

# **COMPORTAREA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPLEX**

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

**Ing. Lavinia Mădălina Micu**

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. Cristian Predescu  
Prof.univ.dr.ing. Viorel-Aurel Șerban

Ziua susținerii tezei: 30.03.2017

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

Universitatea Politehnica Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 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

Eroziunea cavitațională, numită și cancerul mașinilor hidraulice, reprezintă efectul de distrugere a materialelor solide aflate în contact cu fluidul cavitant.

Prezenta teza „**Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex**” este o continuitate a cercetărilor în domeniul eroziunii și aduce elemente noi și originale privind efectul tratamentelor termice volumice, al tratamentelor termochimice de nitrurare în gaz și cu fascicul laser și al celui de acoperire cu straturi obținute prin pulverizare termică și retopire cu laser asupra comportării oțelului, astfel tratat, la distrugerea prin cavitația creată de aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

Sfaturile, colaborarea plăcută și sprijinul neconținut oferite, pe întreaga perioadă de elaborare a tezei, de conducătorii științifici dl. **Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea** și dl. **Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeasu**, m-au făcut să simt putere și încredere în ceea ce fac. Pentru susținerea permanentă și felul în care mi-au transmis cunoștințele profesionale din acest domeniu enigmatic al Ingineriei Materialelor și Ingineriei Mecanice, le mulțumesc!

Mulțumesc pe această calea și cadrelor didactice și personalului tehnic din cadrul Colectivelor de Ingineria Materialelor și Masini Hidraulice pentru sprijinul colegial și colaborarea profesională.

Mulțumesc familiei, colegilor din universitate, prietenilor și tuturor celor care m-au susținut și au fost alături de mine în această perioadă.

Sper ca această lucrare să fie de un real folos, ca material bibliografic și nu numai, celor care își desfășoară activitatea în domeniul cavitației, industriei românești, producătoare și exploatoare de echipamente hidromecanice.

Timișoara, martie 2017

Ing. Lavinia Mădălina Micu

Micu, Lavinia Mădălina

**COMPORTAREA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPLEX**

Teze de doctorat ale UPT, Seria 15, Nr. 21, Editura Politehnica, 2017, 144 pagini, 125 figuri, 13 tabele, 24 formule și relații.

ISSN: 2285-1720

ISSN-L: 2285-1720

ISBN: 978-606-35-0135-7

Cuvinte cheie: oțel inoxidabil Duplex, eroziune prin cavitație, aparat vibrator, curbe și parametrii specifici, microstructură, tratament volumic de călire cu punere în soluție, nitrurare, straturi ceramice.

Rezumat,

În cadrul lucrării de doctorat este cercetată comportarea și rezistența la cavitație a oțelului inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3, (50% A-50% F), supus la 3 tratamente termice volumice (3 regimuri de călire), tratamente termochimice de nitrurare în gaz și cu fascicul laser (3 regimuri) și de acoperire cu straturi obținute prin pulverizare termică și retopire cu laser (2 regimuri).

Scopul acestor cercetări îl reprezintă analiza influenței tipului de tratament asupra caracteristicilor mecanice și structurale, cu efect asupra comportării și rezistenței la eroziunea cavitațională. Această analiza este realizată pe baza curbelor și parametrilor caracteristici eroziunii cavitației, precum și pe baza analizelor microstructurale, realizate cu microscopia optică și electronică de înaltă performanță. Prin cercetarea realizată în cadrul tezei sunt aduse elemente noi, originale, față de cele realizate până acum în laboratorul din Universitatea Politehnica Timișoara, dar și de cele prezentate în literatura de specialitate. Întrucât, modelarea curbelor caracteristice a devenit un obiectiv pentru evaluarea comportării materialelor pe durata atacului cavitației, în cadrul tezei se oferă noi relații pentru curbele adâncimii medii de eroziune,  $MDE(t)$  și pentru viteza medie de pătrundere a eroziunii,  $MDER(t)$ , plecând de la formele stabilite de colectivul coordonat de Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeășu (2004) și forma curbei standard oferită de Thiruvengadam (1963).

