, MDE [μm]; d – Viteza de pătrundere a eroziunii, MDER [$\mu\text{m}/\text{min}$]

Din modul de evoluție al curbelor de mediere și după gradul de dispersie a valorilor experimentale se desprind următoarele concluzii:

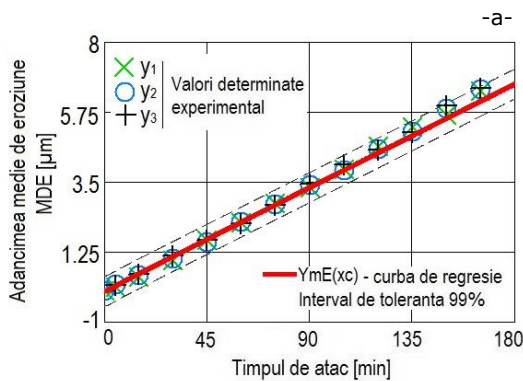
- dispersia redusă a punctelor experimentale, față de curba de mediere, este consecința durității stratului nitrurat, respectiv a caracteristicilor mecanice care influențează rezistența la cavitație;
- în primele 15 minute ale cavitației vibratoare, indiferent de puterea razei laser, după valorile parametrului MDER (fig.5.19.b, 5.20.b, 5.21.b), se creează impresia că straturile nitrurate ale suprafețelor au o slabă rezistență la atacurile cavitației. Însă, studiile realizate în cadrul Laboratorului de Cavitație, al Universității Politehnica Timișoara [3, 10, 33, 61, 63, 77, 90, 105], timp de peste 70 de ani, arată că rezultatele obținute în acest interval de atac al cavitației, nu sunt certificate pentru comportarea și rezistența suprafeței la solicitările create de impactul cu microjeturile și undele de șoc, datorită faptului că în acest interval au loc expulzări ale oxizilor și crustelor dure formate prin procedura de tratament și care nu au putut fi îndepărtate, la debutul experimentului, prin procesul de curățare și spălare;
- după 60 minute de cavitație, suprafețele nitrurate ale celor trei probe, din fiecare regim, manifestă rezistență și comportare similară; foarte multe

- valori experimentale ale vitezelor de eroziune (fig.6.3.b și d, fig.6.4.b și d, fig.6.5.b și d) se suprapun;
- evoluția aproximativ liniară a curbelor $M(t)$ și $MDE(t)$, pe intervalul 30(45)-165 minute și tendința asimptotică a curbelor $v(t)$ și $MDER(t)$ către valoarea de maximă a vitezei sunt fenomene caracteristice suprafețelor materialelor cu excelentă rezistență la cavitația creată de aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice [2, 4, 11, 14, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23];
 - dispersiile reduse ale punctelor experimentale (după minutul 75), față de curbele de mediere, sunt cauzate de duritatea ridicată, conferită de nitrurile formate, de distribuția omogenă a durității în aria suprafeței nitrurate și de acuratețea derulării procesului de nitrurare cu rază laser, pe cele trei probe testate la cavitație. Acest aspect este confirmat și de imaginile fotografice ale probelor (alese arbitrar), realizate la finalul testului, fig.6.2.;
 - cea mai redusă dispersie este obținută pentru regimul de nitrurare cu o putere în impulsul laser de 240 W, probabil și datorită și celor mai mari valori ale durității.

Similar procedurilor anterioare, în fig.6.6. sunt date benzile de dispersie ale celor trei regimuri, folosind valorile medii aritmetice ale adâncimilor de eroziune MDE, ale celor trei probe, pentru fiecare regim de putere. Acuratețea desfășurării experimentului este certificată de intervalul de toleranță de 99 % și de valorile foarte mici ale erorii standard de estimare, mult sub 0,5 [33, 61, 63, 77, 90, 104, 105].

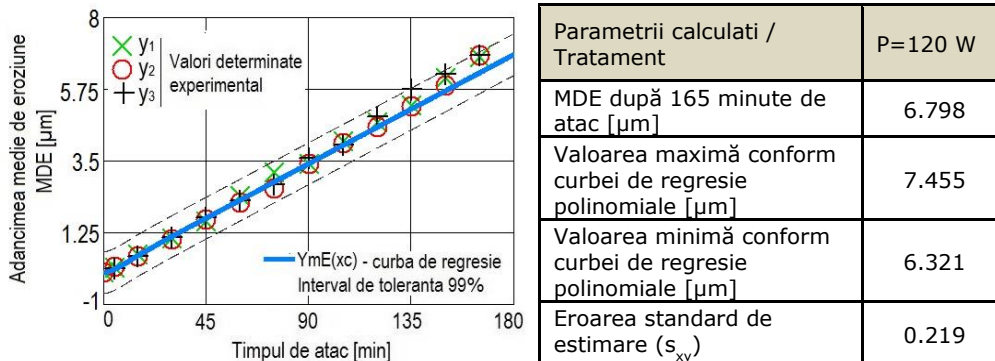


Parametrii calculati / Tratament	P=240 W
MDE după 165 minute de atac [μm]	5,335
Valoarea maximă conform curbei de regresie polinomiale [μm]	5.629
Valoarea minimă conform curbei de regresie polinomiale [μm]	5.041
Eroarea standard de estimare (s_{xy})	0.098



Parametrii calculati / Tratament	P=180 W
MDE după 165 minute de atac [μm]	6,485
Valoarea maximă conform curbei de regresie polinomiale [μm]	6.968
Valoarea minimă conform curbei de regresie polinomiale [μm]	6.002
Eroarea standard de estimare (s_{xy})	0.161

-b-

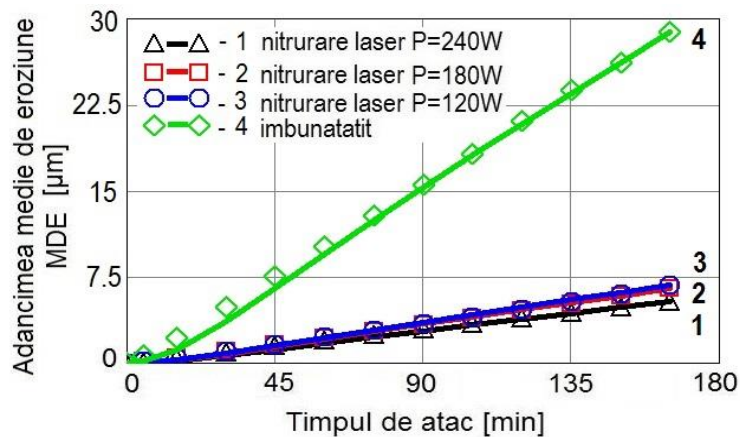


-c-

Fig.6.6. Banzile de dispersie și valorile parametrilor statistici ale probelor pentru setul de probe supus tratamentului de: a) nitrurare laser P=240W; b) nitrurare laser P=180W; c) nitrurare laser P=120W

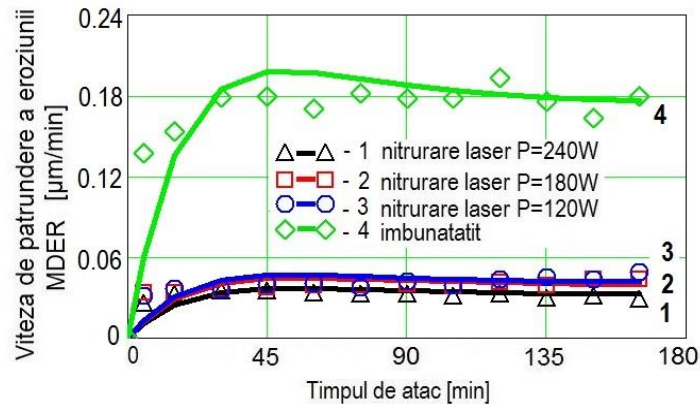
Punctele experimentale puțin dispersate față de curba de mediere, confirmă o uniformizare a microstructurii stratului nitrurat, respectiv a caracteristicilor mecanice care influențează rezistența la cavitație.

În fig.6.7. și 6.8. sunt comparate rezultatele experimentale obținute prin cele trei regimuri de putere și exprimate de valorile experimentale medii aritmetice ale celor probe, pentru fiecare regim, cu rezultatele obținute pentru starea recoaptă.



MDE1 = 5,335 μm ; MDE2 = 6,485 μm ; MDE3 = 6,798 μm ; MDE4 = 28,871 μm

Fig.6.7. Variația pierderilor masice cumulate cu durata cavitației



MDER1 = 0,033 μm/min; MDER2 = 0,040 μm/min;
MDER3 = 0,042 μm/min; MDER4 = 0,179 μm/min

Fig.6.8. Variația vitezei de eroziune cu durata cavitației

Atât curbele MDE(t), fig.6.7., cât și curbele MDER(t), fig.6.8., arată că prin niturare în mediu gazos cu laser, indiferent de puterea razei, se realizează o creștere substanțială a rezistenței la cavitație, față de a probelor recoapte. Reducerea adâncimii de eroziune, după 165 minute de atac al cavitației, respectiv a vitezei medii de pătrundere a eroziunii, funcție de puterea razei, este de 4,2...5,4 ori.

Dintre cele trei regimuri de niturare laser, cea mai mare rezistență o conferă cea cu puterea razei de 240 W.

Explicația acestor creșteri de rezistență la cavitație este îmbogățirea în azot a stratului de suprafață care favorizează o creștere semnificativă a durezza determinată de nitrurile formate cu elementele de aliere din oțel, ce împiedică deplasările atomilor de-a lungul planurilor de alunecare. Valorile ridicate ale durezza stratului de suprafață alături de o stare mai înaltă a tensiunilor remanente de compresiune, se manifestă printr-o ridicare a limitei de oboseală [9, 30, 48, 82, 83] și implicit a rezistenței la eroziune prin cavitație.

În histograma din fig.6.9. este realizată compararea principalilor parametri, recomandați de normele ASTM G32-2010 și folosiți în evaluare de laboratorul nostru de cavitație, pentru toate procedurile de niturare în gaz, cu ai oțelului de referință 41Cr4, în stare recoaptă.

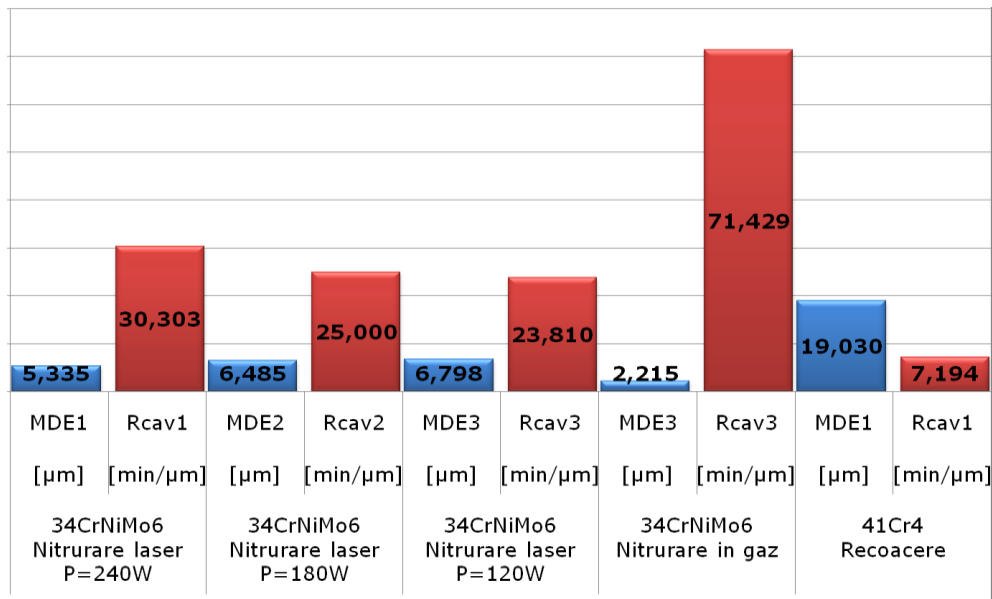


Fig.6.9. Variația parametrilor distrugerii prin cavitație funcție de tratamentul aplicat.

Din analiza histogramei, fig.6.9., comparativ cu oțelul etalon 41Cr4 și probele nitrurate în gaz, rezultă:

- nitrurarea cu laser, având o putere de 240 W, conduce la o adâncime medie de eroziune, după 165 minute de atac al cavitației, de circa 3,6 ori mai mică decât a oțelului etalon și de circa 2,4 ori mai mică decât a suprafeței nitrurate în gaz;
- nitrurarea cu laser, având o putere de 180 W, conduce la o adâncime medie de eroziune, după 165 minute de atac al cavitației, de circa 3 ori mai mică decât a oțelului etalon și tot de circa 3 ori mai mică decât a suprafeței nitrurate în gaz;
- nitrurarea cu laser, având o putere de 120 W, conduce la o adâncime medie de eroziune, după 165 minute de atac al cavitației, de circa 2,8 ori mai mică decât a oțelului etalon și de circa 3,1 ori mai mică decât a suprafeței nitrurate în gaz;
- nitrurarea cu laser, având o putere de 240 W, conduce la o rezistență la cavitație, de circa 4,2 ori mai mare decât a oțelului etalon și de circa 2,4 ori mai mică decât cea a suprafeței nitrurate în gaz;
- nitrurarea cu laser, având o putere de 180 W, conduce la o rezistență la cavitație, de circa 3,5 ori mai mare decât a oțelului etalon și de circa 2,9 ori mai mică decât cea a suprafeței nitrurate în gaz;
- nitrurarea cu laser, având o putere de 120 W, conduce la o rezistență la cavitație, de circa 3,3 ori mai mare decât a oțelului etalon și de circa 3 ori mai mică decât cea a suprafeței nitrurate în gaz.

