



UNIVERSITATEA POLITEHNICA
TIMIȘOARA



FACULTATEA DE MECANICĂ

**Comportarea la eroziune prin
cavitație a oțelurilor inoxidabile
Duplex
- REZUMAT -**

Conducători științifici

Prof.univ.dr.ing. Ion MITELEA

Prof.univ.dr.ing. Ilare BORDEAȘU

Doctorand

Ing. Lavinia Mădălina MICU

TIMIȘOARA

-2017 -

CUPRINS

Introducere

1. Stadiul actual al cercetărilor privind eroziunea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex

- 1.1. Compoziția chimică, structura și proprietățile oțelurilor inoxidabile Duplex
- 1.2. Criterii de selecție a oțelurilor inoxidabile Duplex
- 1.3. Aplicații potențiale ale oțelurilor inoxidabile Duplex
- 1.4. Degradarea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex
- 1.5. Obiectivele tezei de doctorat

2. Materialul de cercetare. Procedura experimentală

- 2.1. Rolul elementelor de aliere în oțelurile inoxidabile Duplex
- 2.2. Caracterizarea succintă a oțelului cercetat
- 2.3. Concluzii

3. Tratamente termice volumice și rezistența la eroziune prin cavitație

- 3.1. Planul experimental
- 3.2. Examinări sclerometrice
- 3.3. Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație
- 3.4. Determinări de rugozitate a suprafețelor cavitate
- 3.5. Examinări metalografice
- 3.6. Analize de difracție cu raze X
- 3.7. Analize EDX
- 3.8. Concluzii

4. Durificarea suprafeței prin tratamente de nitrurare și rezistența la eroziune prin cavitație

- 4.1. Nitrurarea în gaz
- 4.3. Rezultatele examinărilor sclerometrice și de rugozitate
- 4.4. Analize micrografice (MO + Topo + EDX)
- 4.5. Nitrurarea cu fascicul laser
- 4.6. Determinarea curbelor de cavitație
- 4.7. Rezultate privind microstructura și proprietățile mecanice
- 4.8. Evaluarea eficienței diferitelor tipuri de tratamente asupra rezistenței la cavitație
- 4.9. Concluzii

5. Eroziunea prin cavitație a compozitului durificat cu particule, WC-9Co-5Cr-1Ni, depus prin tehnica HVOF pe substrat din oțel inoxidabil Duplex

- 5.1. Introducere
- 5.2. Pulberea utilizată și procedura experimentală
- 5.3. Evaluarea rezultatelor experimentale
- 5.4. Concluzii

6. Contribuții privind relațiile analitice ce definesc curbele caracteristice ale eroziunii prin cavitație

- 6.1. Introducere
- 6.2. Modele pentru curbele caracteristice ale eroziunii cavitație
 - 6.2.1. Modelul Thiruvengadam
 - 6.2.2. Modelul Noskievici
 - 6.2.3. Modelul Heymann F.J.
- 6.3. Modelul propus
 - 6.3.1. Introducere
 - 6.3.2. Stabilirea formelor matematice pentru curbele caracteristice de aproximare
 - 6.3.3. Verificarea gradului de încredere
- 6.4. Concluzii

7. Concluzii finale și contribuții originale. Noi direcții de cercetare

Valorificarea parțială a rezultatelor cercetării

Bibliografie

Obiectivele tezei de doctorat sunt următoarele:

- ❖ aprofundarea mecanismului de degradare prin eroziunea cavitației și stabilirea modalităților tehnologice de creștere a rezistenței la degradare a oțelurilor inoxidabile Duplex prin aplicarea unor tratamente termice volumice și de suprafață (călirea pentru punere în soluție de la temperaturi cuprinse între 1000 °C și 1100 °C, recoacere pentru sensibilizare la două temperaturi critice (475 °C și 850 °C), nitrurare în mediu gazos sau cu fascicul laser, acoperire cu compozite pulverulente și retopire cu fascicul de înaltă energie;
- ❖ dezvoltarea unor metode de testare a suprafețelor degradate cavitațional care vor permite un control mai precis al evoluției acestui proces cu implicații în reducerea riscului de apariție a avariilor;
- ❖ morfologia și caracterizarea microstructurii suprafețelor solicitate la eroziunea cavitației;
- ❖ conceperea unui model matematic pentru descrierea curbei vitezei de eroziune a cavitației.

Scopul cercetărilor

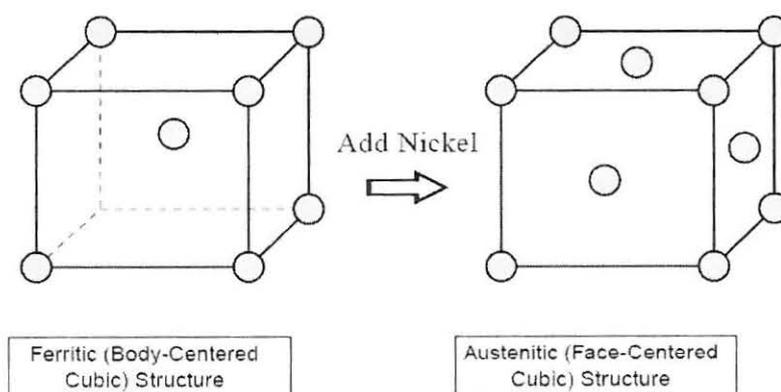
Evidențierea rolului și a importanței tratamentelor aplicate în asigurarea unei rezistențe sporite la eroziunea cavitațională a oțelului inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3.

Noutatea tezei de doctorat constă în găsirea unei **corelații** între starea structurală a materialului și viteza de degradare prin eroziune cavitațională (exprimată prin parametrul „ $\frac{1}{M_{DER}}$ ” care reprezintă inversul adâncimii medii de pătrundere a eroziunii), precum și optimizarea procesului tehnologic de prelucrare în vederea măririi duratei de viață a echipamentelor care lucrează în astfel de condiții.

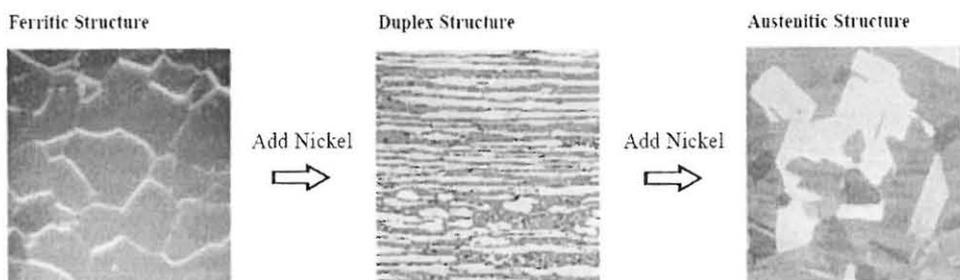
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPLEX

Oțelurile inoxidabile Duplex au în stare de echilibru o microstructură alcătuită din cca 50% ferită și 50% austenită, motiv pentru care mai sunt cunoscute sub numele de oțeluri inoxidabile ferito-austenitice sau austenito-feritice. Ele prezintă o mare stabilitate la coroziune sub tensiune în fluide apoase ce conțin ioni de clor și o excelentă stabilitate la coroziune în puncte. Totodată, ele oferă înalte caracteristici de rezistență mecanică (limită de curgere și rezistență la rupere). Elementele de aliere cele mai importante ale oțelurilor Duplex sunt Cr, Ni, Mo și N [110], [115]. Cromul și molibdenul

conduc la formarea feritei, stabilizând rețeaua cristalină cubică cu volum centrat (c.v.c.), în timp ce nichelul și azotul au caracter gamagen, stabilizând rețeaua cristalină cubică cu fețe centrate (c.f.c.) a austenitei. Elementele de aliere Cr, Mo și Ni provoacă creșterea rezistenței la coroziune, în mod deosebit a rezistenței la coroziune în puncte și tenso-fisurantă în medii de ioni de Cl. azotul are un rol important în creșterea caracteristicilor de rezistență mecanică. Totodată, acesta mărește temperatura la care austenita începe să se formeze din ferită și de asemenea favorizează precipitarea nitrurilor de crom pe interfețele grăunților de ferită – ferită și ferită – austenită.