## CUPRINS

<b>INTRODUCERE .....</b>	<b>7</b>
<b>1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPLEX .....</b>	<b>9</b>
1.1. Compoziția chimică, structura și proprietățile oțelurilor inoxidabile Duplex .....	9
1.2. Criterii de selecție a oțelurilor inoxidabile Duplex .....	12
1.3. Aplicații potențiale ale oțelurilor inoxidabile Duplex .....	13
1.4. Degradarea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex .....	16
1.5. Obiectivele tezei de doctorat .....	21
<b>2. MATERIALUL DE CERCETARE. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ .....</b>	<b>22</b>
2.1. Rolul elementelor de aliere în oțelurile inoxidabile Duplex .....	22
2.2. Caracterizarea succintă a oțelului cercetat .....	25
2.3. Concluzii .....	32
<b>3. TRATAMENTE TERMICE VOLUMICE ȘI REZISTENȚA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE .....</b>	<b>33</b>
3.1. Planul experimental .....	33
3.2. Examinări sclerometrice .....	34
3.3. Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație .....	34
3.4. Determinări de rugozitate a suprafețelor cavitate .....	44
3.5. Examinări metalografice .....	49
3.6. Analize de difracție cu raze X .....	57
3.7. Analize EDX .....	61
3.8. Concluzii .....	67
<b>4. DURIFICAREA SUPRAFEȚEI PRIN TRATAMENTE DE NITRURARE ȘI REZISTENȚA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE .....</b>	<b>68</b>
4.1. Nitrurarea în gaz .....	68
4.2. Rezultatele cercetării la cavitație .....	69
4.3. Rezultatele examinărilor sclerometrice și de rugozitate .....	72
4.4. Analize micrografice (MO + Topo + EDX) .....	74
4.5. Nitrurarea cu fascicul laser .....	79
4.6. Determinarea curbelor de cavitație .....	79
4.7. Rezultate privind microstructura și proprietățile mecanice .....	85
4.8. Evaluarea eficienței diferitelor tipuri de tratamente asupra rezistenței la cavitație .....	90
4.9. Concluzii .....	91
<b>5. EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A COMPOZITULUI DURIFICAT CU PARTICULE, WC-9Co-5Cr-1Ni, DEPUȘ PRIN TEHNICA HVOF PE SUBSTRAT DIN OȚEL INOXIDABIL DUPLEX .....</b>	<b>93</b>
5.1. Introducere .....	93
5.2. Pulberea utilizată și procedura experimentală .....	94
5.3. Evaluarea rezultatelor experimentale.....	96
5.4. Concluzii .....	106

<b>6. CONTRIBUȚII PRIVIND RELAȚIILE ANALITICE CE DEFINESC CURBELE CARACTERISTICE ALE EROZIUNII PRIN CAVITAȚIE .....</b>	<b>107</b>
6.1. Introducere .....	107
6.2. Modele pentru curbele caracteristice ale eroziunii cavitație .....	108
6.2.1. Modelul Thiruvengadam .....	108
6.2.2. Modelul Noskievici .....	109
6.2.3. Modelul Heymann F.J. ....	111
6.3. Modelul propus .....	112
6.3.1. Introducere .....	112
6.3.2. Stabilirea formelor matematice pentru curbele caracteristice de aproximare .....	112
6.3.3. Verificarea gradului de încredere .....	114
6.4. Concluzii .....	120
<b>7. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. NOI DIRECȚII DE CERCETARE .....</b>	<b>121</b>
<b>VALORIFICAREA PARȚIALĂ A REZULTATELOR CERCETĂRII .....</b>	<b>124</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>132</b>

## INTRODUCERE

Cea mai mare problemă pentru cercetătorii secolului XX a constituit-o corodarea în timp a metalelor și aliajelor metalice care intră în componența unor produse utilizate în diferite medii lichide. Prin studiile realizate cu cca. 100 de ani în urmă, de Henry Le Chatelier s-au obținut oțelurile inoxidabile, prin alierea oțelurilor cu o anumită cantitate de crom [160].

În multe cazuri, oțelurile inoxidabile austenitice clasice și cele care conțin Mo pot fi înlocuite cu succes de către oțelurile austenito - feritice (Duplex). Aceste materiale alternative oferă o excelentă rezistență la coroziune, caracteristici mecanice mai ridicate, tenacitate la încovoiere prin șoc, până la temperaturi de - 50 °C [110], [115], conducând la reducerea costurilor de fabricație. Datorită acestor avantaje, azi, oțelurile inoxidabile Duplex sunt tot mai des folosite în fabricarea pieselor din diverse utilaje și echipamente.