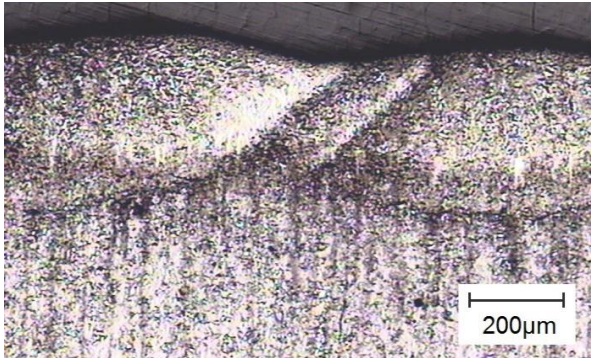
Deși prin procedeul de nitrurare cu laser, conduce la rezistențe la cavitație, substanțial mai mici, decât nitrurarea clasică în mediu gazos, ea este recomandată datorită avantajului de cost redus și a perioadei de realizarea a tratamentului mult mai mici (cca. 3 min în cazul nitrurării laser, comparativ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

6.3. Investigații microstructurale

6.3.1. Microscopie optică

Probele nitrurate și testate cavitațional, au fost secționare pe generatoare, rectificare, lustruite și investigate la microscopul optic.

În fig.6.10. sunt prezentate straturile obținute prin cele trei regimuri de putere.

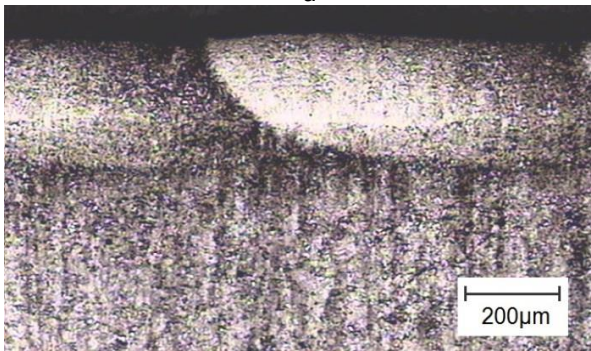


-a-

<- strat nitrurat compus din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α ;

<- strat de tranziție cu structura bainito-martensitică;

<- strat material de bază.

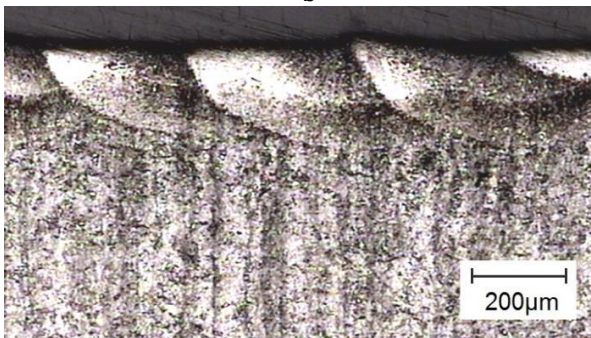


-b-

<- strat nitrurat compus din nitruri de tip ϵ și γ' încorporate în matricea de soluție solidă α ;

<- strat de tranziție cu structura 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 structura bainito-martensitică;

<- strat material de bază.

Fig.6.10. Secțiune prin stratul nitrurat cu fascicul laser:

a) la $P = 240W$, b) la $P = 180W$, c) la $P = 120W$,

Din imaginile prezentate în fig.6.10. se observă că zona topită diferă de cea a materialului de bază, având o microstructură constituită din nitruri de tip ϵ și γ'

încorporate în matricea de soluție solidă α , formate prin difuzia accelerată a azotului în masa de topitură, cu un grad de dispersie ridicat, care îi conferă acestuia o creștere semnificativă de duritate [30, 83].

Zona de trecere dintre stratul nitrurat și materialul de bază a fost austenitizată rapid în cursul fazei de încălzire cu fascicul laser, iar ca urmare a vitezei critice de călire a acestui oțel [30, 83], relativ mici, suferă la răcire în aer o transformare intermediară și în afară de echilibru, având drept rezultat o structură bainito – martensitică.

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

Nitrurile rezultate în stratul superficial îi conferă acestuia o creștere semnificativă de duritate [30, 83].

Amorsele de fisurare sunt determinate de particulele de nitruri 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.

6.3.2. Examinări sclerometrice

Variația durității pe secțiunea transversală a probelor nitrurate cu fascicul laser sunt prezentate în fig.6.11.

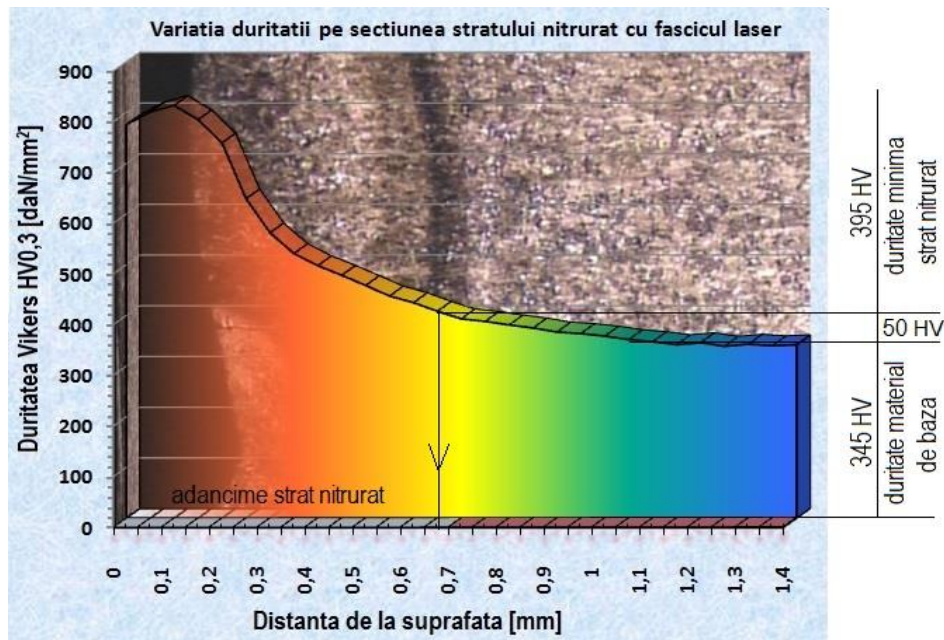


Fig.6.11. Variația durității pe secțiunea stratului tratat Duplex prin nitrurare cu fascicul laser la puterea P=180 W.

Așa cum era de așteptat, curbele gradient de duritate corespund distribuției constituenților structurali prezenți în piesele supuse acestui tratament Duplex.

Stratul nitrurat având concentrație mare de azot sub forma de combinații chimice ale acestora, respectiv o densitate mare de defecte ale rețelei cristaline, va prezenta cele mai mari valori de duritate.

În zona marginală, apar valori de duritate, $HV0.2 = 790 - 814 \text{ daN/mm}^2$, maximul acestora fiind situat la o distanță de 0,15 – 0,2 mm de suprafață. Adâncimea utilă de nitrurare [77] este considerată ca fiind distanța de la suprafață până în punctul în care duritatea stratului depășește cu 50HV duritatea miezului, adică la cca 0,67 mm.

6.4. Concluzii

Tratamentul termochimic de nitrurare cu fascicul laser, prin îmbogățirea în azot a stratului superficial, prin nitrurile formate, conduce la creșterea durității suprafeței expuse cavității, fără a aduce modificări ale compoziției chimice a oțelului de bază.

Imaginile microscopice ale degradării suprafețelor nitrurate, realizate la finalul atacului cavității, arată că pittingurile/cavernele, rezultate din impactul ciclic cu microjeturile și undele de șoc, produse prin implozia bulelor de cavitație, nu au depășit grosimile straturilor realizate.

Microstructura rezultată în urma nitrurării, având duritate ridicată, suferă o degradare lentă și uniformă, cu ciupituri extreme de fine.

Cu creșterea puterii fasciculului laser se îmbunătățește și comportarea cavitățională a oțelului; datorită creșterii temperaturii și adâncimii stratului topit, o dată cu mărirea timpului de solidificare și răcire a masei de topitură menținută în mediu de azot, apare implicit o mărire a duratei de difuzie a azotului în straturile superficiale.

Nitrurarea 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.

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.

7. PROPUNEREA PARAMETRULUI DE RUGOZITATE R_z ÎN EVALUAREA REZISTENȚEI MATERIALELOR LA EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE

7.1. Introducere

În practică, evaluarea degradării suprafețelor prin cavitației, cum este cea a paletelor rotoarele de mașini hidraulice axiale, se face pe baza ariei suprafeței cavernei și a volumului de electrozi consumați pentru a umple caverna [3, 14, 66, 95]. În laborator, evaluarea comportării și rezistenței unui material la eroziunea cavitației este realizată pe baza parametrilor și a curbelor specifice, recomandate de normele ASTM G32-2010 [124]. Cu toate acestea cercetătorii sunt interesați și de posibilitatea evaluării pe baza unuia dintre parametrii rugozității [17, 19, 46, 61, 63, 67, 77, 90]. Din acest motiv, modelarea profilogramei suprafeței rezultate în urma atacului eroziv al cavitației este un obiectiv urmărit de specialiști [45, 46, 75, 90], dar, până în prezent, fără succes de finalizare. Motivul este tocmai forma neregulată a rugozității suprafeței erodate și dependența, pe de o parte de factorii fizico-mecanici și structurali ai materialului și, pe de altă parte, de parametrii ce definesc hidrodinamica procesului cavitațional [14, 38, 44, 55]. Din acest motiv, în ultima perioadă, colectivul de specialiști ce activează în cadrul Laboratorului de Cavitație, al Universității Politehnica din Timișoara, analizează rezistența diverselor materiale, la eroziunea produsă de cavitația vibratoare, pe baza degradării structurale corelate cu profilograma rugozității, înregistrate cu aparatul Mitutoyo, la finalul duratei totale de cavitație [45, 45, 90]. Toate analizele sunt realizate pe probe testate la cavitația vibratoare, generate de aparatul vibrator standard, aflat în dotarea laboratorului de cavitație al Universității Politehnica din Timișoara [33, 61, 63, 77, 85-90, 105]. Concluziile obținute de colectivul laboratorului au condus la ideea ca între parametrul MDE (recomandat de normele ASTM G32-2010) și rugozitatea R_z a materialului există o dependență, care poate permite folosirea lui R_z în evaluarea comportării, respectiv a rezistenței materialului la eroziunea cavitației.

7.2. Materiale analizate

Pentru corectitudinea demersului și al propunerii, datorită numărului mare de măsurători (270), s-au ales materiale din categorii diferite, supuse la diferite tratamente de îmbunătățire a comportării și rezistenței la cavitația vibratoare. Aceste material sunt:

- oțelul aliat 16MnCr5 – aflat în stare recoaptă și carburată, cercetat în cadrul acestei teze;
- bronzul AMPCO M45 - supus tratamentului termic de călire volumică, a cărui rezistență la cavitație a fost analizată și în cadrul tezei elaborate de Oanca [90], iar în cadrul acestui capitol a fost restudiat doar pentru a se parcurge etapele de măsurare a parametrilor rugozității, la duratele de atac, menționate mai jos;

- oțelul aliat 42CrMo4 (DIN 17200) - în stare recoaptă, folosit și el în fabricarea componentelor de aparate hidraulice și studiat doar pentru obiectivul acestui capitol.