Modificarea tipului de rețea cristalină prin aliere cu Ni



Modificarea structurii microscopice prin aliere cu Ni

Urmare a bunelor proprietăți mecanice și a excelentei rezistențe la coroziune în diverse medii și condiții de exploatare, oțelurile inoxidabile Duplex sunt utilizate cu succes în numeroase ramuri industrial. Printre domeniile specifice de utilizare a acestora se enumeră:

- cele în care se manifestă fenomenul de cavitație - echipamentele hidromecanice (rotoare și palete de pompe și turbine hidraulice, elicile de vapoare și nave maritime și fluviale;
- platforme de foraj marin pentru petrol și gaze (echipamente de forare și procesare, etc.);
- instalațiile de desalinizare a apei de mare;
- instalații pentru industria chimică (rezervoare pentru transportul și stocarea substanțelor chimice, etc.);
- echipamente pentru industria alimentară (rezervoare pentru apă caldă, etc.);



2. MATERIALUL DE CERCETARE. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

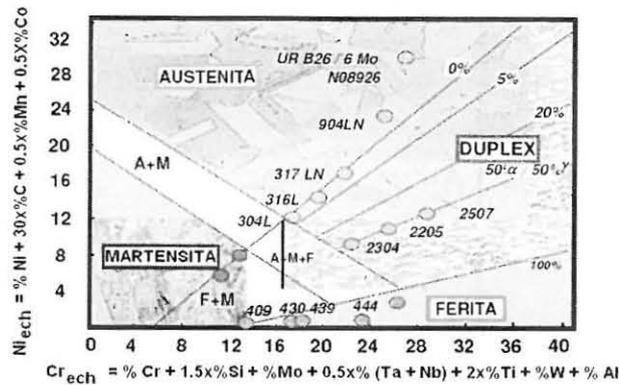
Materialul care face obiectul cercetărilor experimentale efectuate în prezenta lucrare este marca de oțel inoxidabil Duplex 2205, simbolizat X2CrNiMoN22-5-3 conform normei europene EN 10088 și UNS S31803 după ASTM A276.

Caracteristicile mecanice, în starea de livrare

Limita de curgere, $R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Rezistența la rupere, R_m [N/mm ²]	Alungirea la rupere, A_5 [%]	Gâtuirea la rupere, Z [%]	Duritatea, HB [daN/mm ²]
545	736	28	52	275

Compoziția chimică, % masă

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
0,017	0,72	1,8	22,08	5,02	2,9	0,021	0,012	0,16



Din acest material au fost executate epruvete cilindrice (fig. 2.3) pentru conducerea testelor de cavitație după aplicarea următoarelor tehnici de tratamente termice volumice și de suprafață:

- călirea pentru punere în soluție;
- călirea pentru punere în soluție urmată de recoacere pentru sensibilizare la două temperaturi critice;
- nitrurare în mediu gazos și cu fascicul laser;
- pulverizare termică cu flacără de mare viteză, HVOF urmată de retopire cu fascicul laser.

Degradarea suprafeței probelor a fost realizată prin eroziunea cavitației, generată în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. derularea etapelor de încercare, specifică laboratorului.

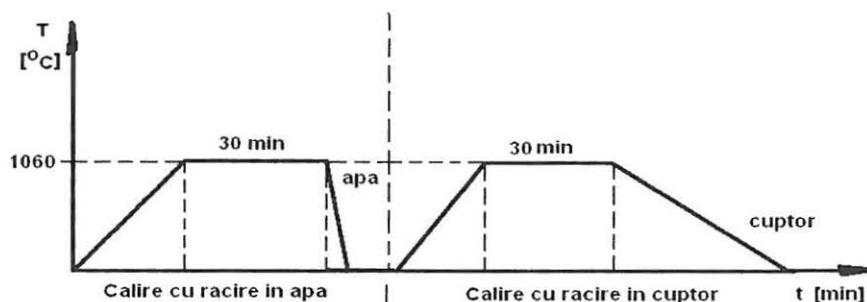


Fig. 2.3 Epruveta în procesul cavitațional

3. TRATAMENTE TERMICE VOLUMICE ȘI REZISTENȚA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE

Din oțelul analizat, au fost executate mai multe seturi de câte trei probe de cavitație având diametrul de 15,9 mm care au fost supuse încălzirii pentru punere în soluție la temperatura de 1060°C, cu durată de menținere de 30 min urmată de o răcire în cuptor sau de o răcire bruscă în apă.

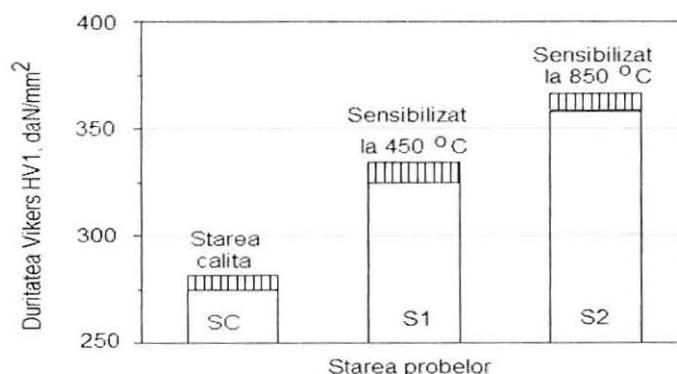
Ulterior, o parte din probele călite în apă au fost supuse unei recoaceri pentru sensibilizare, fie la 475°C timp de 4 h, fie la 850°C timp de 2 h cu răcire în aer. Scopul urmărit a vizat efectul reacțiilor de transformare și de precipitare în stare solidă asupra rezistenței la eroziune prin cavitație.



	Călire pentru punere în soluție			Recoacere pentru sensibilizare		
	T [°C]	t [min]	Răcire	T [°C]	t [min]	Răcire
SC1	1060	30	apă	-	-	-
SC2	1060	30	cuptor	-	-	-
S1	1060	30	apă	475	240	aer
S2	1060	30	apă	850	120	aer

Istoria termică a probelor utilizate în experimente

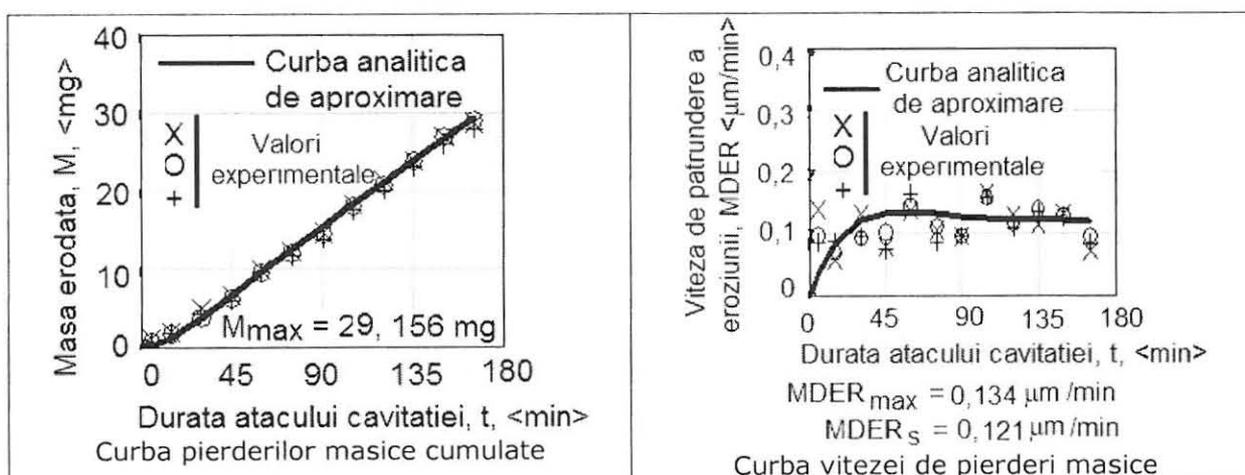
În urma tratamentelor termice aplicate, pe generatoarea probelor care urmau a fi atacate la cavitație s-au realizat măsurători de duritate (între 8 și 10 puncte de măsurare). se constată că ambele tratamente de sensibilizare, se manifestă printr-o creștere sensibilă a durității materialului comparativ cu starea structurală obținută în urma călirii pentru punere în soluție. Astfel, dacă după călirea pentru punere în soluție duritatea are valori de 270..280 HV1, prin fragilizare la 475°C aceasta se mărește la 325...335 HV1, iar în urma expunerii materialului la 850°C, se obțin valori de 358...365 HV1.