Pentru numeroase aplicații industriale, oțelurile inoxidabile Duplex reprezintă o alternativă interesantă, deoarece, ele combină o rezistență mecanică ridicată cu proprietăți superioare de rezistență la coroziune [90]. Din literatura parcursă și din discuțiile cu diverse firme producătoare s-a constatat că oțelurile inoxidabile Duplex sunt utilizate din ce în ce mai mult la fabricarea pieselor (rotoare de mașini hidraulice, elice navale, sertare ale aparatelor de comandă, distribuție și reglare din sistemele hidraulice de acționare) solicitate intens la eroziunea cavitațională; totodată, ele se folosesc la execuția unor instrumente și a unor echipamente din industria chimică, petrochimică, medicală, aerospațială și alimentară [170], [171], [172].

Utilizarea oțelurilor din clasa Duplex în industria construcțiilor arhitecturale a avut un impact important asupra designului structural, datorită potențialului enorm al acestora de a intra în componența structurilor ușoare.

Pentru găsirea de soluții de creștere a duratei de viață a unor astfel de echipamente, în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara, de peste 80 de ani sunt realizate cercetări pe diverse clase de oțeluri supuse celor mai noi tehnici de îmbunătățire a caracteristicilor ce măresc rezistența la eroziunea cavitației [5], [6], [17], [41], [76], [80], [124].

Studiile din cadrul programului de cercetare au fost orientate spre îmbunătățirea rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil austenito-feritic (Duplex - X2CrNiMnN22-5-3) prin aplicarea diverselor tratamente termice volumice și de suprafață.

Prin aplicarea unor tehnici de acoperire a suprafeței s-a estimat să se obțină un sistem compus strat - substrat care să răspundă favorabil exploatarei la solicitări oligociclice în medii cavitaționale.

Ținând cont și de noile orientări în domeniu, prin această lucrare de doctorat se va evidenția rolul și importanța tratamentelor menționate în asigurarea unei rezistențe sporite la eroziunea cavitațională a oțelului inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3.

În cadrul lucrării de doctorat este cercetat la cavitație oțelul inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3, (50% A-50% F), supus la 3 tratamente termice volumice (3 regimuri de călire), tratamente termochimice de nitrurare în gaz și cu fascicul

laser (3 regimuri) și de acoperire cu straturi obținute prin pulverizare termică și retopire cu laser (2 regimuri).

Scopul acestor cercetări îl reprezintă analiza influenței tipului de tratament asupra caracteristicilor mecanice și structurale, cu efect asupra comportării și rezistenței la eroziunea cavitațională, prin care se urmărește aducerea de noi elemente față de cele realizate până acum în laboratorul din Universitatea Politehnica Timișoara, dar și de cele prezentate în literatura de specialitate.



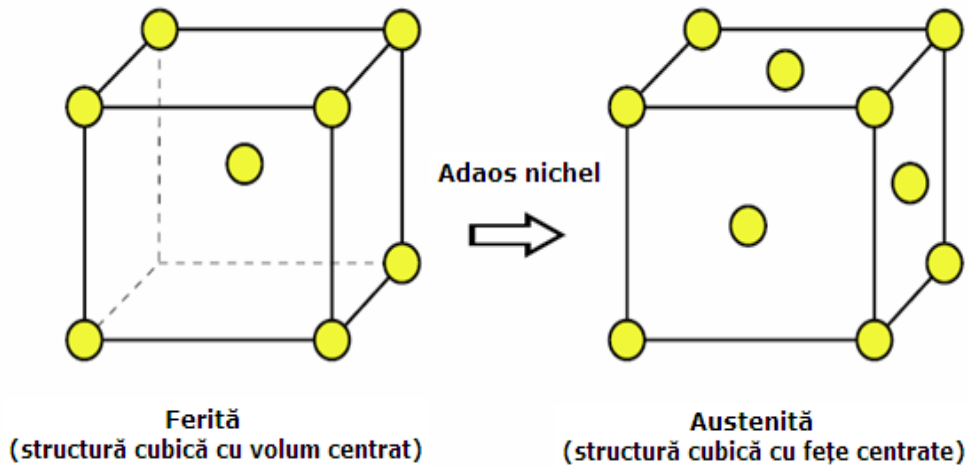
# 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPLEX

## 1.1. Compoziția chimică, structura și proprietățile oțelurilor inoxidabile Duplex

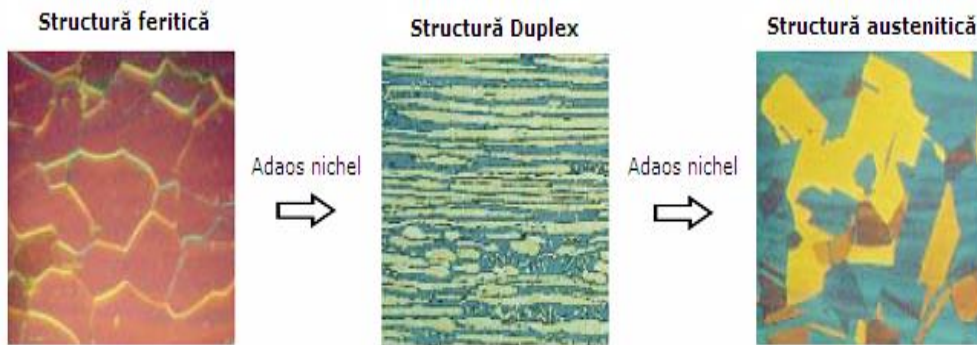
Oțelurile inoxidabile Duplex au în stare de echilibru o microstructură alcătuită din cca 50% ferită și 50% austenită, motiv pentru care mai sunt cunoscute sub numele de oțeluri inoxidabile ferito-austenitice sau austenito-feritice [33], [51], [87], [147]. Ele prezintă o mare stabilitate la coroziune 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). Conținutul în Ni (element scump) fiind inferior celui din oțelurile inoxidabile austenitice, justifică eficiența lor economică. Toate aceste proprietăți sunt superioare oțelurilor inoxidabile austenitice clasice (X5CrNi18-10 și X2CrNiMo17-12-2) [7], [71].

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 (fig. 1.1 și fig. 1.2). De asemenea, unele mărci conțin și alte elemente, cum ar fi Mn (element gamagen), Cu sau W. 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 [109], [117]. Aceasta este exprimată în mod uzual printr-un coeficient, Pitting Resistance Equivalent  $PRE_N = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16\%N$ , care este folosit pentru a clasifica materialele după rezistența la coroziune în puncte [110], [115], [124], [160]. De asemenea, 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.

În cea de-a doua generație de oțeluri inoxidabile Duplex, cromul participă în concentrații de peste 22% [158], [160], [170]. Însă, cu cât conținutul în crom este mai ridicat, cu atât rezistența la coroziune este mai bună, dar va crește probabilitatea de formare a unor faze intermetalice cu rol fragilizant.



**Fig. 1.1** Modificarea tipului de rețea cristalină prin aliere cu nichel [110]



**Fig. 1.2** Modificarea structurii microscopice prin aliere cu nichel [115]

Conform fig. 1.3 în care sunt redate diagramele de echilibru pseudo-binare Fe-Cr-Ni pentru 60% și 70% Fe, în cursul procesului de solidificare a oțelurilor Duplex se formează o microstructură aproape total feritică. Răcirea ulterioară provoacă transformarea feritei într-o austenită primară și secundară care este dispusă pe limitele grăunților fazei din care provine.