7.3. Procedura experimentală. Rezultate și discuții

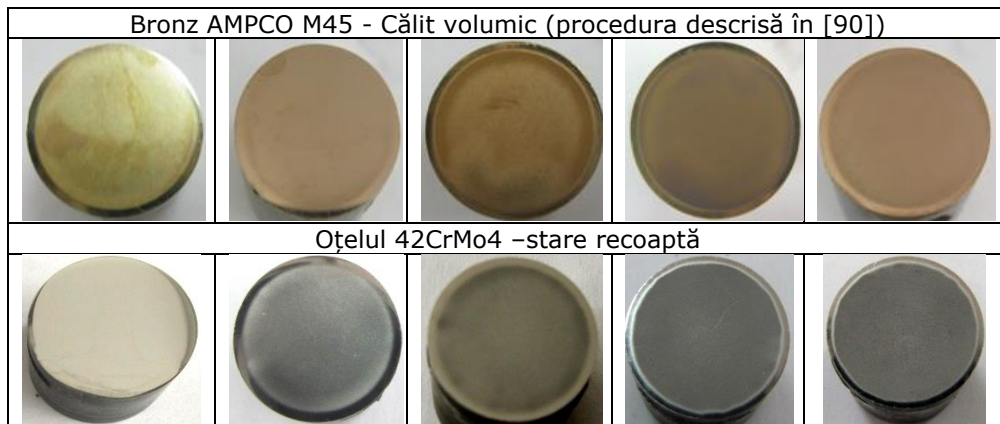
Pentru fiecare material, cu excepția oțelului 16MnCr5 – tratat Duplex, s-au testat la cavitația creată de aparatul vibrator standard, câte trei probe, conform normelor ASTM G32-2010 și cutumei laboratorului. Pentru fiecare material, pentru una din cele trei probe, suprafața cavitată a fost împărțită în 9 zone pătrate (una centrală și restul pe două cercuri concentrice), pe care s-au măsurat parametrii rugozității Ra, Rz și Rt cu aparatul Mitutoyo, pe două diametre perpendiculare (în total 18 măsuratori), conform fig.7.1. Aceste măsuratori au fost realizate după (0, 30, 75, 120 și 165) minute de cavitație vibratoare. Prin urmare pentru fiecare probă au fost realizate 90 de măsuratori. În tabelul 6.1. sunt prezentate imagini cu evoluția eroziunii în suprafața atacată de cavitație, la cele cinci intervale de timp.



Fig.7.1. Schema celor 18 zone de măsurare a parametrilor rugozității Ra, Rz și Rt

Tabel 7.1. Imagini ale evoluției eroziunii în suprafața expusă cavitației

Durata atacului cavitației, min				
0	30	75	120	165
Oțelul 16MnCr5 – stare recoaptă și carburată				



În fig.7.2...7.4., pentru fiecare probă, sunt afișate câte 4 diagrame cu profilogramele suprafeței erodate, înregistrate cu aparatul Mitutoyo, în zona centrală care, conform observațiilor și experienței acumulate, este cea mai deteriorată.

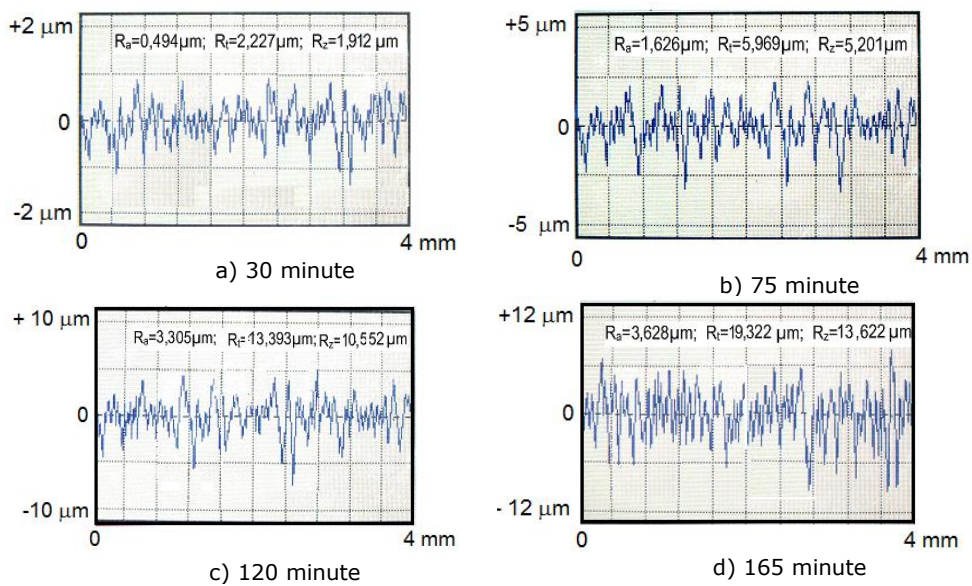


Fig.7.2. Măsurarea rugozității suprafeței cu aparatul Mitutoyo, la diverse durate de atac al cavitației (oțelul 16MnCr5 – stare recoaptă și carburată)

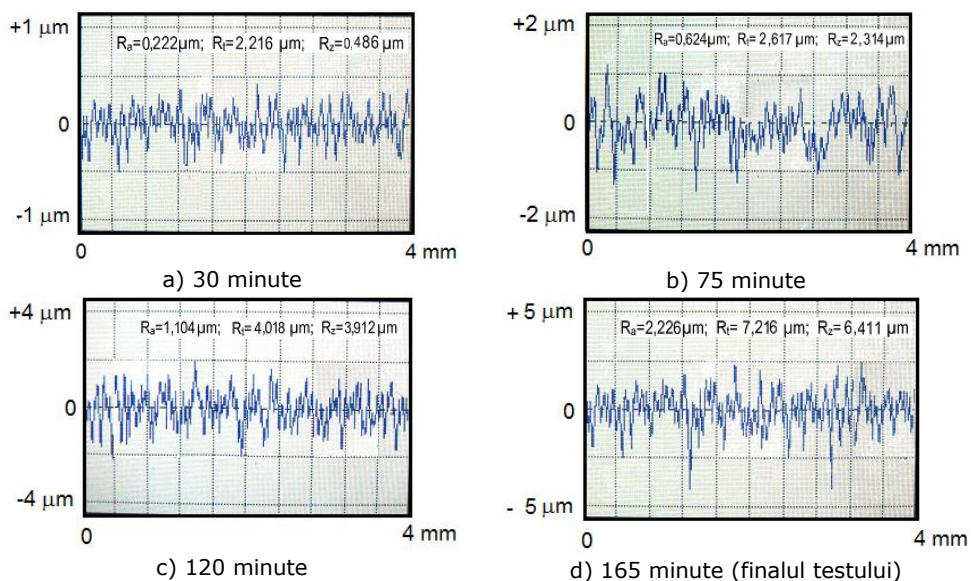


Fig.7.3. Măsurarea rugozității suprafeței cu aparatul Mitutoyo, la diverse durate de atac al cavității (Bronz AMPCO45-TT)

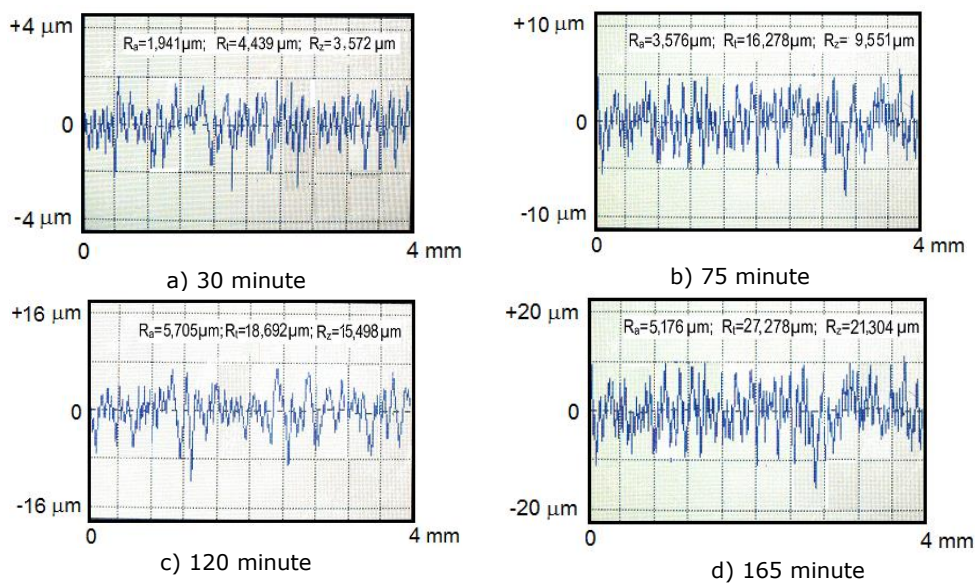


Fig.7.4. Măsurarea rugozității suprafeței cu aparatul Mitutoyo, la diverse durate de atac al cavității (Oțelul aliat 42CrMo4)

În tabelele 7.2...7.4 sunt date cele 18 valori ale parametrului R_z , înregistrate pe diametrele perpendiculare ale celor 9 zone de măsurare, din fig.7.1., considerat a fi parametrul cel mai apropiat de valoarea adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, MDE.

112 Parametrului de rugozitate Rz în evaluarea rezistenței la cavitație - 7

Deoarece în diagramele caracteristice MDE (t), valoarea adâncimii medii de eroziune cumulate, indiferent că se referă la valoarea experimentală, sau calculată, ea este una medie pe suprafața expusă cavitației. Din acest motiv, în tabelele 7.2...7.4 sunt afișate și valorile medii ale celor 18 măsurători, pentru fiecare dintre cele 4 durate de cavitație: 30, 75, 120 și 165 minute.

Tabel 7.2. Valorile parametrului Rz [μm] (oțelul 16MnCr5 – stare recoaptă și carburată)

0 min	30 min		75 min		120 min		165 min	
Măsurat	Măsurat	Medie	Măsurat	Medie	Măsurat	Medie	Măsurat	Medie
0.02	1.488	1.781	5.943	5.562	9.925	10.123	13.694	13.277
0.02	1.721		5.672		9.841		13.589	
0.02	1.698		5.011		10.153		13.715	
0.02	1.822		5.352		9.953		13.512	
0.02	1.751		5.224		9.942		13.672	
0.02	1.771		5.932		10.281		13.883	
0.02	1.834		5.725		10.185		13.516	
0.02	1.811		5.901		9.811		13.703	
0.02	1.831		5.211		9.889		13.011	
0.02	1.792		5.867		9.921		13.785	
0.02	1.761		5.825		9.924		13.653	
0.02	1.699		5.021		9.872		13.901	
0.02	1.602		5.724		10.212		13.504	
0.02	1.912		5.201		10.552		13.622	
0.02	1.756		5.411		9.901		12.672	
0.02	1.842		5.103		9.952		13.443	
0.02	1.795		5.972		10.425		13.362	
0.02	1.587		5.895		9.898		13.198	

Tabel 7.3. Valorile parametrului Rz [μm] (Bronz AMPCO45-TT)

0 min	30 min		75 min		120 min		165 min	
Masurat	Masurat	Medie	Masurat	Medie	Masurat	Medie	Masurat	Medie
0.02	0.425	0.455	2.233	2.316	4.071	3.941	6.208	6.14
0.02	0.486		2.314		3.912		6.411	
0.02	0.493		2.021		4.115		6.118	
0.02	0.488		2.225		4.071		6.189	
0.02	0.525		2.146		4.104		5.998	
0.02	0.421		2.306		3.896		6.385	
0.02	0.511		2.198		3.903		6.012	
0.02	0.412		2.187		3.845		6.214	
0.02	0.385		2.279		4.104		6.142	
0.02	0.401		2.323		4.202		6.421	
0.02	0.447		2.365		3.825		5.892	
0.02	0.411		2.402		3.925		6.141	
0.02	0.489		2.065		4.143		6.272	
0.02	0.443		2.204		4.059		6.301	
0.02	0.407		2.199		3.809		6.175	
0.02	0.491		2.285		3.998		6.007	
0.02	0.489		2.351		3.642		5.901	
0.02	0.501		2.389		4.188		6.415	

Tabel 7.4. Valorile parametrului Rz [μm] (Oțelul aliat 42CrMo4)

0 min	30 min		75 min		120 min		165 min	
Masurat	Masurat	Medie	Masurat	Medie	Masurat	Medie	Masurat	Medie
0.02	3.44	3.469	9.46	9.432	15.41	15.435	21.24	21.242
0.02	3.375		9.375		15.521		21.272	
0.02	3.425		9.285		15.495		21.181	
0.02	3.555		9.572		15.312		21.239	
0.02	3.604		9.369		15.422		21.248	
0.02	3.402		9.522		15.495		21.421	
0.02	3.476		9.421		15.467		20.918	
0.02	3.421		9.389		15.502		21.361	
0.02	3.446		9.578		15.461		21.311	
0.02	3.618		9.422		15.456		21.255	
0.02	3.572		9.551		15.498		21.304	
0.02	3.501		9.344		15.421		21.325	
0.02	3.492		9.367		15.461		21.115	
0.02	3.366		9.403		15.401		21.192	
0.02	3.381		9.298		15.431		21.236	
0.02	3.471		9.574		15.431		21.278	
0.02	3.534	9.339	15.446	21.401				
0.02	3.411	9.501	15.417	21.092				

În histogramele din fig.7.5...7.7. sunt comparate valorile medii ale parametrului rugozității, Rz, cu valorile adâncimii medii de eroziune, calculate ca medie ale celor trei probe testate.

Din aceste histograme se constată faptul că, indiferent de durata la care facem referire, valoarea parametrului Rz este net inferioară valorii parametrului eroziunii cavitației MDE. Această diferență este datorată valorii ridicate a pierderilor de masă (implicit a lui MDE), care se înregistrează încă din primele minute ale cavitației (în special perioada 0-15 minute) când acestea sunt afectate de praful abraziv, vârfurile asperităților, alte pierderi cauzate de vibrații - în special cele legate de filetul probei-care nu sunt caracteristice distrugerii propriu-zise și care nu se pot elimina în totalitate, încă de la debutul testului de cavitație.