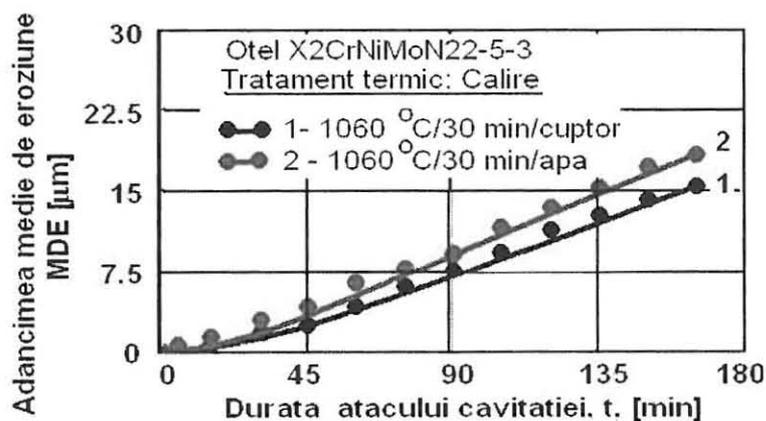
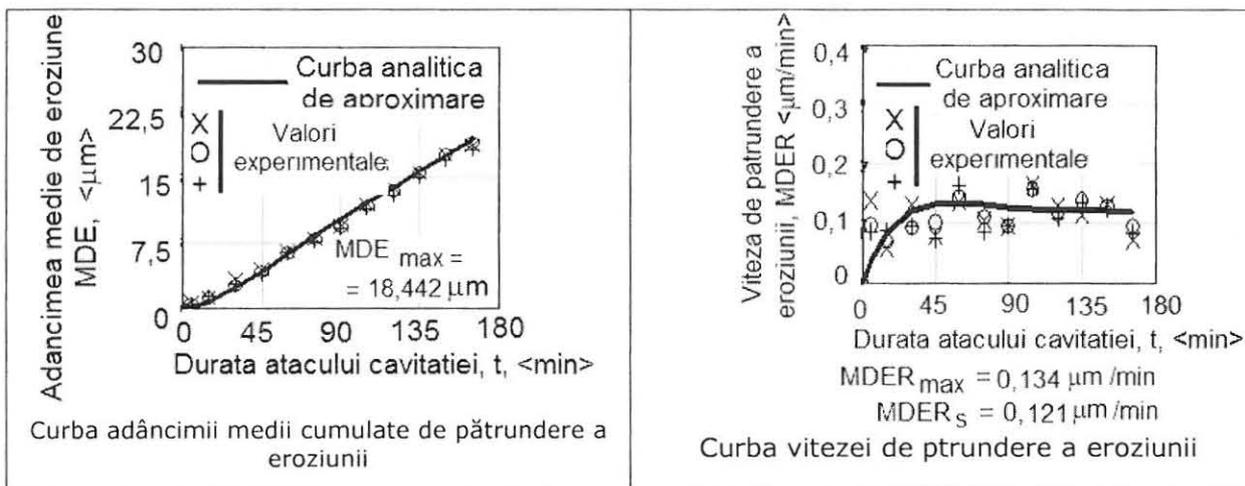


Histograma durității în funcție de tratamentul termic aplicat

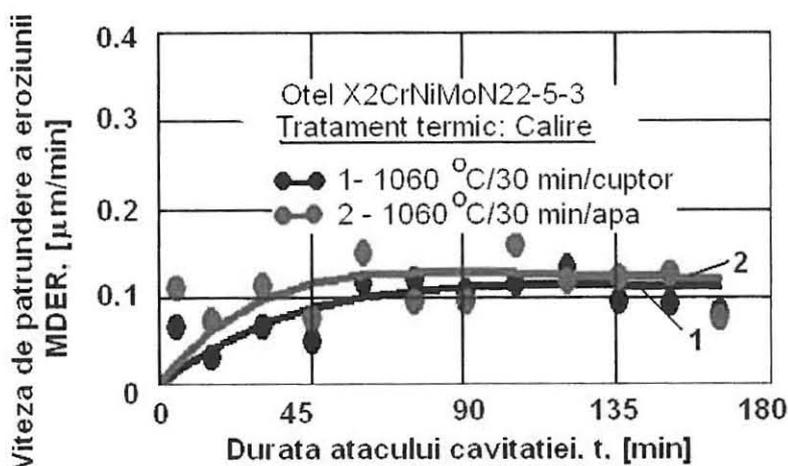
Utilizarea curbelor de aproximație este foarte importantă, deoarece funcție de forma pe care o au și de dispersia punctelor experimentale față de acestea, se pot face aprecieri asupra comportării și rezistenței la cavitație pe durata atacului. Pentru construirea curbei de aproximare a valorilor experimentale, obținute pentru fiecare set de câte trei probe, s-a calculat valoarea medie a pierderilor masice, pentru fiecare perioadă intermediară de testare. Din analiza lor, se sesizează faptul că cele mai mici valori au fost înregistrate la probele tratate termic prin calire pentru punere în soluție urmata de recoacere pentru sensibilizare la 850°C timp de 2 ore și răcire în aer.

Din comparația curbelor adâncimilor medii de pătrundere, răcirea probei în cuptor, după menținerea la temperatura de 1060°C sugerează că suprafața atacată de cavitație are o rezistență ceva mai mare. Cum însă semnificativ din punct de vedere al evoluției comportării este zona liniară (după cca. 45 minute de atac), reflectată și de modul în care viteza tinde spre valoarea de stabilizare), se poate concluziona că tratamentul aplicat, indiferent de varianta mediului de răcire, oferă o comportare și o rezistență la eroziunea cavitației vibratoare, aproape identică (după cca. 120 minute de atac vitezele de stabilizare au valori apropiate, aflate în intervalul de erori admisibil pentru un astfel de proces de distrugere).



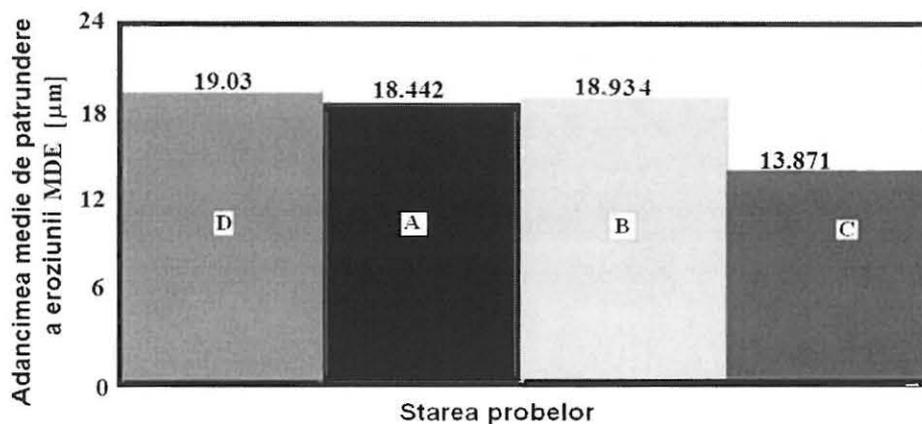


Variația adâncimii de eroziune cu durata atacului cavităției

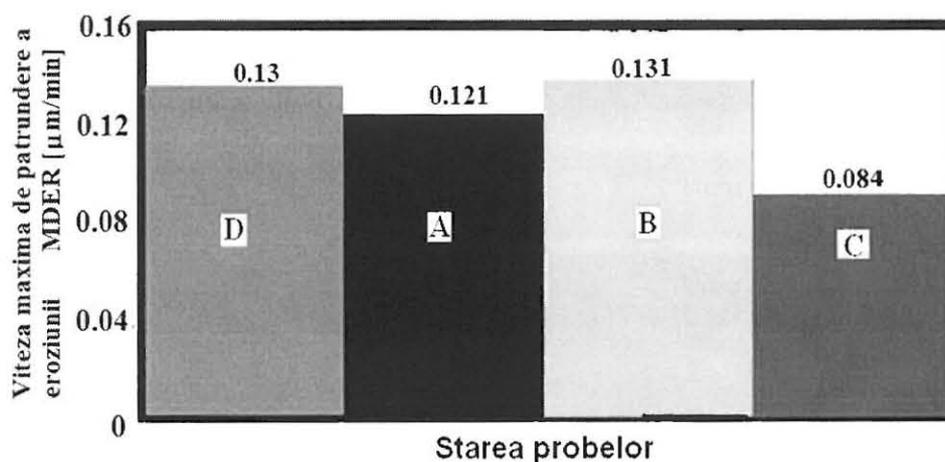


Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavităției

Din compararea rezistențelor la cavitație ale oțelului analizat în cele trei stări de tratament aplicat, cu cea a oțelului 41Cr4, considerat ca etalon în cadrul laboratorului de cavitație al Universității Politehnica Timișoara a reieșit că cele mai favorabile valori ale celor doi parametri ce caracterizează rezistența la cavitație le prezintă starea structurală obținută prin călire pentru punere în soluție urmată de recoacere pentru sensibilizare la 850°C.