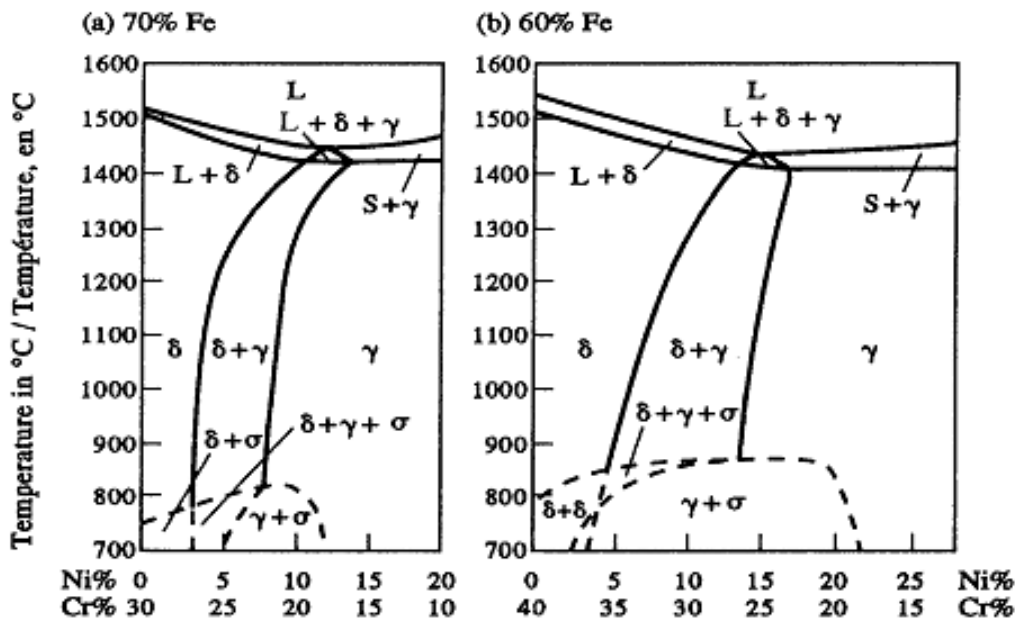


Fig. 1.3 Diagrame de echilibru pseudobinare Fe-Cr-Ni [115]

Proporția celor două faze (austenita, A și ferita, F), poate fi modificată în limite largi, în funcție de:

- conținutul în elemente de aliere;
- temperatura de încălzire pentru punere în soluție.

Totodată, aplicarea unor tratamente termice provoacă declanșarea următoarelor fenomene cu consecințe asupra schimbării microstructurii [115]:

- precipitarea carburilor de tipul  $M_{23}C_6$  și a nitrurilor de tipul  $Cr_2N$  pe interfața grăunților de ferită - austenită, fără consecințe privind coroziunea intercristalină;
- precipitarea ușoară a fazei  $\sigma$  (din ferită) în cursul încălzirii;
- durificarea prin recoacere la temperaturi cuprinse între 400 și 900 °C.

În multe cazuri, oțelurile inoxidabile austenitice care conțin Mo pot fi înlocuite cu succes de către oțelurile austenito - feritice (Duplex).

Ca soluție alternativă, aceste materiale oferă o excelentă rezistență la coroziune, caracteristici mecanice mai ridicate, tenacitate la încovoiere prin șoc până la temperaturi de -50 °C [154], [169], conducând la reducerea costurilor de fabricație.

În tabelul 1.1 sunt prezentate caracteristicile mecanice și de rezistență la coroziune ale unor mărci de oțeluri inoxidabile Duplex și super Duplex, comparativ cu unele oțeluri inoxidabile standard care conțin Mo.

**Tabel 1.1** Câteva caracteristici ale unor oțeluri inoxidabile [115], [160], [170], [172]

	Oțel inoxidabil standard	Oțel inoxidabil Duplex	Oțel inoxidabil standard	Oțel inoxidabil Duplex
Tipul	316L	2304 (1.4362)	317L, 316LN, 317LN	2205 (1.4462)
Elemente de aliere	17Cr, 11Ni, 2Mo	23Cr, 4Ni, 0,12Mo	18Cr, 15Ni, 3,5Mo 18Cr, 13Ni, 2,7Mo, 0,15N 17Cr, 13Ni 4,5Mo, 0,15N	22Cr 5Ni 3Mo 0,15N
PRE <sub>N</sub>	24	26	28 - 31	32 - 35
R <sub>p0,2</sub> min.	210 MPa	400 MPa	210 - 290	450 MPa
R <sub>m</sub> , min.	515 MPa	650 MPa	515 - 590 MPa	680 a

## 1.2. Criterii de selecție a oțelurilor inoxidabile Duplex

Activitatea de selecție a unui anumit tip de oțel inoxidabil pentru realizarea unei piese, trebuie să aibă în vedere, în primul rând, rezistența acestuia la coroziune și apoi proprietățile sale mecanice și cele fizice. De asemenea, în funcție de destinație, mai pot fi luate în considerare alte caracteristici precum: rezistența la uzare, rezistența la temperaturi scăzute sau la temperaturi ridicate, conductivitatea termică, magnetismul, rezistența la oxidare, proprietățile tehnologice, etc. [70], [115], [160]. În materie de oțeluri inoxidabile Duplex este important să se țină cont de faptul că ele nu formează un grup omogen, ci o familie de mărci individuale cu anumite proprietăți. De aceea, este avantajos să se împartă oțelurile în grupe diferite, cu compoziții chimice și proprietăți bine definite. Gruparea lor se face în mod obișnuit pe baza PRE<sub>N</sub>, care indică rezistența la coroziune în puncte și pe baza compoziției chimice.