De asemenea, se constată că, pe măsură creșterii duratei de cavitație, diferențele dintre MDE și Rz devin tot mai mici. Explicația se regăsește în durificarea stratului superficial sub impactul mecanic cu microjeturile și undele de șoc, generate la imploziile bulelor cavitaționale [14, 38, 44]. Această constatare este în concordanță și cu zona III (atenuarea distrugerii) și IV (stabilizarea distrugerii) din forma tipică a curbei vitezei de eroziune, standard, definită de Thiruvengadam [114] și considerată model.

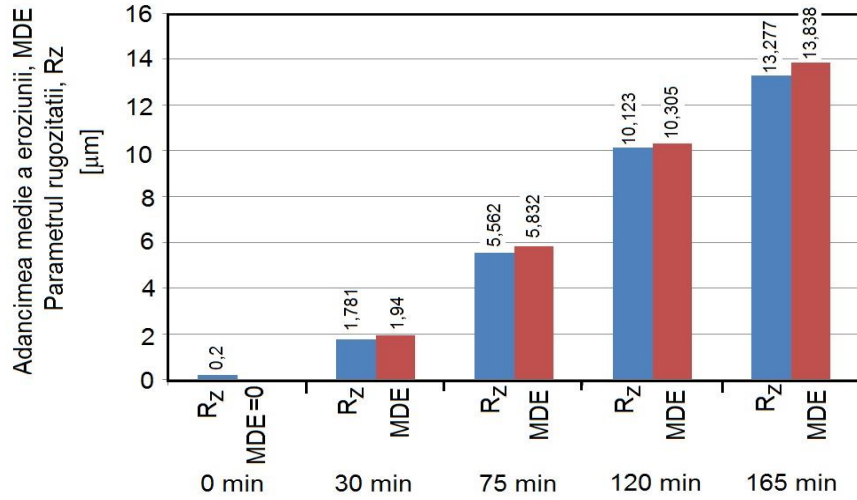


Fig.7.5. Compararea parametrului MDE cu al rugozității Rz (oțelul 16MnCr5 –stare recoaptă și carburată)

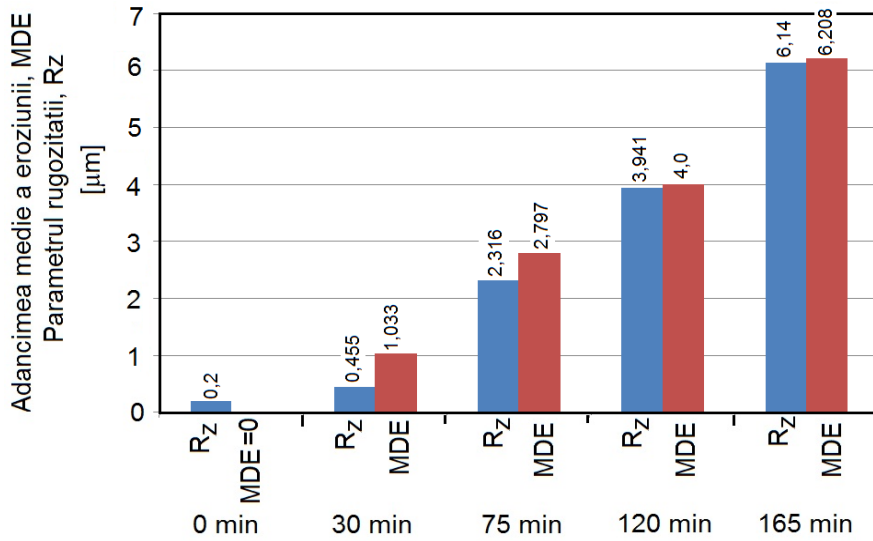


Fig.7.6. Compararea parametrului MDE cu al rugozității Rz (Bronz AMPCO M45–călire și revenire-prelucrare după [90])

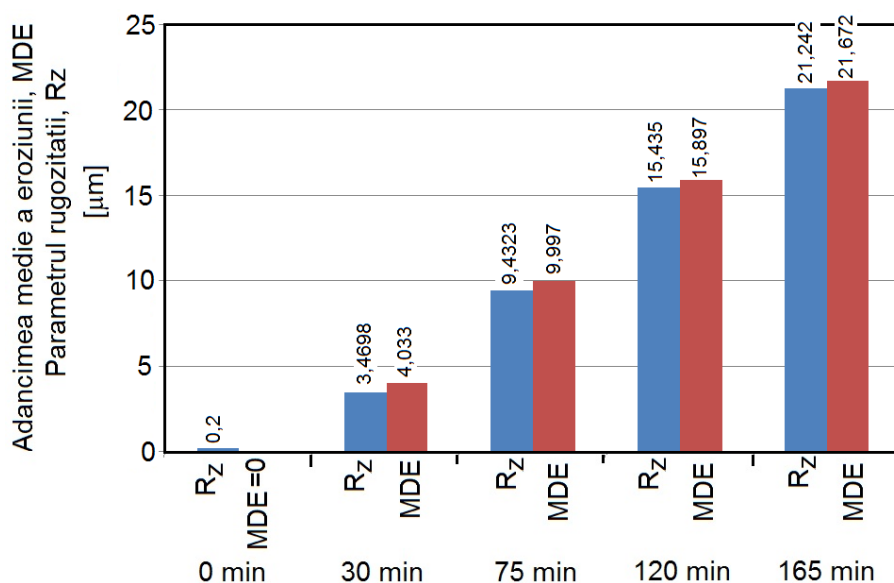
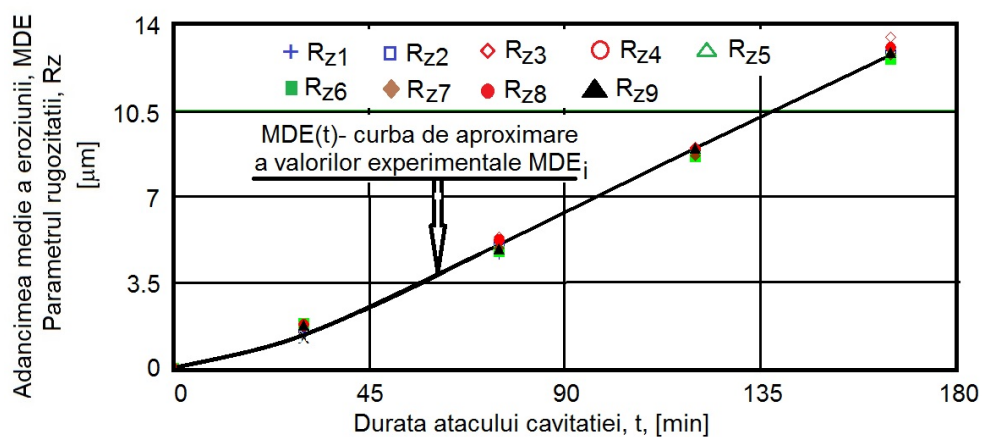


Fig.7.7. Compararea parametrului MDE cu al rugozității R_z (oțelul 42CrMo4 –stare recoaptă)

În diagramele din fig.7.8...7.10. se arată 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 (vezi diagramele caracteristice, de la capitolele 3, 4 și 5, care arată variația adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavității).



a) Valorile lui R_z de la 1 la 9

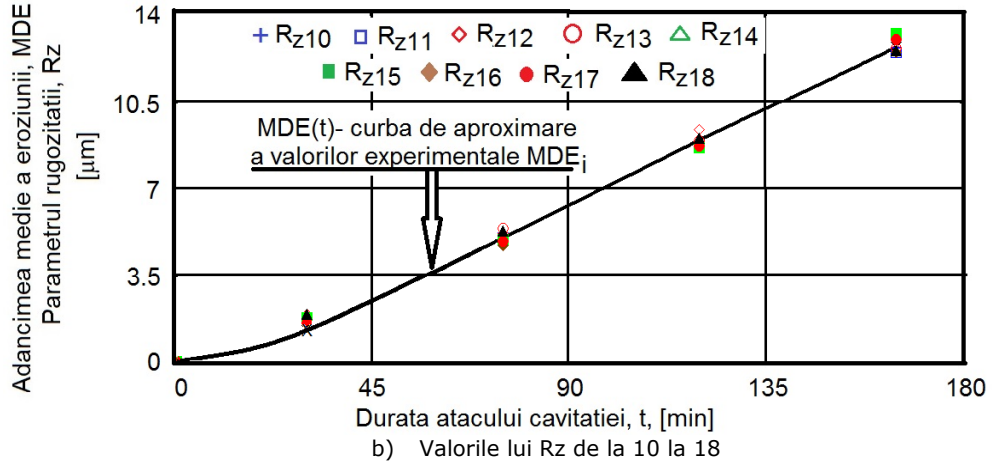
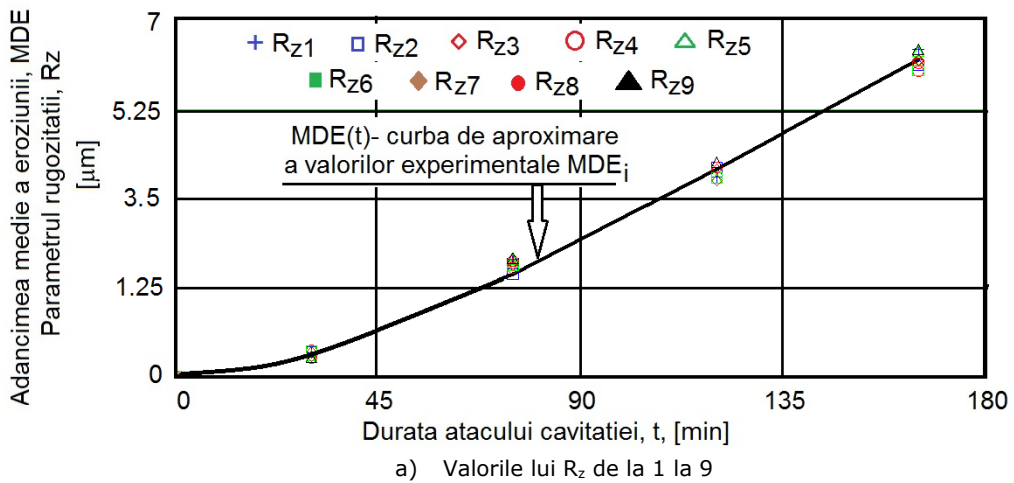


Fig.7.8. Dispersia parametrului Rz față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune - oțelul 16MnCr5 recopt și carburat)



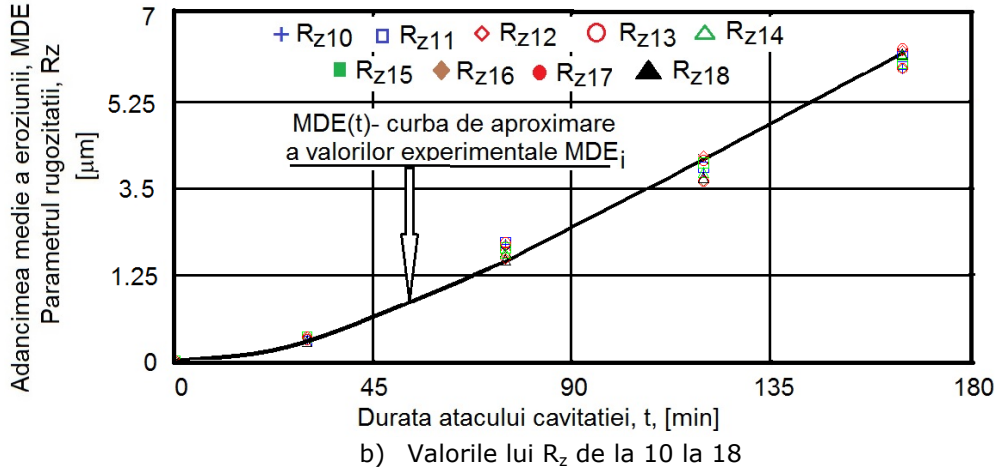
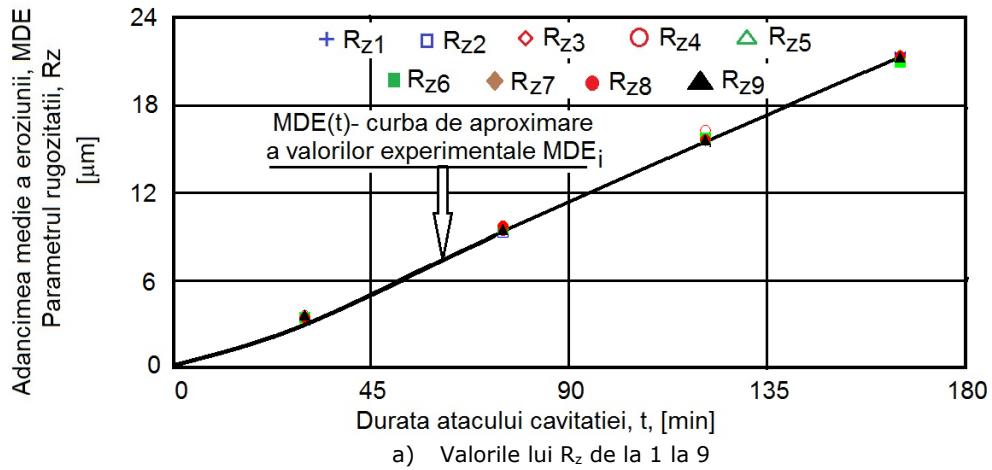