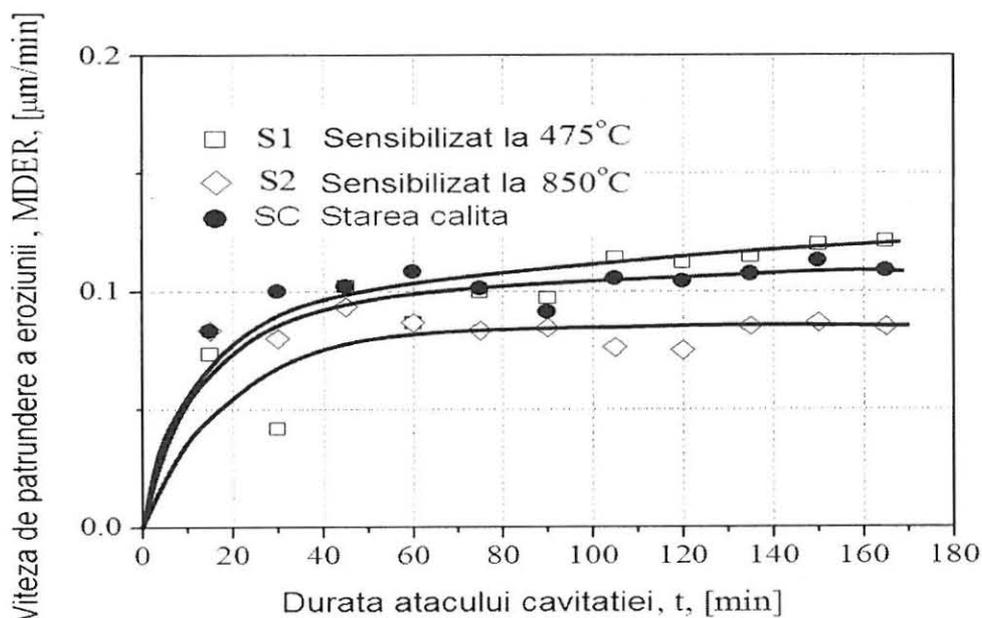
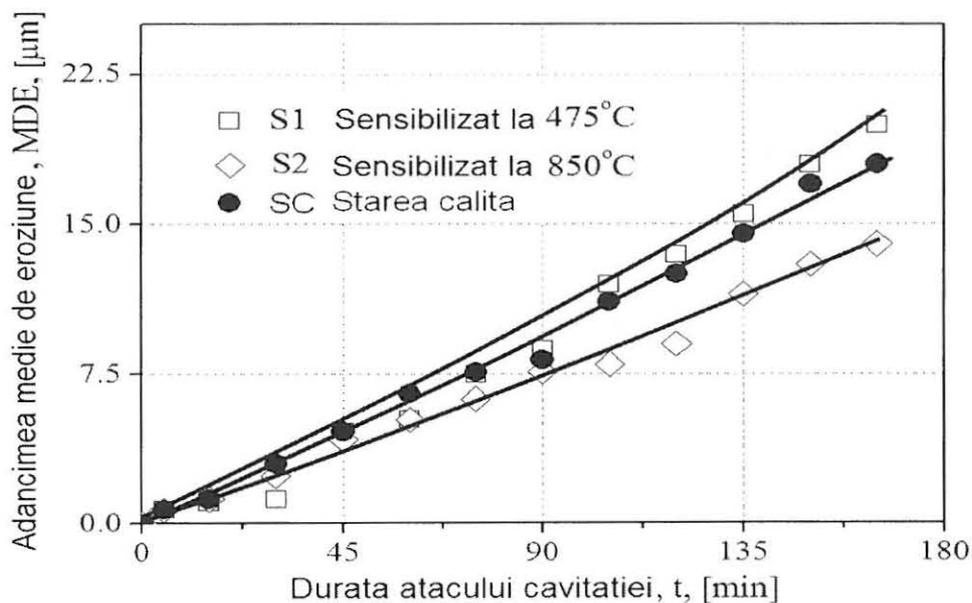


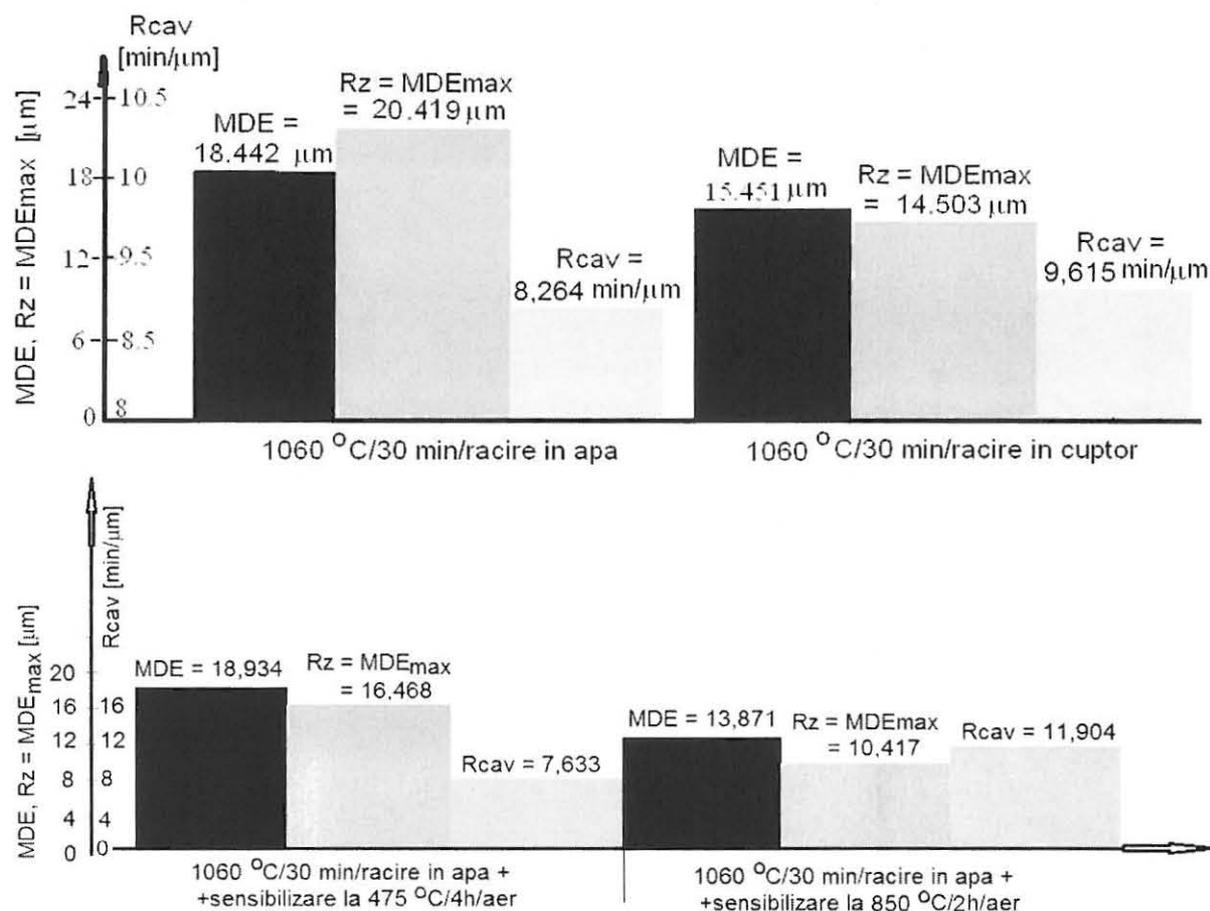
- A** – Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060°C /30 min/apă;
B – Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060°C /30 min/apă + sensibilizare 475°C/4 h/ aer;
C – Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060°C /30 min/apă + sensibilizare 850°C/2 h/ aer;
D – Oțel aliat pentru îmbunătățire, 41Cr4, considerat ca etalon.