O valoare PRE<sub>N</sub> mai mare de 40 definește în mod uzual un oțel inoxidabil super Duplex. Exemple de mărci de oțeluri inoxidabile Duplex uzuale sunt date în tabelul 1.2 [45].

Se observă că familia lor este alcătuită din 4 grupe și anume:

1. oțel inoxidabil Duplex - cu 23% Cr - fără Mo și - PRE<sub>N</sub> = ~ 25;
2. oțel inoxidabil Duplex standard - cu 22% Cr și - PRE<sub>N</sub> = 30-36;
3. oțel inoxidabil Duplex - cu 25% Cr și 0 - 2,5% Cu și - PRE<sub>N</sub> = 32-40 ;
4. oțel inoxidabil super Duplex - cu 25% Cr și - PRE<sub>N</sub> =>40.

Un rol important în cunoașterea imediată de către utilizatori (dar și de producători) a mărcilor de oțeluri inoxidabile, îl reprezintă simbolizarea acestora, reglementată prin diferite standarde. În documentațiile tehnice ale diferitelor categorii sau clase de oțeluri, simbolizările sunt conforme cu standardul românesc STAS, standardul francez AFNOR, standardul german DIN, standardul englezesc BS, standardul EURONORM și standardul american AISI. [160], [170], [171], [172], așa cum

rezultă din tabelele 1.2 și 1.3. În România oțelurile inoxidabile Duplex și super Duplex sunt cuprinse și descrise în SR EN 10088.

**Tabel 1.2** Mărci de oțeluri inoxidabile Duplex și super Duplex [172]

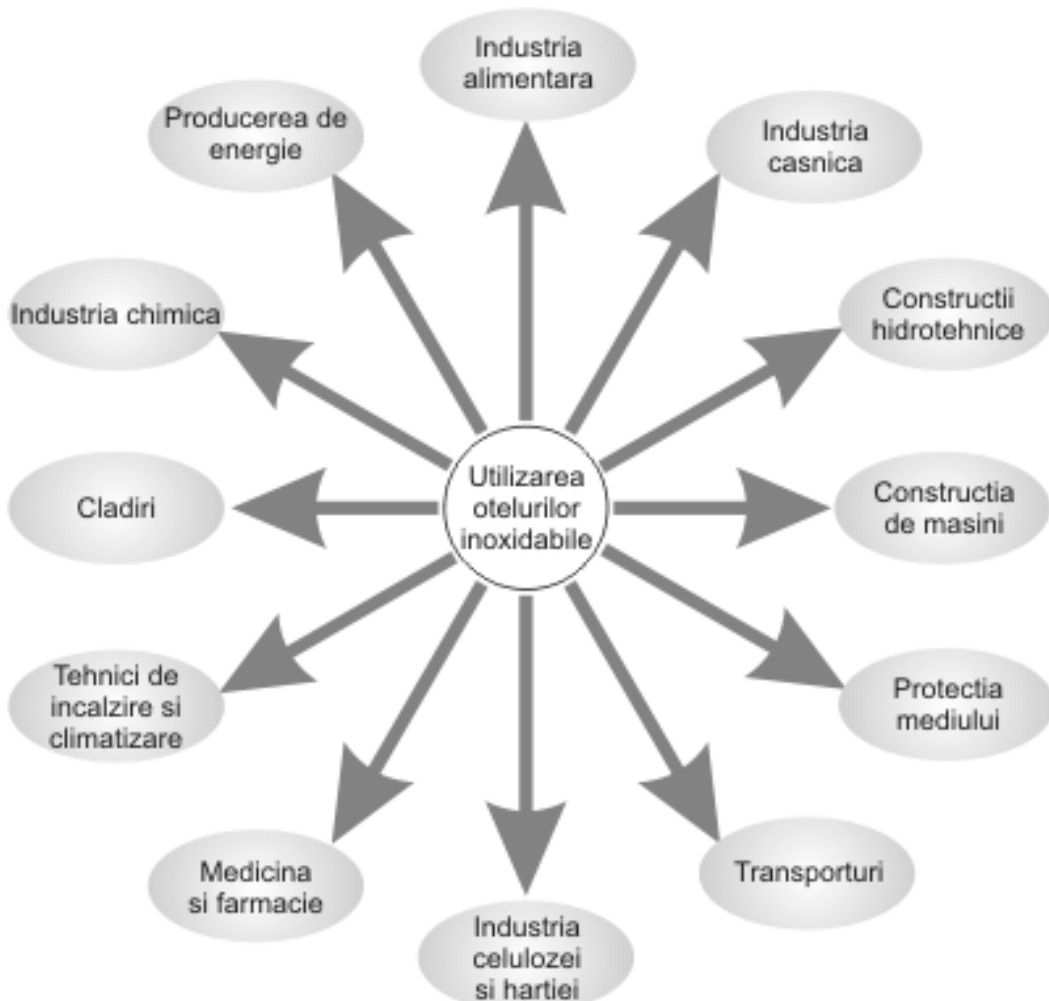
Standarde	Simbolizarea oțelului (Mărci)
ASME - ASTM SA 240	- UNS S 32304 / S 39230 - UNS S 31803 / S 39205 - UNS S 32550 / S 39253 - UNS S 32750 / S 39275 - UNS S 32760 / S 39276
EN 10088	- X 2 Cr Ni N 23-4 (1.4362) - X 2 Cr Ni Mo N 22-5-3 (1.4462) - X 2 Cr Ni Mo Cu N 25-6-3 (1.4507) - X 2 Cr Ni Mo N 25-7-4 (1.4410) - X 2 Cr Ni Mo Cu W N 25-7-4 (1.4501)