Fig.7.9. Dispersia parametrului R_z față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune - bronz AMPCO45-TT



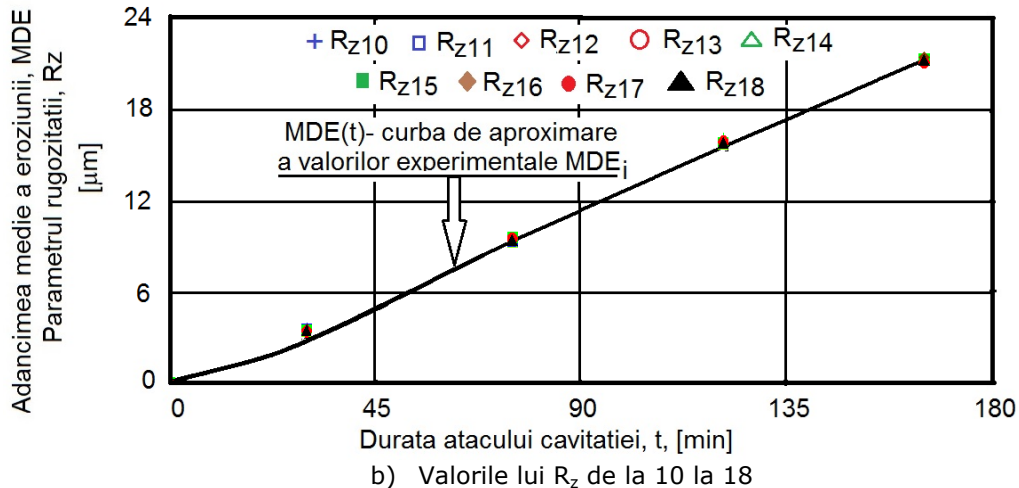


Fig.7.10. Dispersia parametrului R_z față de curba de aproximare a valorilor experimentale ale adâncimii medii de eroziune - oțelul 42CrMo4 stare recoaptă

7.4. Concluzii

Profilogramele înregistrate cu aparatul Mitutoyo arată că forma și nivelul rugozității este o expresie a rezistenței opuse de material atacului distructiv al cavitației.

Se confirmă posibilitatea folosirii parametrului R_z în estimarea rezistenței materialului la cavitația vibratoare, deoarece diferențele dintre valorile măsurate ale lui R_z și cele calculate ale parametrului caracteristic MDE (vezi și fig.7.8...7.10.) sunt cuprinse în câmpul abaterilor înregistrate pentru valorile MDE obținute în cazul testării mai multor probe prelevate din același semifabricat.

Parametrul R_z , fiind expresia efectului eroziunii suprafeței atacate de cavitație, are valorile net inferioare față de valorile adâncimii medii de eroziune (MDE), care sunt afectate de pierderile masice din primele minute ale atacului, unde apare și influența prafului abraziv și al asperităților, care nu pot fi cuantificate prin profilogramele măsurate cu aparatul Mitutoyo.

Prin urmare, parametrul R_z reprezintă o variantă foarte bună de evaluare a degradării materialului la eroziunea cavitației.

8. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. NOI DIRECTII DE CERCETARE

8.1. 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 cavitate, 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 perlitei 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 înaltelor caracteristici de rezistență mecanică ale structurii martensitice, aspectul suprafeței cavitate 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 durtății 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 mărirea 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 adancimea 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.

8.2. 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.

LISTA PUBLICAȚIILOR REZULTATE ÎN URMA CERCETĂRII DOCTORALE, PUBLICATE SAU ACCEPTATE SPRE PUBLICARE, SUB AFILIERE UPT

Ing. **Cristian GHERA** doctorand

1. Lucrări științifice publicate în reviste indexate Web of Science-WoS (ISI)

- [1] I. Mitelea, **C. Ghera**, I. Bordeasu, C.M. Crăciunescu, "Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel", *International Journal of Materials Research*, vol. 106, No. 4, pp. 391-397, April 2015 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)
- [2] I. Mitelea, **C. Ghera**, I. Bordeasu, C.M. Crăciunescu, „Assesment of cavitation erosion of gas-nitrided Cr-Ni-Mo steels”, *Journal of Tribology ASME*, (acceptată pentru publicare), 2017

2. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice (Proceedings) indexate Web of Science-WoS (ISI) Proceedings

- [1] **C. Ghera**, I. Mitelea, I. Bordeasu, C.M. Crăciunescu, "Improvement of cavitation erosion resistance of a low alloyed steel 16MnCr5 through work hardening", *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*, pp. 661-666, 2015 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)
- [2] **C. Ghera**, I. Mitelea, I. Bordeasu, C.M. Crăciunescu, "Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel", *METAL 2016 - 25th International Conference on Metallurgy and Materials*, pp. 706-711, 2016 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)
- [3] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, I. Mitelea, L.M. Micu, C. Bordeasu, **C. Ghera**, A. Iosif, "Research upon cavitation erosion behavior of some duplex steels", *International Conference on Applied Science IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, vol. 106, pp. 391-397, 2016 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)
- [4] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, L.C. Salcianu, **C. Ghera**, L.M. Micu, R. Badarau, A. Iosif, L.D. Pirvulescu, C.E. Podoleanu, „A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion”, *International Conference on Applied Science IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, vol. 163, 2017 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)

3. Lucrări științifice publicate în reviste de specialitate indexate BDI (cu specificarea BDI)

- [1] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, I. Mitelea, L.M. Micu, O.V. Oanca, C. Bordeasu, L.C. Salcianu, **C. Ghera**, „Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze with heat treatments”, *HIDRAULICA- Magazine of Hydraulics Pneumatics*

- Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, vol.2, pp. 53-61, 2014 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-2-2014/>)
- [2] **C. Ghera**, I. Bordeasu, L. Sălcianu, S.T. Duma, S.E. Katona, A. Punga, L.M. Micu, L.F. Pascu, „Considerations regarding the behavior to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution”, *HIDRAULICA – Magazine of Hydraulics Pneumatics Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, București, România, vol. 1, pp. 25-31, 2015 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-12015/>)
- [3] L.M. Micu, I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, O.V. Oancă, L.C. Sălcianu, **C. Ghera**, I. Anton, „Researches upon Cavitation Erosion Behavior of some Stainless Steels with Different Structures”, *HIDRAULICA Magazine of Hydraulics Pneumatics Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, vol. 4, pp. 46-54, 2015 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-4-2015/>)
- [4] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, **C. Ghera**, L.C. Sălcianu, L.M. Micu, C.E. Podoleanu, „Cavitation erosion behavior of the steel 17CrNiMo6”, *Machine design*, vol. 8, nr. 4, Novi Sad, pp. 149-154, 2016 (http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/list2016_4.php?aac=on)

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

- [1] **C. Ghera**, I. Mitelea, I. Bordeasu, C.M. Crăciunescu, „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 (*Scientific.Net*)
- [2] O.Oancă, I.Mitelea, I.Bordeasu, **C.Ghera**, „Reduction of cavitation erosion of the bronze CuAl10Ni5Fe2.5Mn1 by laser remelting treatment”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 133-138, July 2015 (*Scientific.Net*)

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

-

6. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

- [1] L.M. Micu, I. Bordeasu, I. Mitelea, **C. Ghera**, L.C. Sălcianu, „Cercetarea eroziunii cavitaționale asupra oțelului inoxidabil X2CrNiMn22-5-3 tratat termic”, *A XIV-a Conferință internațională multidisciplinară, "Profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești"*, vol. 26, pp. 425-430, 2014, Sebeș.
- [2] L.C. Sălcianu, I.Bordeasu, L.M.Micu, **C.Ghera**: „The resistance to erosion by cavitation two the different structural steel stainless exposed same heat treatment by volume”, *Conferința națională multidisciplinară Profesorul Ion. D Lăzărescu, fondatorul școlii românești de teoria așchierii, Ediția I*, Cugir, pp. 675-682, 2014.

Web of Science [v.5.22.3] x

apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=N2gNeUsARguJ3WNmMmp&search_mode=GeneralSearch&prID=9b097114-3a96-4de7-8273-1

Web of Science™ InCites™ Journal Citation Reports® Essential Science Indicators™ EndNote™ Sign In Help English

WEB OF SCIENCE™ THOMSON REUTERS

Search My Tools Search History Marked List

Results: 2 (from Web of Science Core Collection)

You searched for: AUTHOR: (Ghera Cristian) ...More

Create Alert

Refine Results

Search within results for...

Web of Science Categories

- METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING (2)
- MATERIALS SCIENCE MULTIDISCIPLINARY (1)

more options / values... Refine

Document Types

- PROCEEDINGS PAPER (1)
- ARTICLE (1)

more options / values...

Sort by: Publication Date -- newest to oldest Page 1 of 1

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

1. **Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel**
By: Mitelea, Ion, Ghera, Cristian, Bordeasu, Ilare, et al.
INTERNATIONAL JOURNAL OF MATERIALS RESEARCH Volume: 106 Issue: 4 Pages: 391-397
Published: APR 2015
View Abstract
2. **IMPROVEMENT OF CAVITATION EROSION RESISTANCE OF A LOW ALLOYED STEEL 16MnCr5 THROUGH WORK HARDENING**
By: Ghera, Cristian, Mitelea, Ion, Bordeasu, Ilare, et al.
Book Group Author(s): TANGER Ltd
Conference: 24th International Conference on Metallurgy and Materials Location: Brno, CZECH REPUBLIC Date: JUN 03-05, 2015
Sponsor(s): Tanger Ltd, Tech Univ Ostrava, Czech Soc New Mat & Technologies; ASM Int; Engrn Acad Czech Republ; Mat Res Soc Serbia; Norwegian Co Mat & Technol; French Soc Met & Mat; Italian Assoc Met; Austrian Soc Met & Mat; Portuguese Soc Mat
METAL 2015: 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS Pages: 661-666
Published: 2015
View Abstract

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

Sort by: Publication Date -- newest to oldest Show: 10 per page Page 1 of 1

Analyze Results Create Citation Report

Times Cited: 2 (from Web of Science Core Collection) Usage Count

Times Cited: 0 (from Web of Science Core Collection) Usage Count

Web of Science [v.5.22.3] x ARCHIVES | Revista HID x HIDRAULICA Magazine | x 5361.pdf x FIS nouă x 149-154.pdf

apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=1F4EfrzljhQReCmhYyP&search_mode=GeneralSearch&prID=b8810c6a-0039-45dc-b504-efcb-r

Web of Science™ InCites™ Journal Citation Reports® Essential Science Indicators™ EndNote™ Sign In Help English

WEB OF SCIENCE™ THOMSON REUTERS

Search My Tools Search History Marked List

Results: 1 (from Web of Science Core Collection)

You searched for: TITLE: (Improvement of cavitation erosion resistance of a low alloyed steel 16MnCr5 through work hardening) ...More

Create Alert

Refine Results

Search within results for...

Web of Science Categories

- METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING (1)
- MATERIALS SCIENCE MULTIDISCIPLINARY (1)

more options / values... Refine

Document Types

- PROCEEDINGS PAPER (1)

more options / values...

Sort by: Publication Date -- newest to oldest Page 1 of 1

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

1. **IMPROVEMENT OF CAVITATION EROSION RESISTANCE OF A LOW ALLOYED STEEL 16MnCr5 THROUGH WORK HARDENING**
By: Ghera, Cristian, Mitelea, Ion, Bordeasu, Ilare, et al.
Book Group Author(s): TANGER Ltd
Conference: 24th International Conference on Metallurgy and Materials Location: Brno, CZECH REPUBLIC Date: JUN 03-05, 2015
Sponsor(s): Tanger Ltd, Tech Univ Ostrava, Czech Soc New Mat & Technologies; ASM Int; Engrn Acad Czech Republ; Mat Res Soc Serbia; Norwegian Co Mat & Technol; French Soc Met & Mat; Italian Assoc Met; Austrian Soc Met & Mat; Portuguese Soc Mat
METAL 2015: 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS Pages: 661-666
Published: 2015
View Abstract

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

Sort by: Publication Date -- newest to oldest Show: 10 per page Page 1 of 1

1 records matched your query of the 56,779,923 in the data limits you selected.
Key: * = Structure available.