Dispersia datelor experimentale față de valorile teoretice indică influența microstructurii asupra atacului prin eroziunea cavitației pentru diferite valori ale timpului de expunere. poate observa că, după 165 minute de atac al cavitației, prin aplicarea unei recoaceri pentru sensibilizare la 850°C se obține o reducere cu cca. 11% a adâncimii maxime de eroziune și

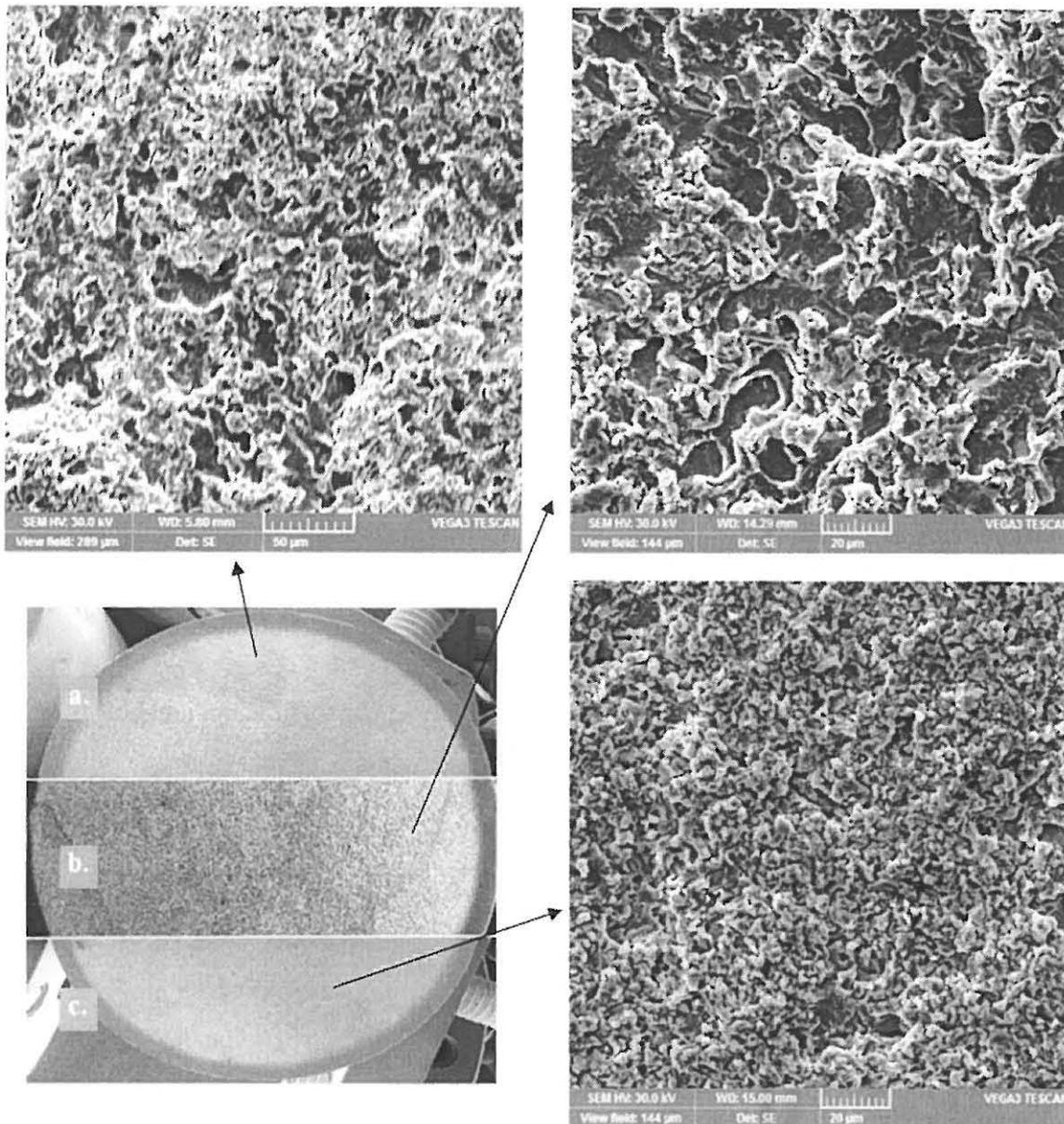
cu cca. 28% a vitezei maxime de eroziune a cavitației. În schimb, expunerea oțelului la 475°C, deși conduce la creșterea durității ca urmare a descompunerii spinoidale a feritei în domenii sărace, α , respectiv bogate, α' (cu rol fragilizant), în crom, înrăutățește rezistența la eroziune prin cavitație. Potrivit datelor se provoacă o mărire cu cca. 22% a adâncimii maxime de eroziune și cu cca. 21% a vitezei maxime de eroziune a cavitației față de starea de tratament de călire pentru punere în soluție.





În figurile de mai sus este pusă în evidență influența mediului de răcire, prin compararea profilogramelor suprafețelor erodate, evaluate pe baza parametrilor de rugozitate. Din aceste diagrame rezultă că prin răcire mai lentă, rezistența la cavitație crește, simultan cu reducerea adâncimii de pătrundere a eroziunii. Toti parametri utilizați în evaluarea rezistenței oțelului Duplex arată că prin tratamentul termic de călire cu răcire lentă (în cuptor) se obține un spor de rezistență la atacul distructiv. Cauza o reprezintă, în primul rând, proporția de cca. 75% austenită din microstructură, care este superioară celei obținute prin răcire în apă (de cca. 52%), chiar dacă durezza este ușor mai mică.

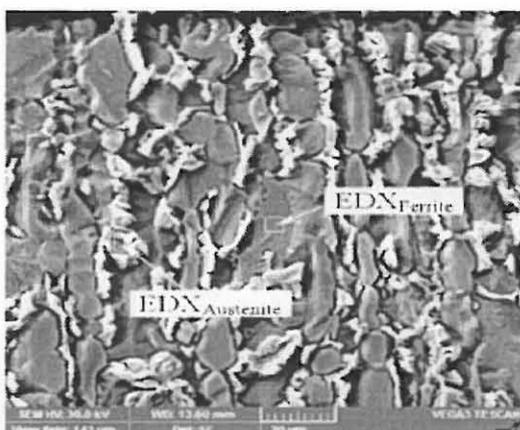
Deasemenea se constată un spor substanțial adus rezistenței la cavitația vibratoare de sensibilizarea la 850°C cu o durată de menținere de 2 ore și cu răcire în aer. Sporul de rezistență, față de cel obținut prin sensibilizare la 450°C cu o durată de menținere de 4 ore, caracterizat prin R_{cav}, este de cca. 56%, iar față de călirea volumică cu răcire în apă crește cu aproximativ 44%.



Microjeturile care urmează imploziei bulelor cavitaționale și ale căror viteze pot atinge valori de mai multe sute de metri pe secundă conduc la deformări plastice importante și la formarea rețelelor de microfisuri (indicate cu săgeți) asociate fenomenului de oboseală datorat contracțiilor ciclice care se manifestă pe durata atacului cavitațional. Atacul cavitațional s-a propagat cu preponderență în faza de ferită și pe limitele de separație dintre ferită și austenită. Întrucât prin fragilizare la 475°C au apărut domenii feritice bogate în crom, α' , ele vor fi sediul unor degradări mai pronunțate de material prin eroziunea cavitației. Aplicarea unei recoaceri pentru sensibilizare la 475°C timp de 4 h, după călirea în apă, nu provoacă schimbări structurale

sesizabile microscopic, în schimb prin ridicarea temperaturii de recoacere la 850 °C se provoacă fenomene de precipitare a unor faze secundare.

Cavitățile de mici dimensiuni au luat naștere în matricea feritică și pe limitele de separație dintre ferită și austenită. Pe măsură ce eroziunea prin cavitație progresa, atacul se concentrează în faza de austenită și apoi se generalizează în faza de ferită.



(Pr. S1 – aria investigată EDX)

Proba	Element, % masă	EDX _{Ferita}	EDX _{Austenita}
S1 (în acord cu tab.3.1)	Cr	22.4	21.2
	Ni	5.3	5.9
	Mo	3.1	2.8
S2 (în acord cu tab.3.1)	N	≤ 0.04	0.32
	Cr	21.2	21.8
	Ni	5.4	5.5
	Mo	3.09	2.9
	N	≤ 0.04	0.34