**Tabel 1.3** Compoziția chimică a unor mărci de oțeluri inoxidabile Duplex și Super Duplex [171]

Simbolizarea oțelului		%										
Alfanumerică	Numerică	C max	Si max	Mn max	P max	S max	N	Cr	Cu	Mo	Ni	W
X2CrNiN23-4	1.4362	0,03	1,00	2,00	0,035	0,015	0,05	22,00	0,10	0,10	3,50	
							...	...	...	...	...	
							0,20	24,00	0,60	0,60	5,50	
X2CrNiMoN2 2-5-3	1.4462	0,03	1,00	2,00	0,035	0,015	0,10	21,00		2,50	4,50	
							...	...		...	...	
							0,22	23,00		3,50	6,50	
X2CrNiMoCu N25-6-3	1.4507	0,03	0,70	2,00	0,035	0,015	0,15	24,00	1,00	2,70	5,50	
							...	...	...	...	...	
							0,30	26,00	2,50	4,00	7,50	
X2CrNiMoN2 5-7-4	1.4410	0,03	1,00	2,00	0,035	0,015	0,20	24,00		3,00	6,00	
							...	...		...	...	
							0,35	26,00		4,50	8,00	
X2CrNiMoCu WN25-7-4	1.4501	0,03	1,00	1,00	0,035	0,015	0,20	24,00	0,50	3,00	6,00	0,50
							...	...	...	...	...	...
							0,30	26,00	1,00	4,00	8,00	1,00

### 1.3. Aplicații potențiale ale oțelurilor inoxidabile Duplex

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 industriale (fig. 1.4) [90].



**Fig. 1.4** Domeniile de utilizare a oțelurilor inoxidabile [90]

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.);

Un domeniu important de utilizare a oțelurilor inoxidabile Duplex este *industria petrochimică* [160], [167], [172]. Spre exemplu, oțelul Duplex s-a folosit pentru înlocuirea unor serpentine ale reactorului, alcătuite dintr-o serie de țevi concentrice. În jurul țevilor circulă un produs condensat conținând cel puțin 10 ppm