Analyze Results Create Citation Report

Times Cited: 0 (from Web of Science Core Collection) Usage Count

124 Lista publicațiilor sub afiliere UPT - 8

The screenshot shows a search result on the Web of Science platform. The search criteria are: TITLE: (Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel). The results list one entry: "CAVITATION EROSION BEHAVIOR OF LASER NITRIDED 34CrNiMo6 ALLOYED STEEL" by Ghera, Cristian; Mitelea, Ion; Bordeasu, Ilare, et al. The entry is from a book group titled "25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (METAL)" published in 2016. The interface includes options to view the abstract, save to EndNote, and add to a marked list. The left sidebar shows the search was refined by "METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING (1)".

The screenshot shows a search result on the Web of Science platform. The search criteria are: TITLE: (Research upon cavitation erosion behavior of some duplex steels). The results list one entry: "Researches upon cavitation erosion behavior of some duplex steels" by Bordeasu, I.; Popoiciu, M. O.; Mitelea, I.; et al. The entry is from a book series titled "INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2015 (ICAS2015)" published in 2016. The interface includes options to view the full text from the publisher, save to EndNote, and add to a marked list. The left sidebar shows the search was refined by "MATERIALS SCIENCE MULTIDISCIPLINARY (1)" and "ENGINEERING MULTIDISCIPLINARY (1)".

Web of Science [v.5.24] - Web of Science [v.5.24] - Studi universitare de doctor - F&S nouă - F&S nouă

https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=3&SID=Z2DoIAHTVjSdc99E3H8&page=1&doc=1

Web of Science™ Incitea™ Journal Citation Reports® Essential Science Indicators™ EndNote™ Sign In Help English

WEB OF SCIENCE™ THOMSON REUTERS™

Search Return to Search Results My Tools Search History Marked List

Save to EndNote online Add to Marked List

1 of 89

A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion

By: **Bordeasau, Bordeasau**, J¹¹; Popoviciu, MO (Popoviciu, M. O.), J²¹; Salcianu, LC (Salcianu, L. C.), J¹¹; Ghera, C (Ghera, C.), J¹¹; Micu, LM (Micu, L. M.), J³¹; Badarau, R (Badarau, R.), J¹¹; Iosif, A (Iosif, A.), J⁴¹; Pinulescu, LD (Pinulescu, L. D.), J⁴¹; Podoleanu, CE (Podoleanu, C. E.), J⁴¹

Edited by: Lemle, LD, Jiang, Y

INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES (ICAS)2016
 Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering
 Volume: 163
 Article Number: UNSP 012002
 DOI: 10.1088/1757-899X/163/1/012002
 Published: 2017

Conference
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS)
 Location: Engr Fac Hunedoara, Hunedoara, ROMANIA
 Dates: MAY 25-27, 2016
 Sponsor(s): Politehnica Univ Timisoara; Mil Econ Acad Wuhan; Henri Coanda AF Acad Brasov; Acad Romanian Scientists; Acad Tech Sci Romania, Timisoara Branch; Gen Assoc Romanian Engineers, Hunedoara Branch

Abstract
 In present, the ranking of materials as their resistance to cavitation erosion is obtained by using laboratory tests finalized with the characteristic curves mean depth erosion against time MDE(t) and mean depth erosion rate against time MDER(t). In some previous papers, Bordeasau and co-workers give procedures to establish exponential equation representing the curves, with minimum scatter of the experimental obtained results. For a given material, both exponential equations MDE(t) and MDER(t) have the same values for the parameters of scale and for the shape one. For the ranking of materials is sometimes important to establish single figure. Till now in Timisoara Polytechnic University Cavitation Laboratory were used three such numbers: the stable value of the curve MDER(t), the resistance to cavitation erosion (R-cav. 1/MDERstable) and the normalized cavitation resistance R-ns which is the rate between $v(s) = \text{MDERstable}$ for the analyzed material and $v(se) = \text{MDERse}$ the mean depth erosion rate for the steel OH12NDL (Rns = $v(s)/v(se)$). OH12NDL is a material used for manufacturing the blades of numerous Kaplan turbines in Romania for which both cavitation erosion laboratory tests and field measurements of cavitation erosions are available. In the present paper we recommend a new method for ranking the materials upon cavitation erosion resistance. This method uses the scale and shape parameters of the exponential equations which represents the characteristic cavitation erosion curves. The new method is based on the exponential equations which represents the characteristic cavitation erosion curves. The new method is based on the exponential equations which represents the characteristic cavitation erosion curves.

Citation Network

0 Times Cited
 18 Cited References
 View Related Records
 View Citation Map
 Create Citation Alert
 (data from Web of Science™ Core Collection)

All Times Cited Counts

0 in All Databases
 0 in Web of Science Core Collection
 0 in BIOSIS Citation Index
 0 in Chinese Science Citation Database
 0 in Data Citation Index
 0 in Russian Science Citation Index
 0 in ScELO Citation Index

Usage Count

Last 180 Days: 0
 Since 2013: 0
 Learn more

This record is from:
 Web of Science™ Core Collection

start Model_Cerere_corduri... Web of Science [v.5... (7043 unread) - cgh...

Web of Science [v.5.23.2] - ARCHIVES | Revista HIDR... HIDRAULICA Magazine No. 53-61.pdf

hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-2-2014/

process is important in the conscious action of fighting global warming by reducing the emission of GHG. Studying carbon footprint (individual, for system or for activity) by the students from the technical education puts them in the situation to analyze the relationship...[\(read more\)](#)

THE IMPACT OF THE MINING ACTIVITY ON THE ECONOMIC SECTOR, HUMAN HEALTH AND ENVIRONMENT
 Authors: Oana DAVID, Maria Valia MIHAI, Sanda MAIDUC (OSICEANUJ)

It is estimated that the EU's energy mix will still rely heavily on fossil fuels, including coal, and the countries of Central and Eastern Europe, coal will be the main pillar of energy security, even to the year 2035. Therefore, this paper aims to capture the efforts made by the Romanian state in an attempt to streamline existing coal mines and close them those that were no longer profitable, showing the impact of the economic sectors in terms of the economic, social and...[\(read more\)](#)

SOME CONSIDERATIONS ABOUT THE STUDY OF PARTICLES MOTION ON THE CONICAL SIEVES
 Author: Dorel STOICA

In this paper, the oscillation amplitude is determined by the influence of vibration of conical sieve with experimental measurements for both experimental stand. In order to determine the influence of vibration amplitude oscillations on the grid tapered experimental determinations were performed for both the experimental stand idle and when driving under load. The amplitude of oscillation was changed by changing the length of the arm fastened to the screen...[\(read more\)](#)

CAVITATION EROSION RESISTANCE OF AMPCO 45 BRONZE WITH HEAT TREATMENTS Authors: Ilire BORDEASU, Mircea Octavian POPOVICIU, Ion MITTELEA, Lavinia Madalina MICU, Octavian Victor OANCA, C-In BORDEASU, Laura Cornelia SALCIANU, Cristian GHERA

Cavitation erosion of ship propellers is a great inconvenient for maritime transportation. The use of proper alloys and heat treatments can increase the life of these pieces. In the paper is analyzed the effect of such a heat treatment upon the bronze AMPCO 45, used in the past especially for aircraft bearings, valve spindles and wear rings. Paper analyzes if it can be also applied for ship propellers, a field in which outside corrosion it appear also cavitation...[\(read more\)](#)

EXPERIMENTAL TESTING IN DYNAMIC REGIME OF HIGH PRESSURE PNEUMATIC ACTUATORS
 Authors: Ionel NITA, Iulian-Cezar GIRLEANU, Sava ANGHIEL, Alexandru MARINESCU

This article aims to present specific procedural issues related to testing in dynamic regime of pneumatic drive systems with high pressure (max. 40 bar) actuators, methodologies used in the testing activity conducted in the Laboratory of Pneumatics at INCE 2000-IP Bucharest. Dynamic test procedures referred to in this article are: a)- testing the performance characteristics of the high-pressure actuator b)- testing the dynamic adjustability of high pressure actuators system c)- testing the dynamic stability of high pressure actuators system...[\(read more\)](#)

Copyright © 2011-2017 HIDRAULICA Magazine

hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-12015/



programmes
Prof. Dr. DUMEA
Director of Institution

In the past two months, about the same time, there have been restated several research subprogrammes, either by launching the competition, or by moving forward to concluding financial agreements for projects gained in a different competition last year. After all, this is ok, too, and it's also good that something moves. Now, when things have settled down, I started to think over... (read more)

Recruitment for Reviewers

We recommend

Conferința Internațională de Hidraulică, Pneumatică, Elemente de Căutare, Mecanici Fini, Soluții, Dispozitive și echipamente electronice specifice, mecanică HERVEX 2016
International Conference on Hydraulics, Pneumatics, Sealing Elements, Fine Mechanics, Tools, Specific Electronic Equipment & Mechanics
9-11 noiembrie / November 9-11
Primum anunt / 1st announcement

High Order Dynamic Model and Control Strategy of Automotive Powertrain System with Electro-hydraulic Driven Dry-clutch
Authors: Mario PISATURO, Adolfo SENATORE

In Automated Manual Transmissions (AMTs) based on electro-actuated dry-clutch design the frictional material properties, the sensors accuracy, the response of the throwout bearing actuator, and the control strategies to drive the engagement operation are mutual interdependent and only an optimized mechatronic design could lead to an effective target from several points of view: passengers' comfort, fuel economy, system reliability, performance, driving feeling, etc. In such transmissions, the quality of the vehicle propulsion as perceived by driver and passengers is largely dependent on (read more)

Axial Balance in Centrifugal Pumps – Back Labyrinth Versus Dorsal Vanes
Author: Sanda BUCEA

Redesign and correct sizing of hydraulic machines, like centrifugal pumps, must take account of hydraulic thrusts. This is useful to minimize the components wear and properly size of bearings and extending the bearings durability. These are minimal conditions for pumps optimal working. The article analyzes two methods of balancing the axial forces – first with front and back labyrinths and wear rings of impeller, the second using dorsal vanes. The article presents the calculation procedure of axial forces customized for these two balancing methods. Calculations are exemplified for (read more)

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
Authors: Cristian GHERA, Ilare BORDEASU, Laura SALCIANU, Sebastian Titus DUMA, Stefan-Eusebiu KATONA, Adrian PUGNA, Lavinia Madalina MICU, Luana Florintina PASCU

The performances of hydraulically driven systems are dependent on the developed forces and execution speed. However, increasing the speed of execution makes that inside of the command, adjustment and distribution equipment, when using low viscosity fluids, to appear hidromatic phenoms of the cavitation type. Modern methods of flow modeling shows that the areas where pressure oscillations leads to the appearance of cavitation, are the flow slots created between the mobile elements (drawers) and body/seat of the hydraulic equipment. Although the literature contains more information about the behavior/cavitation resistance of materials of components that run within the range of cavitation, an investigation of their behavior to cavitation erosion is required. Filling the data with cavitation erosion elements is beneficial, since.... (read more)

Pneumatic Tracking System for Photovoltaic Panel
Author: Ionel Laurentiu ALBOTEANU

Applications that use photovoltaic systems are continuously growing, in recent years, according to EU policies that foster the renewable energy sources. The current trend is to optimizing these systems by ensuring functionality with maximum efficiency. One of the methods of optimization refers to the capture of large quantities of solar energy using tracking systems for photovoltaic panels. The most

Please see [attached PDF](#)

NEW! Online First – Accepted Papers –

Indexing













hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-4-2015/

HERVEX 2016
International Conference on Hydraulics, Pneumatics, Sealing Elements, Fine Mechanics, Tools, Specific Electronic Equipment & Mechanics
9-11 noiembrie / November 9-11
Primum anunt / 1st announcement

Gabriela MATACHE, Sava ANGHEL, Nicolae TĂNĂSESCU

Population growth and the reduction of freshwater resources suitable for agriculture bring forward the use of high performance irrigation systems with minimum water consumption. Drip irrigation is characterized by the distribution of water slowly, dropwise, to the plant roots. Increasing soil fertility in a more intensive agriculture requires judicious application of fertilizers along with irrigation water, called fertigation process. Drip fertigation installations have proven their effectiveness also in orchards. Studying the distribution of irrigation water has been achieved in the past by analytical and numerical methods; currently, it is based on the known relations of hydrotechnics calculation for pipeline networks operating at atmospheric pressure or overpressure. The study of the distribution of primary solution of fertilization and irrigation water in the final solution for a drip fertigation system has been less well studied in the literature. In this article, based on mathematical models ... (read more)

Wear Properties of Some W/Cu Materials Prepared by Powder Metallurgy
Authors: Claudiu NICOLICESCU, Iulian ȘTEFAN, Victor Horia NICORĂ, Marius Cătălin CRIVEANU

The aim of the paper is to present experimental research in the field of W/Cu materials processed by Powder Metallurgy (PM) technologies. In order to fabricate W/Cu materials, mechanical alloying (MA) technique was used to obtain nanocomposite powders with the following compositions (85W/Cu, 80W/Cu and 75W/Cu). For the MA process was used a high energy vario planetary ball mill, Pulverisette 4 made by Fritsch and the milling times were between 2 and 8 hours. Green billets were obtained by die pressing at 600 MPa and then ... (read more)