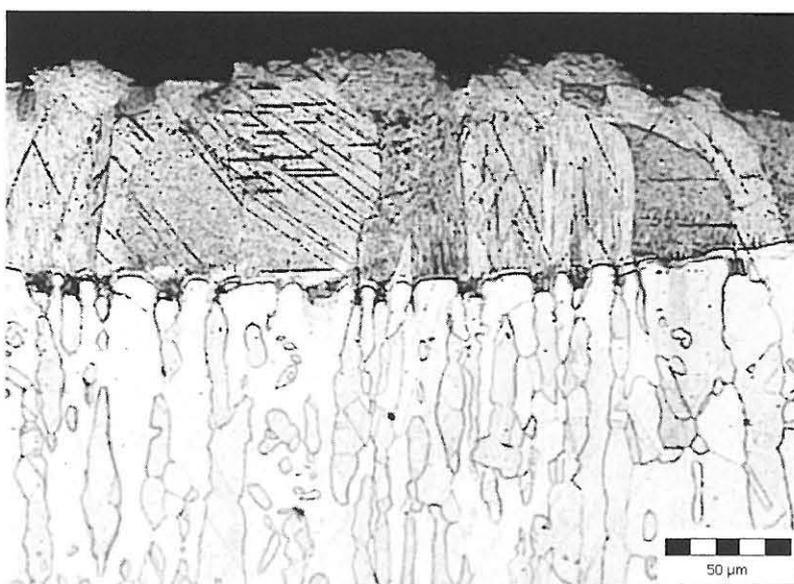
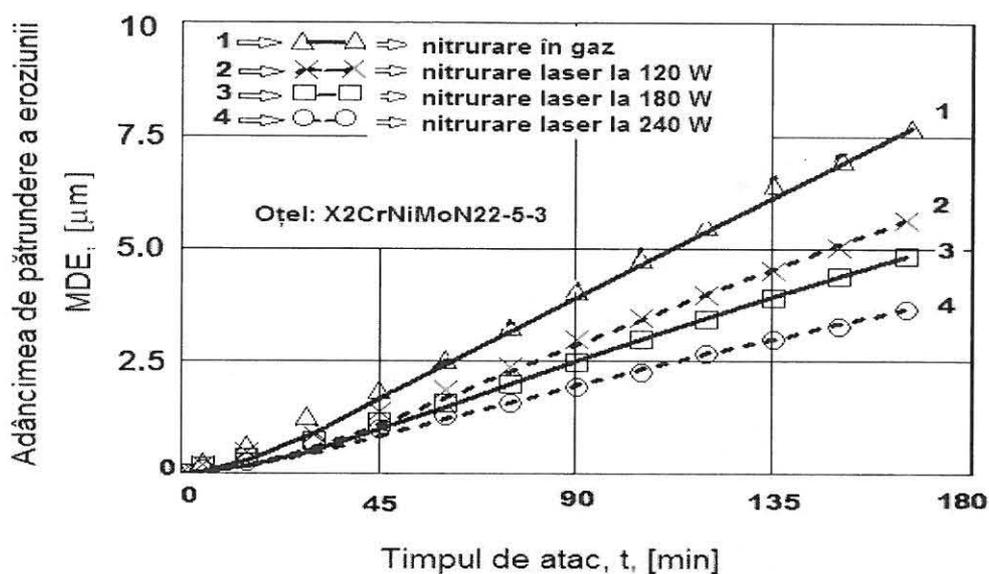
4. DURIFICAREA SUPRAFEȚEI PRIN TRATAMENTE DE NITRURARE ȘI REZISTENȚA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE

Nitrurarea cu fasciculul laser constituie o modalitate tehnologică atractivă de îmbunătățire a proprietăților tribologice și a rezistenței la coroziune a diferitelor substraturi, datorită simplității și posibilității de formare a unor straturi funcționale cu o duritate crescută, afectând puțin materialul de bază. La viteze transversale de cca.100 mm/s are loc o amplă și rapidă dizolvare a azotului în stratul marginal topit și în acest mod se formează o zonă de material îmbogățit în azot. Suprafețele frontale ale epruvetelor destinate cercetării comportării și rezistenței la cavitație, au suferit un tratament termochimic de nitrurare cu ajutorul unui laser pulsant programabil Nd-YAG, ce dotează standul Trumpf HL 124 P LCU.

Acest tratament a vizat formarea unor straturi de suprafață cu o duritate crescută, care să provoace o îmbunătățire a rezistenței la eroziunea cavitației.

Fasciculul laser a baleiat pe suprafața probelor cu o viteză de 4.07 mm/s, timp de 10 ms, într-o atmosferă de azot pur cu un debit de 33 l/min. Puterea în impuls a fost diferită, în funcție de regimul ales, astfel:

- primul set de probe a fost expus la 240 W;
- al doilea set de probe, la 180 W;
- al treilea set de probe a fost expus la 120 W.



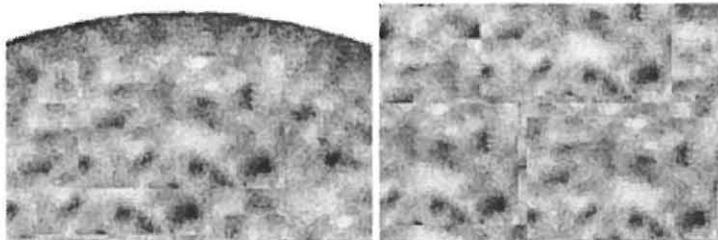
- curbele de mediere au evoluții specifice suprafețelor cu foarte bună și excelentă rezistență la cavitație;
- dispersia punctelor experimentale față de curba de mediere, indiferent de regimul razei laser este foarte redusă, ceea ce arată că suprafața atacată de cavitație este omogenă din punct de vedere al proprietăților mecanice, responsabile de rezistența și comportarea la eroziunea cavitației;
- maximele vitezelor de eroziune se ating în intervalul 60-70 minute al atacului cavitației, ceea ce denotă corectitudinea derulării procesului de tratament și de constanță a parametrilor caracteristici: durată impuls, frecvență și putere;

- comparativ cu nitrurarea în gaz, varianta de tratament cu laser favorizează o reducere importantă atât a adâncimii (cu cca. 24% pentru regimul de 120 W, cu cca. 55% pentru regimul de 180 W și cu cca. 125% pentru regimul de 240 W) cât și a vitezei de degradare prin eroziunea cavitației (cu cca. 13% pentru regimul de 120 W, cu cca. 36% pentru regimul de 180 W și cu cca. 96% pentru regimul de 240 W);
- creșterea puterii în impuls de la 120 W la 240 W se manifestă printr-o diminuare a adâncimii de eroziune cu cca. 81% și a vitezei de eroziune cu cca. 74%.

5. EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A COMPOZITULUI DURIFICAT CU PARTICULE, WC-9CO-5CR-1NI, DEPUȘ PRIN TEHNICA HVOF PE SUBSTRAT DIN OȚEL INOXIDABIL DUPLEX

La momentul actual, în foarte multe ramuri industriale (industria aero-spațială, industria de autovehicule, industria navală etc), protejarea suprafețelor cu pulberi compozite, la acțiunile distructive ale mediului de lucru, precum coroziunea chimică, eroziunea abrazivă și cavitațională a devenit indispensabilă [34,35,81,127,128].

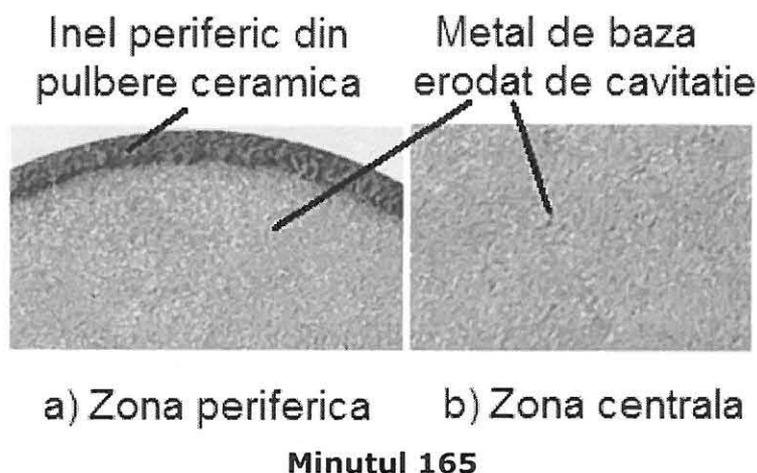
Pulbere ceramica pulverizata termic



a) Zona periferica b) Zona centrala

Minutul 0

Inițierea fenomenelor de fisurare și de formare a ciupiturilor de material se produce în principal pe limitele de separație dintre grăunți și în interiorul grăunților de ferită. Totodată, urmare a efectului de deformare la rece sub acțiunea bulelor cavitaționale are loc o maclare a grăunților de austenită și chiar declanșarea unei transformări martensitice.