Research on Cam Channels for Zoom Riflescopes
Author: Dana GRANCIU

A modern riflescope is a complex device which incorporates some of the latest technologies for processing optical, mechanical and electronic components. Most of mechanical parts are manufactured using CNC technologies. A key optomechanical sub-assembly is the zoom system. In this paper are presented some aspects regarding ... (read more)

Researches upon Cavitation Erosion Behavior of Some Stainless Steels with Different Structures
Authors: Lavinia Madalina MICU, Ilare BORDEASU, Mircea Octavian POPOVICIU, Octavian Victor OANCA, Laura Cornelia SALCIANU, Cristian GHERA, Anton IOSIF

The paper is focused on the stainless steel structures and their effect upon the resistance to cavitation erosion. The research was carried out in the Cavitation Laboratory of Timisoara Polytechnic University, on three samples of steel: one with a martensitic structure and the other two samples were duplex steel with structures formed from different proportions of martensite and ferrite (one having 40% martensite and 60% ferrite and the other 76% martensite and 24% ferrite). Those non standard steels were created by SC Prod SRL Bucharest, a company specialized in such matters. The laboratory method used was ... (read more)

AcademicKeys
CiteFactor
EZ3
Scholarsteer
INFOBASE INDEX
JIF JIFACTOR
TIB

MACHINE DESIGN
 The Journal of Faculty of Technical Sciences
 ISSN 1821-1259

HOME CALL FOR PAPERS INSTRUCTIONS SCI. ADVISORY BOARD EDITORIAL REVIEW BOARD PUBLISHED PAPERS CONTACT

Machine Design, Vol.8(2016) No.4

- Gorazd HLEBANJA, Marjan JENKO**
HIGH-TECH PRODUCT DEVELOPMENT IN AN SME: VIRTUAL DESIGN DEPARTMENT AND CASE STUDIES
- Djordje VUKELIC, Branko TADIC, Goran SIMUNOVIC, Dragomir MILJANIC, Milovan LAZAREVIC, Petar TODOROVIC**
COMPARATIVE ANALYSIS OF CLAMPING ELEMENT GEOMETRIES AND THEIR IMPACT ON FIXTURE-WORKPIECE INTERFACE COMPLIANCE
- Mirko BLAGOJEVIC, Milos MATEJIC**
STRESS AND STRAIN STATE OF CYCLOID GEAR UNDER DYNAMIC LOADS
- Nenad KOLAREVIC, Nebojsa KOSANOVIC, Marko MILOS**
METHODOLOGY FOR EFFICIENCY DETERMINATION OF TIP-JET HELICOPTER PROPULSION SYSTEM
- Dragan ŽIVANIĆ, Igor DŽINČIĆ, Radomir ĐOKIĆ, Atila ZELIĆ**
CHARACTERISTICS AND DESIGNING OF THE BELT CONVEYOR ELEMENTS
- Saša ŽIVANOVIĆ, Slobodan TABAKOVIĆ, Milan ZELJKOVIĆ, Zoran MILOJEVIĆ**
CONFIGURING A MACHINE TOOL BASED ON HYBRID O-X GLIDE MECHANISM
- Ilare BORDASEU, Mircea Octavian POPOVICIU, Cristian GHERA, Laura Comelia SALCIANU, Lavinia Madalina MICU, Comeliu Eusebiu PODOLEANU**
CAVITATION EROSION BEHAVIOR OF THE STEEL 17CrNiMo6

www.scientific.net/Search/Search?SortBy=0&searchString=ghera+Cristian

Scientific.Net
By Trans Tech Publications Ltd

Subscriptions For Editors Distributors Downloads My Cart

SEARCH OPTIONS
 Search: ghera Cristian

Sort by:
 Relevance
 Date

Narrow Search:
 Books
 All papers
 Open access papers

Periodicals:
 Specialized Collections
 Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials
 Advanced Engineering Forum
 Journal of Biomimetics, Biomaterials and Biomedical Engineering

Home > Search result

Effect of Heat Treatment on the Surfaces Topography Tested at the Cavitation Erosion from Steel 16MnCr5
 Authors: Cristian Ghera, Ion Mitelea, Ilare Bordeasu, Corneliu Marius Craiunescu
 Online since: July 2015
 Abstract: This paper analyzes, by comparison, the changes appeared in surface topography, for 16MnCr5 steel tested at cavitation erosion, subjected to...

Reduction of Cavitation Erosion of the Bronze CuAl10Ni5Fe2.5Mn1 by Laser Remelting Treatment
 Authors: Octavian Victor Danca, Ion Mitelea, Ilare Bordeasu, Cristian Ghera
 Online since: July 2015
 Abstract: The paper presents a new procedure for bronze surface hardened by using intensive heating with laser beams (over 103 °C/s) which...

BIBLIOGRAFIE

1. Agarwal Neeraj, a.o., „Slurry and cavitation erosion of HSLA steel processed by warm multidirectional forging and inter-critical annealed”, Tribology International, Vol.70, pp. 18 – 25, Februarie 2014
2. Anton I., Cavitația, vol. I, Editura Academiei RSR București, 1984
3. Anton I., Cavitația, vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985
4. Berger J., Kavitationserosion und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung in Hydraulikanlagen für HFA-Flüssigkeiten, Dissertation, TH Aachen, 1983
5. Bălășoiu V., s.a., „Hidraulica sistemelor de actionare”, Editura Mirton, Timișoara, 1996
6. Bălășoiu V., Rasga C., Popoviciu M., Bordeasu I., „Experimental results in the analysis of flow in a sliding control valve”, PNEU-HIDRO 2004, University of Miskoc, ISSN 1215-0851, pp. 55-60, 2004
7. Bălășoiu V., Cristian I., Bordeasu I., „Echipamente și sisteme hidraulice de acționare și automatizare. Aparatura hidraulică”, vol. 2, Editura Orizonturi Universitare, Timișoara, 2008
8. Bălășoiu V., Bordeasu I., Popoviciu M., Ghiban B., Gombos R., Raszga C., „Upon cavitation effects in hydraulic driving devices”, Metalurgia International, vol. XIV, no.11, special issue, ISSN 1582-2214, pp.48-51, 2009
9. Bordeasu I., Popoviciu M., „Comportarea la cavitație a unor materiale utilizate în construcția aparatelor hidraulice de comandă și reglare”, Conferința Internațională de Sisteme Hidropneumatice de Acționare, vol. III, Timișoara, 1995
10. Bordeasu I., „Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară”, Teză de doctorat, Timișoara, 1997
11. Bordeasu I., Anton I., „Correlation between cavitation erosion rate with both the parameters of the vibrator apparatus and physico-mechanical properties of the material”, Third International Symposium on Cavitation, vol. II, Grenoble, France, pp. 199-202, 1998
12. Bordeasu I., Bălășoiu V., „Considerații asupra cavitației în aparatura hidraulică”, HIDRAULICA Magazine No. 1 - Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, București, România, pp. 16-19, 1999
13. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Patrascioiu C-tin, Bălășoiu V., „An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves”, Scientific Buletin Politehnica University of Timisoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), Timisoara, ISSN:1224-6077, pp.253-258, 2004
14. Bordeasu I., „Eroziunea cavitațională a materialelor”, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
15. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Balasoiu V., Ghiban B., Tucu D., „Chemical and mechanical aspects of the cavitation phenomena”, Revista de Chimie 58(12), pp. 1300-1304, 2007
16. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Bălășoiu V., Gombos M.R., Gombos M., Ghiban B., „Contribution upon the cavitation erosion of two cast irons used in manufacturing control valves”, Metalurgia International, vol. 14, Issue 11, pp. 5-7, 2009

17. Bordeaşu I., Mitelea I., Katona S.E., „Considerations regarding the behavior of some austenitic stainless steels to cavitation erosion”, METAL 2012, 21th International Conference on Metallurgy and Materials, May 23-25, Brno, Czech Republic, pp.730-735, 2012
18. Bordeaşu I., Popoviciu M.O., „Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening”, Machine Design, vol. 4, no. 3, pp. 171-176, 2012
19. Bordeaşu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Micu L.M., Oanca O.V., Bordeaşu C., Salcianu L.C., **Ghera C.**, „Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze with heat treatments”, HIDRAULICA nr.2/2014 - Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, pp. 53-61, 2014
20. Bordeaşu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Micu L.M., Bordeaşu C., **Ghera C.**, Iosif A., „Research upon cavitation erosion behavior of some duplex steels”, International Conference on Applied Science, vol. 106, pp. 391-397, 2016
21. Bordeaşu I., Popoviciu 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
22. Bordeaşu I., Popoviciu M.O., Salcianu L.C., **Ghera C.**, Micu L.M., Badarau 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
23. Brennen C.E., „Cavitation and Bubble Dynamics”, Oxford University Press, Oxford, England, Great Britain, 1995
24. Brunn B., Ludwig G. Stoffel B., „The effect of gas diffusion on bubble dynamics”, Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003), Osaka, Japan, November 1-4, 2003
25. Carţiş I., „Tratamente termochimice”, Editura Facla, Timișoara, 1988
26. Chahine G.L., Franc J.P., Karimi A., „Laboratory testing methods of cavitation erosion”, in KIM K.H. et. al. (eds.): Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction, Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 106, DOI: 10.007/978-94-017-8539-6_2, Springer Science+Business Media Dordrecht, 2014
27. Chang J.T., Yeh C.H., He J.J., Chen K.C., „Cavitation erosion and corrosion behavior of Ni–Al intermetallic coatings”, Wear, 255, pp. 162–169, 2003
28. Cheng F.T., Shi P., Man H.C., „Cavitation erosion resistance of heat-treated NiTi”, Materials Science and Engineering, A339, pp. 312–317, 2003
29. Crîngaşu E.C., Ghiban B., Safta C.A., „Materiale specifice fabricaţiei maşinilor hidraulice şi comportarea lor la fenomenul de eroziune”, A XVI-a Conferinţă internaţională multidisciplinară, Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii româneşti”, vol. 29, pp. 335-344, Sebeş, 2016
30. Czerwinski F., „Thermochemical Treatment of Metals”, CanmetMATERIALS, Natural Resources Canada, Hamilton, Ontario, Canada, 2012
31. 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
32. DESIGNATION: G 32-09, „Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus”, ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS (2010) SECTION 3: Metals test methods and analytical procedures, vol. 03.02, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, 2010, pp. 94-109
33. Dimian M.E., „Cercetări asupra rezistenţei la cavitaţie a aliajelor de titan cu structura bifazică”, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2012

34. Duan C.G., Karelin V.Y., „Abrasive erosion and corrosion of hydraulic machinery”, International Research Center on Hydraulic Machinery, vol. 2, Imperial College Press, London, England, Great Britain, 2002
35. Edwin L., Frances A., Margaret W., „Statistics Manual”, Dover Publications, Inc. New York, 2010
36. Espitia A.L., Toro A., „Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components”, Tribology International, Vol. 43, pp. 2037–2045, 2010
37. Flinn A., Richard A., Trojan K.P., „Engineering materials and their applications”, Houghton Mifflin Company. Boston-Dallas-Geneva-Illinois-New Jersey 1990
38. Franc J.P., et al., „La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels”, Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995
39. Frank J.P., Michel J.M., „Fundamentals of cavitation”, Kluwer Academic Publishers-Dordrecht, Boston, London, 2004;
40. Franc J.P., Michel J.M., „Fundamentals of cavitation”, Kluwer Academic Publishers, P.O.Box, 322, 3300 AH Dordrecht, The Netherlands, 2004
41. Franc J.P., Michel J.M., „Fundamentals of Cavitation”, Kluwer Academic Publishers, 2005
42. Franc J.P., „Incubation time and cavitation erosion rate of work hardening materials”, Journal of Fluids Engineering, vol.131, iss. 2, 021303-021317, 2009
43. Franc J.P., Riondet M., Karimi A., Chahine G.L., „Material and velocity effects on cavitation erosion pitting”, Wear, vol. 274-275, pp. 248-259, 2012
44. 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
45. **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
46. **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
47. **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
48. **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
49. Godoy C., Mancosu R.D., Lima M.M., Brandão D., Housden J., Avelar-Batista J.C., „Influence of plasma nitriding and PAPVD Cr1-xNx coating on the cavitation erosion resistance of an AISI 1045 steel”, Surface and Coatings Technology, 200, pp. 5370–5378, 2006
50. Gundis Grumbt, Rolf Zenker, Heinz-Joachim Spies, Rainer Franke, Ingrid Haase, „Improvement of the wear behaviour of highly-loaded components and tools by multi-combined surface treatment”, Materials Engineering, Materiálové inžinierstvo 21, pp. 1-10, 2014