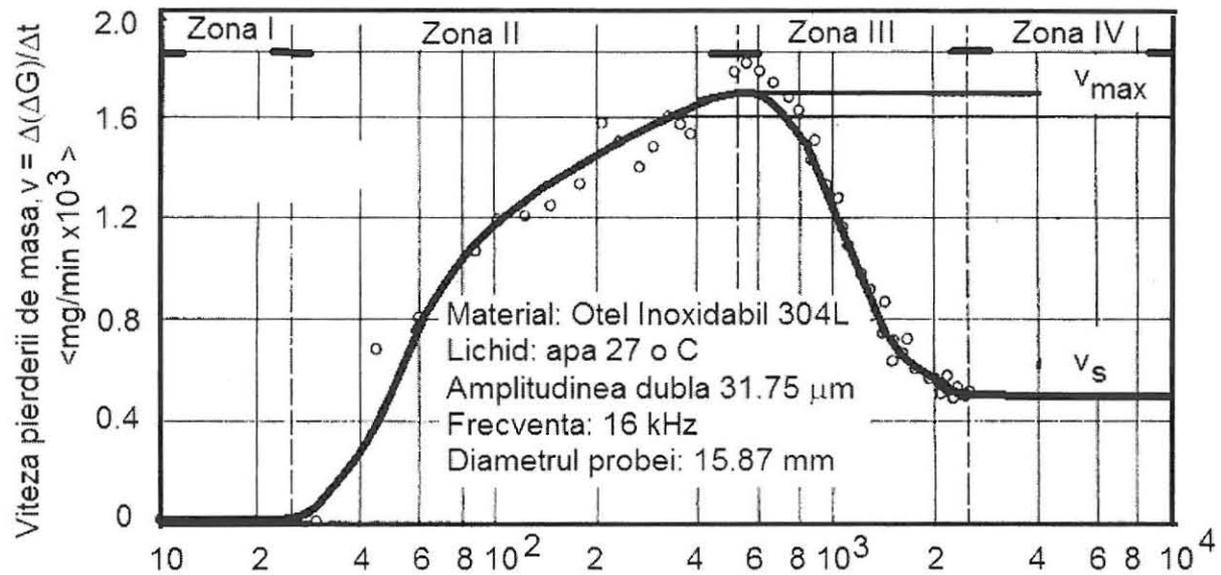


Forma stratului obținut prin retopire cu fascicul laser, cu durata în puls de 6 ms este una alcătuită din fâșii cu vârfuri ascuțite de carburi, pronunțate și multe goluri între ele. După 120 minute de cavitație, practic tot stratul expus norului de bule, specific cavitației vibratoare, este îndepărtat, eroziunea dezvoltându-se în materialul de bază.

Acest regim de topire cu durata de 6 ms în puls nu contribuie la îmbunătățirea semnificativă a rezistenței la cavitație a stratului de acoperire.

CAPITOLUL 6. CONTRIBUȚII PRIVIND RELAȚIILE ANALITICE CE DEFINESC CURBELE CARACTERISTICE ALE EROZIUNII PRIN CAVITAȚIE

Contribuția constă în stabilirea unei noi forme pentru ecuația vitezei de eroziune, plecând de la curba model stabilită în 1953 de Thiruvengadam și acceptată ca model și referință atât de normele ASTM, cât și de toți cercetătorii din domeniu.



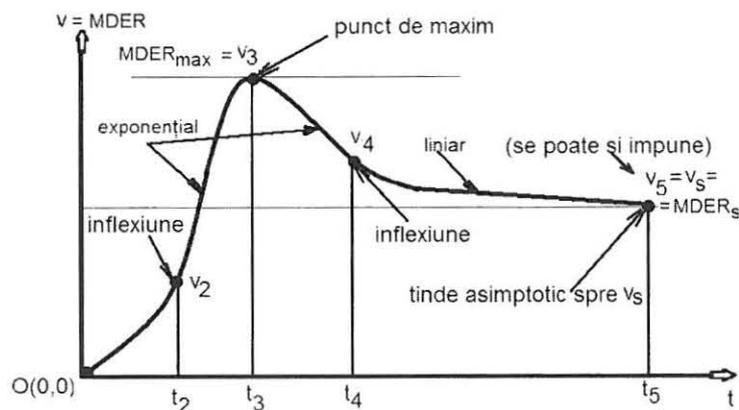
Plecând de la relația stabilită în 2004 de Bordeășu și colaboratori pentru viteza de pătrundere a eroziunii MDER(t).

$$MDER(t) = \frac{dMDE(t)}{dt} = A(1 - e^{-Bt}) + ABte^{-Bt} \quad (6.9)$$

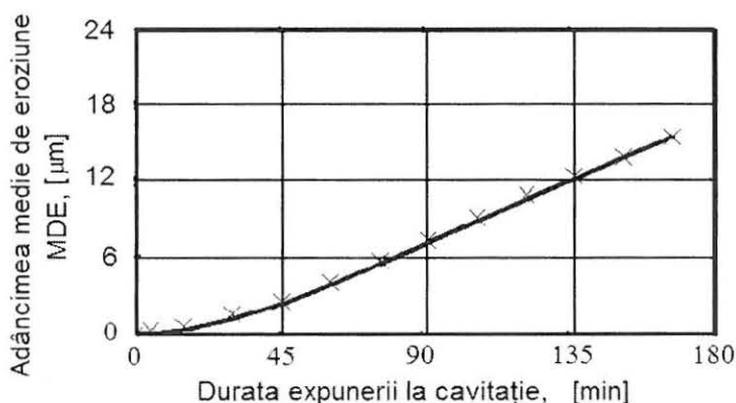
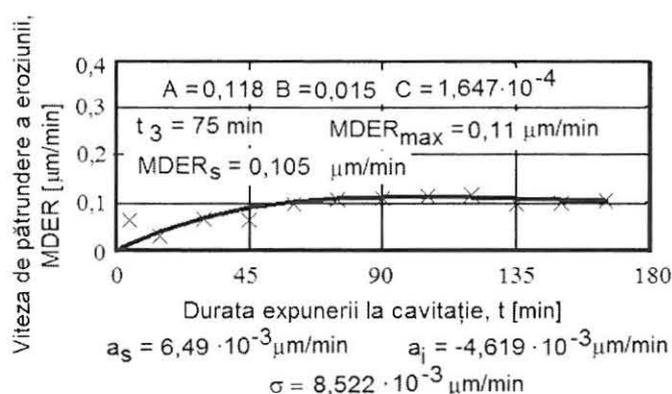
și admitând o variație, ca cea din figura de mai jos (similară ca formă celei stabilite de Thiruvengadam), cu condițiile menționate, am completat relația Bordeășu (6.9) cu termenul $(-Ct)$, relația (6.10), prin care se ia în considerare scăderea liniară a vitezei în zona de stabilizare a eroziunii. Integrarea ei, forma (6.16,) ne oferă variația adâncimii medii de pătrundere.

$$MDER(t) = v(t) = A(1 - e^{-Bt}) + ABte^{-Bt} - Ct \quad (6.10)$$

$$MDE(t) = At(1 - e^{-Bt}) - Ct^2/2 \quad (6.16)$$



- ✗ Pentru parametrul de forma B se alege o valoare în intervalul (0,012...0,03), stabilit pe baza datelor rezultate din prelucrarea statistică a peste 40 oțeluri inoxidabile testate în LMHT.
- ✗ Constantele A și C sunt determinate din condițiile puse pentru forma curbei, funcție de modul de dispersie a punctelor experimentale, în punctele t3 și t5.
- ✗ Aproximarea cu noua relație, este superioară celei obținute cu relația Bordeășu pentru zona de stabilizare a vitezei, valoarea parametrului fiind net inferioară (vezi exemplul pentru curbele de mai jos la care, pentru comparație, în tabel sunt comparate valorile parametrilor statistici a_s , a_i și σ).



Starea oțelului	a_s [$\mu\text{m}/\text{min}$]	a_i [$\mu\text{m}/\text{min}$]	σ [$\mu\text{m}/\text{min}$]
Călire 1060°C /30 min/cuptor-rel.(5.9)	$6,65 \cdot 10^{-3}$	- 0,011	$8,579 \cdot 10^{-3}$
Călire 1060°C /30 min/cuptor-rel.(5.10)	$6,49 \cdot 10^{-3}$	- $4,619 \cdot 10^{-3}$	$8,522 \cdot 10^{-3}$

Așadar, introducerea unui termen suplimentar în modelul matematic propus de Bordeășu și colaboratorii pentru viteza de eroziune, în ipoteza că

evoluția acesteia, după perioada de atenuare, este una liniară descrescătoare spre valoarea de stabilizare, aduce o creștere a gradului de aproximare a punctelor experimentale

7. Concluzii finale și contribuții originale. Noi direcții de cercetare

Lucrarea de doctorat **“Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex”** este una interdisciplinară (Ingineria materialelor – Inginerie mecanică) care se înscrie în tendința actuală a cercetărilor, de a găsi noi soluții de îmbunătățire a performanțelor echipamentelor care sunt supuse solicitărilor generate de implozia bulelor de cavitație din câmpul hidrodinamic.

Principalele concluzii și contribuții originale ale lucrării pot fi sintetizate astfel:

1. Implozia bulelor umplute cu gaz și / sau vapori, însoțită de fenomene fizice intense, ca microjeturile care urmează imploziei bulelor și ale căror viteze pot atinge valori de mai multe sute de metri pe secundă, se manifestă printr-o eroziune rapidă a suprafeței materialelor, cu viteze de perforare de ordinul a 0,1...10 mm/an, funcție de intensitatea hidrodinamicii procesului. Pentru a diminua această degradare sunt necesare materiale cu o înaltă rezistență la cavitație.

2. Interacțiunea dintre principalele elemente de aliere (Cr, Ni, Mo, N) din oțelurile inoxidabile Duplex vizează pe de o parte obținerea unui echilibru structural al celor două faze (ferită, F și austenită, A), iar pe de altă parte, evitarea formării de compuși intermetalici duri și fragili (Sigma σ , Chi χ , nitruri Cr_2N , carburi, M_{23}C_6 , etc.) care afectează tenacitatea și rezistența la coroziune.

3. Tratamentul termic de recoacere pentru sensibilizare la 475 °C aplicat în urma călirii pentru punere în soluție de la 1060 °C cu răcire în apă, provoacă o creștere a durității de la cca. 275 HV (stare călită) la cca. 330 HV (stare sensibilizată) și o mărire cu cca. 21% a vitezei maxime de eroziune a cavitației. Întrucât oțelul are în microstructură cca. 50% austenită, efectul fragilizant al fazei feritice α' bogată în crom (formată în timpul recoacerii la 475 °C) nu este atât de dăunător în privința comportării la cavitație, ca în cazul unui oțel inoxidabil pur feritic.

4. Durificarea prin îmbătrânire la 850 °C (361 HV), se manifestă printr-o reducere cu cca. 11% a adâncimii maxime de eroziune și cu cca. 28% a vitezei maxime de eroziune a cavitației, comparativ cu starea structurală obținută în urma călirii pentru punere în soluție de la 1060 °C cu răcire în apă. Explicația are la bază declanșarea fenomenelor de precipitare a unor faze secundare și a procesului de reformare a austenitei din ferită.

5. Pentru regimul tehnologic folosit, nitrurarea în gaz conferă o duritate maximă a suprafeței de cca. 630 – 640 HV0.5 și o adâncime a stratului

durificat de cca. 0,12 mm. Rezistența suprafeței nitrurate în gaz la eroziunea cavitației crește cu circa 9%, iar adâncimea medie de pătrundere a eroziunii se reduce cu circa 152%.

6. La nitrurarea cu fascicul laser, prin modificarea puterii în impuls de la 120 W la 240 W se provoacă o mărire a adâncimii stratului de difuzie de la 0,14 la 0,20 mm, simultan cu creșterea rezistenței la cavitație cu circa 81%, dacă ne raportăm la adâncimile de eroziune, respectiv cu circa 74 %, dacă ne raportăm la vitezele de eroziune.

7. Suprafețele acoperite cu compozitul pulverulent WC-9Co-5Cr-1Ni prin pulverizare termică HVOF au o rezistență relativ mică la forțele de presiune create de impactul cu microjeturile și undele de șoc dezvoltate în procesul de cavitație, datorită slabei legături dintre metalul de bază și stratul pulverizat.

8. Selecția judicioasă a parametrilor de bază ai fasciculului laser conduce la obținerea după retopire, a unei suprafețe alcătuite din fâșii fine, fără defecte (fisuri, goluri, vârfuri proeminente, material ars), cu o duritate mare, care să confere o înaltă rezistență la eroziunea cavitației.

9. Introducerea unui termen suplimentar în modelarea matematică a vitezei de eroziune, în ipoteza că evoluția acesteia după perioada de atenuare este una liniar descrescătoare spre valoarea de stabilizare, aduce o creștere a gradului de aproximare a punctelor experimentale.

În încheiere, îmbinarea cercetării laturii aplicative a acestor investigații din punctul de vedere al îmbunătățirii performanțelor echipamentelor care lucrează în medii cavitaționale, cu latura fenomenologică, a determinării și explicării științifice a reacțiilor de interfață mediu cavitant – material care au loc, face ca lucrarea să se înscrie în tendințele și metodologia modernă utilizată în cercetarea științifică.

Noi direcții de cercetare

Pe baza rezultatelor obținute în cadrul tezei de doctorat, pot fi formulate următoarele direcții pentru cercetările viitoare:

1. Rezistența la eroziunea prin cavitație a straturilor depuse prin sudare în cadrul operațiilor de remaniere a echipamentelor hidromecanice;
2. Influența unor tratamente mecano-termice și termo-mecanice asupra rezistenței la eroziune prin cavitație;

Cercetarea degradării structurale a oțelurilor inoxidabile Duplex în perioada de incipiență a cavitației.

Bibliografie selectivă

- [1] AL-HASHEM A., CACERES P. G., ABDULLAH A., SHALABY H. M.: Cavitation Corrosion of Duplex Stainless Steel in Seawater, *Corrosion*, 53/2, 1997, pp.103-113
- [2] AL-HASHEM A., RIAD W.: The effects of duplex stainless microstructure on its cavitation morphology in seawater. *Materials Characterisation*, 47, 2001, pp.389 – 395
- [3] ALEXESCU, D., BORDEAȘU, I., OANCĂ, O., BACIU, I.: Studiul rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil martensitic cu 12% crom destinat fabricării paletelor de mașini hidraulice, A XI-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, Vol.20, Sebeș, 5-6 iunie-2011, ISSN2067-7138, 2011, pp.415-420
- [4] ANDERSON, C.: Automatizare și robotizare: avantaje și dezavantaje, "SOLD.INSP", 2000, nr. 8, p.11-18, 5 fig;
- [5] ANTON I.: Cavitația, vol. I, Editura Academiei RSR București, 1984
- [6] ANTON I.: Cavitația, vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985
- [7] BERCHICHE N., FRANC J.P., MICHEL J.M.: A Cavitation Erosion Model for Ductile Materials, *J.Fluids Engineering*, vol.124, 2002, pp. 601-606
- [8] BORDEAȘU I.: Cavitation Erosion of Materials, Timisoara Polytechnic Publishing House, ISBN:(10) 973-625-278-7;(13) 978-973-625-278-5, 2006
- [9] FRANK J.P., MICHEL J.M.: Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers-Dordrecht/Boston/London, 2004
- [10] FRANC J.P., ș.a.: La Cavitation, Mecanismes physiques et aspects industriels, Presse Universitaires de GRENOBLE, 1995
- [11] GARCIA R., HAMMITT F. G., NYSTROM R.E.: Corelation of cavitation damage with other material and fluid properties, *Erosion by Cavitation or Impingement*, ASTM, STP 408 Atlantic City, 1960
- [12] HASHEM – Al A, RIAD W.: The effects of duplex stainless microstructure on its cavitation morphology in seawater. *Materials Characterization*, Vol. 47, 2001, pp. 389 – 395
- [13] HEYMANN F. J.: Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion, *ASTM STP*, Vol.474, 1970, pp.212
- [14] 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
- [15] MITELEA I.: Știința materialelor, vol.I, Editura Politehnica, Timișoara, 2009
- [16] NOSKIEVIC J.: The extend mathematical model of cavitation and erosion wear, *Proc 6th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact*, Cambridge, 1983

[17] PARK M. C., KIM K.N., SHIN G. S., KIM S. J.: Effects of strain induced martensitic transformation on the cavitation erosion resistance and incubation time of Fe-Cr-Ni-C alloys. *Wear*, 274 – 275, 2012, pp.28 – 33

[18] PÎLAEV N.I., EDELI U.: Kavitatea v ghidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad, 1974

[19] SIMONEAU R, ș.a.: Cavitation erosion and deformation mechanisms of Ni and Co austenitic stainless steels, erosion by liquid and solid impact, Proceedings of ALSI-VII, Cambridge, 1987, pp.32.1-32.8

[20] STELLER, J., GIREN B.G.: International Cavitation Erosion Test. Final Report, Gdansk, ISSN 0239-9091, 2015

[21] THIRUVEGADAM A., PREECE: On testing materials for cavitation damage

[22] XIAO-YA Li, Y.-Y., ZHEN-MIN Xu, HIAN-GUO Li: Cavitation erosion behavior of nickel-aluminum bronze weldment. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol.13: 2003, pp.1317-1324

[23] ***, Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32-10, 2010

Webografie:

[24] ***, <http://www.inoxservice.hu/index.php/ro/rozsdamentesacel>