51. Han S., Lin J.H., Kuo J.J., He J.L., Shih H.C., „The cavitation-erosion phenomenon of chromium nitride coatings deposited using cathodic arc plasma deposition on steel”, *Surface and Coatings Technology*, 161, pp. 20–25, 2002
52. Hansson I., Morch K.A., „The dynamics of cavity clusters in ultrasonic (vibratory) cavitation erosion”, *Journal of Applied Physics*. 51(9):4651-4658, 1980
53. Hattori S., Mikami N., „Cavitation erosion resistance of satellite alloy weld overlays”, *Wear*, vol. 267, Issue 11, pp. 1954-1960, 2009
54. 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, Pages 443-448, 19 July 2010
55. Hammitt F.G., De M., He J., Okada T., Sun B.H., „Scale effects of cavitation including damage scale effects”, *Conf. Cavitation*, Michigan, Report No. UMICH, 014456-75-I, Michigan, U.S.A., 1980
56. Hammitt F.G., „Cavitation and multiphase flow phenomena”, McGraw Hill International Book Company, 1980
57. Han M., „Laser nitriding of metals: Influences of ambient pressure and the pulse duration”, Teză de doctorat, Göttingen, Germania, 2001
58. Hosmani S.S., Ajesh V., „Effect of duplex surface treatment on the microstructure and properties of mild steel”, *Proceedings of Indian National Science Academy (PINS)*, 79(3), pp.327-331, 2013
59. Huang W.H., Chen K.C., He J.L., „A study on the cavitation resistance of ion-nitrided steel”, *Wear*, 252, pp. 459–466, 2002
60. Jurchela A.D., Bordeasu I., Karabenciov A., Mitelea I., Birău N., „Considerații asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicule laser”, a IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp.781-786, Sebeș, 5-6 iunie 2009
61. Jurchela A.D., „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel”, Teza de doctorat, Timișoara, 2012
62. Luo Jing, Li Jian, „Erosion Characteristic in Ultrasonic Cavitation Experiment”, *Advanced Tribology*, pp. 638-639, 2010
63. 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, România, 2013
64. Karimi A., Martin J.L., „Cavitation erosion of materials”, *International Metals Review*, vol. 31, iss. 1, pp. 1-26, 1986
65. Kathuria K., „Laser-cladding process: a study using stationary and scanning CO₂ laser beams”, *Surface and Coatings Technology*, vol. 97, pp. 442-447, 1997
66. Katona S.E., „Eroziunea cavitațională a oțelurilor inoxidabile cu transformare martensitică indirectă”, Teza de doctorat, Timișoara, 2017
67. Kern F.R., Suess E.M., „Steel selection. A guide for improving performance and profits”, John Wiley and Sons, Inc 1979
68. Krella A., „An experimental parameter of cavitation erosion resistance for TiN coatings”, *Wear*, Vol. 270, pp. 252 – 257, 2011
69. Kuzman A.A.F., Potentcz I., „Rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri indigene”, *Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic Traian Vuia*, Timișoara, Tom 23(37), Fascicula 1 –1978
70. Kuzman A.A.F., „Influența unor proprietăți fizice ale lichidului asupra incipienței și eroziunii cavitaționale”, Teză de doctorat 1992

71. Kwok T.C., „Cavitation erosion and pitting corrosion behaviour of laser surface – melted martensitic stainless steel UNS S42000”, Surface and Coating Technology, Vol.126, Iss. 2 – 3, pp. 238 – 255, 2000
72. Matsumura M., Oka Y.I., Sakamoto A., „Quantitative prediction of erosion damage to metallic materials exposed to cavitation attack”, International Conference, Cambridge, 1992
73. Manzana M.E., „Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnică București, România, 2012
74. Mesa D.H., Pinedo C.E., Tschiptschin A.P., „Improvement of the cavitation erosion resistance of UNS S31803 stainless steel by duplex treatment”, Surface and Coatings Technology, 205, pp. 1552–1556, 2010
75. Micu L.M., Bordeasu I., Mitelea I., **Ghera C.**, Sălcianu L.C., „Cercetarea eroziunii cavitaționale asupra oțelului inoxidabil X2CrNiMn22-5-3 tratat termic, A XIV-a Conferință internațională multidisciplinară, Profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești”, vol. 26, pp. 425-430, Sebeș, 2014
76. Micu L.M., Bordeasu I., Popoviciu, Oancă O.V., Sălcianu L.C., **Ghera C.**, Anton I., „Researches upon Cavitation Erosion Behavior of some Stainless Steels with Different Structures”, HIDRAULICA Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, vol. 4, pp. 46-54, 2015
77. Micu L.M., „Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile duplex”, Teza de doctorat, Timișoara, 2017
78. Mitelea I., Trușculescu M., „Influența tratamentului termic asupra rezistenței tehnice de durată a oțelului VmoCr30”, Metalurgia 33, nr.2, București, 1981
79. Mitelea I., Lugscheider E., Tillmann W., „Știința Materialelor în construcția de mașini”, Editura Sudura, Timișoara, România, pp. 430-431, 1999
80. Mitelea I., Radu B., „Selecția și utilizarea materialelor ingineresti”, Editura Politehnică, Timișoara, 2004
81. Mitelea I., Gîrniceanu Gh., Guru R., „Tratamentul termic al oțelurilor și fontelor”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2005
82. Mitelea I., Tillmann W., „Știința materialelor”, vol. I, Editura Politehnică, Timișoara, 2006
83. Mitelea I., Tillmann W., „Știința materialelor”, vol. II, Editura Politehnică, Timișoara, 2007
84. Mitelea I., „Materiale ingineresti”, Editura Politehnică, Timișoara, 2009
85. Mitelea I., Bordeasu I., Katona S.E., „Influence of the solution treatment temperature upon the cavitation erosion resistance for 17-4 PH stainless steels, METAL 2013, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, May 15-17, pp. 208-213, 2013
86. Mitelea I. a.o., „Ultrasonic cavitation erosion of gas nitrided Ti – 6Al – 4V alloys. Ultrasonics Sonochemistry, 21, pp. 1544 – 1548, 2014
87. Mitelea I., Bordeasu I., Pelle M., Crăciunescu C.M., „Ultrasonic cavitation erosion of nodular cast iron with ferrite-pearlite microstructure”, Ultrasonics Sonochemistry, vol. 23, pp. 385-390, 2015
88. 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
89. 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

90. Oancă O., „Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale”, Teza de doctorat, Timișoara, 2014
91. Oancă O., Mitelea I., Bordeasu I., **Ghera C.**, „Reduction of cavitation erosion of the bronze CuAl10Ni5Fe2.5Mn1 by laser remelting treatment”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 133-138, July 2015
92. Oprean A., „Hidraulica mașinilor unelte”, Editura didactică și pedagogică, București, 1977
93. Opruța D., „Optimizarea constructivă a comportării statice și dinamice a aparatelor de comandă a energiei hidraulice”, Teza de doctorat, Cluj-Napoca, 1998
94. Patella R.F., Reboud J.L., Archer A., „Cavitation damage measurement by 3D laser profilometry”, *Wear*, Vol. 246, pp. 59 – 67, 2000
95. Pădurean I., „Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile”, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2005
96. Popoviciu O.M., Bordeasu I., „A standard material for cavitation erosion test”, *The Fourth Conferinta on Hydrodynamics and Hydraulic Machinery*, vol. II, Timișoara, 1994
97. Popoviciu O.M., Bordeasu I., „Cavitation erosion of 18MoCrNi13 Steel Used for manufacturing the distributor valve”, *Conferinta Internationala de Sisteme Hidropneumatice de Actionare*, vol. 1, Timișoara, 1995
98. Popoviciu O.M., Bordeasu I., „Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice”, Editura Politehnica, Timișoara, 1998
99. Pulkkinen R., „Thermodynamics and kinetics of gas nitriding alpha-iron alloys”, *Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT)*, Espoo, Finland, 1984
100. Raszga L.E.C., „Fenomenul de cavitație în distribuitoare cu sertar cilindric”, Teză de doctorat, Timișoara, 1998
101. Raszga C., Bălășoiu V., Popoviciu M., Bordeasu I., „Numerical simulation of flow in a sliding control valve”, *Pneu-Hydro 2004*, University of Miskolc, pp. 61-66, 2004
102. Sakai I., Shima A., „On a new representative equation for cavitation damage resistance of materials”, Report No. 385, Tokyo, 1987
103. Schmidt A., „Hydraulic Trainer, G.L. Rexroth, GmbH, Lohr am Main, 1986
104. Sălcianu L.C., Bordeasu I., Micu L.M., Ghera C., „The resistance to erosion by cavitation two the different structural steel stainless exposed same heat treatment by volume”, *Conferința națională multidisciplinară Profesorul Ion. D Lăzărescu, fondatorul școlii românești de teoria așchierii*, Ediția I, Cugir, pp. 675-682, 2014
105. Sălcianu C.L., „Curgerea în vanele fluture și eroziunea prin cavitație a componentelor din oțeluri inoxidabile austenitice”, Teza de doctorat, Timișoara, 2017
106. Stella J., Poirier T., Pohl M., „Cavitation-erosion of 3Y-TZPs obtained at different sintering temperatures”, *Wear*, vol. 300, pp. 163-168, 2013
107. Steller J.K., „International cavitation erosion test. Test facilities and experimental results”, *Zemes Journées Cavitation, Société Hydrotechnique de France*, Paris, France, March, 1992
108. Steller J.K., „International Cavitation Erosion test and quantitative assement of material resistance to cavitation”, *Wear*, vol. 233-235, pp. 51-64, 1999
109. Steller J.K. Giren B.G., *International Cavitation Erosion Test. Final Report*, Gdansk, ISSN 0239-9091, 2015

110. Steward L.H., „Hydraulic and pneumatic power for production”, Industrial Press Inc, New York, NY 100016,2000
111. Szkodo M., Giren B.G., „Cavitation erosion of steels processed by CO2 laser beams of various parameters”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 157-158, pp. 446-450, 2004
112. Szkodo M., „Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, pp. 1631-1363, 2005
113. Șuteu V., s.a., „Tehnologia întreținerii și reparării mașinilor și utilajelor”, Editura Dacia, Cluj-Napoca, p. 295, 1984
114. Thiruvengadam A., Preiser H.S., „On testing materials for cavitation damage resistance”, Report. 233 – 3, 1963.
115. Tjong S.C., KU J.S., HO N.J., „Laser surface alloying of ferritic Fe-40Cr alloy with ruthenium”, Surface and Coatings Technology, vol. 90, pp. 203-209, 1997
116. Tomlinson W.J., Talks M.G., „Laser surface processing and the cavitation erosion of a 16 wt% Cr white cast iron”, Wear, 139 , pp. 269–284, 1990
117. Trusculescu M., „Studiul metalelor”, Editura Didactica si Pedagogica, Bucuresti, 1977
118. Vasiliu N, Vasiliu D., Acționări hidraulice și pneumatice, vol.I, Editura Tehnica, București, 2005
119. Vermeșan G., Deac V., „Bazele tehnologice ale nitrurării ionice”, Editura Universității din Sibiu, 1992
120. Wang Z., Zhu J., „Effect of phase transformation on cavitation erosion resistance of some ferrous alloys”, Materials Science and Engineering A, vol. 358, pp. 273-278, 2003
121. Wei-Di Cao, Xiao-Ping Lu, „Duplex Treatment of High-strength steels”, Metallurgical Transactions A, vol 20A, pp. 1687-, 1989
122. Qiang Y.H., Ge S.R., Xue Q.J., „Microstructure and tribological behaviour of nitrocarburizing-quenching duplex treated steel”, Tribology International 32 pp. 131-136, 1999
123. Zhou K.S., Herman H., „Cavitation erosion of titanium and Ti36A134V: effects of nitriding”, Wear, 80 (1982), pp. 101–113
124. *** ASTM G32-2010, Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus, ASTM International, 2010
125. ***<http://aspc.cs.upt.ro/astr/index.php?page=revista&nr=15&articol=02>, International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments–HME, 2008,
126. ***<https://www.youtube.com/watch?v=U-uUYCFDTrc>, „Cavitation”, IET Institute for Energy Technology, HSR University of Applied Sciences Rapperswil, Switzerland
127. *** http://en.wikipedia.org/wiki/Laser_peening, Laser peening, Wikipedia
128. ***<http://www.lsptechnologies.com/laser-peening-process.php>, Laser peening, LSP Lechnologies, Dublin, Irlanda
129. ***<https://www.boschrexroth.com/en/xc/products/index>, Aparatura hidraulică Bosch Rexroth
130. ***<http://www.atos.com/home/components.html>, Aparatura hidraulică Atos
131. ***<http://www.sunhydraulics.com/tech-resources/manifold-erosion-due-cavitation>, Eroziune cavitacionala supape cartus, Sun Hydraulics
132. ***<http://www.hidromag.net/>, Aparatură hidraulică Hidromag
133. ***<http://www.tsicorporation.co.th/product/koso-valves/severe-service-control-valves/>, Elemente deteriorate prin cavitație

-
134. ***http://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=29, European Steel and Alloy Grades/Numbers, Caracteristici Oțeluri
 135. ***www.saarstahl.com/sag/downloads/download/11812, Caracteristici oțel 34CrNiMo6
 136. ***https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publikationen/Werkstoffdatenblaetter/Baustahl/1.7131_1.7139_de.pdf, Caracteristici oțel 16MnCr5