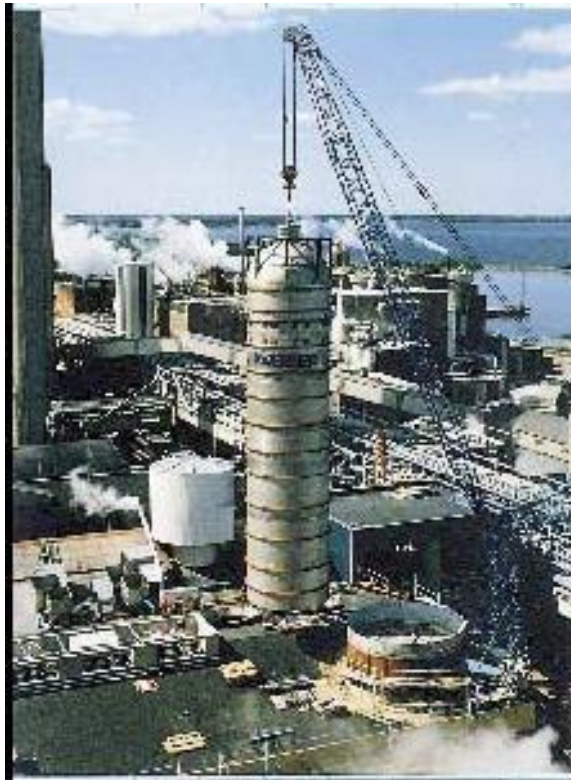
de ioni de clor. La proiectarea serpentinei s-au luat în considerare o presiune internă de 196 bari și o temperatură de 225 °C. În timpul funcționării, presiunea de lucru a fost de 150 bari iar temperatura a variat între 200 și 220 °C. Inițial aceste serpentine s-au realizat din oțel inoxidabil austenitic de tip AISI 316 (UNS S31603; 1.4435), cu un diametru nominal de 2 inch. În timpul fabricației, țevile au fost îndoite la rece, apoi tratate termic (călire pentru punere în soluție de la 1060 °C cu răcire în apă), după care au fost sudate, respectiv puse în exploatare. Durata de viață a serpentinelor realizate din oțel inoxidabil austenitic de tip AISI 316 a fost de numai cca. 1 an, după care s-a constatat subțierea grosimii pereților până la valoarea minimă admisibilă, în urma unui proces de coroziune-eroziune prin cavitație, ceea ce a determinat necesitatea înlocuirii țevilor. Serpentinele au fost înlocuite cu țevi din oțel inoxidabil Duplex standard de tip 22Cr-5Ni-3Mo (UNS S31803; 1.4462). Exploatarea în condiții industriale a demonstrat superioritatea netă a acestui tip de oțel, obținându-se viteze de coroziune mult mai mici. Astfel, s-a constatat că, deși peretele țevilor din oțel Duplex a fost mai subțire (aceasta a fost posibil deoarece oțelul Duplex are o limită de curgere mai ridicată) durata de viață a serpentinelor a crescut cu cel puțin 5 ani.

Un alt domeniu de aplicație a oțelurilor inoxidabile Duplex este în *industria de extracție a petrolului și anume*, la realizarea schimbătoarelor de căldură de pe platformele marine "offshore" utilizate la extracția gazelor naturale. Spre exemplu, întreprinderea franceză D'HONDT S.A. [160], [167], [171] construiește asemenea schimbătoare de căldură din oțel inoxidabil Duplex de mai bine de nouă ani, fiind specializată în concepția și construcția schimbătoarelor de căldură pe care astăzi le exportă în toată lumea pentru aplicații în diverse domenii industriale, ca industria petrolului, petrochimie, platforme de foraj marin "offshore", centrale electrice clasice și nucleare, siderurgie, etc.

În fig. 1.5 și 1.6 se exemplifică două aplicații în care fenomenul de cavitație provoacă degradarea în timp a materialului.



**Fig. 1.5** Nave marine, tip cisterne pentru transport substanțe chimice, din oțel 2205 (source: Krupp, Thyssen Nirosta)



**Fig. 1.6** Reactor presurizat (cu peroxid), din oțel 2205, Assi Domaen, Vallvik  
(source: Avesta Polarit)

#### **1.4. Degradarea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex**

Cavitația reprezintă un fenomen de discontinuitate macroscopică în masa unui lichid, apărută prin evoluția rapidă a unor nuclee (goluri) microscopice, în momentul în care starea de echilibru a acestora în lichid încetează. Prin urmare, cavitația presupune apariția și creșterea unor spații umplute cu vapori sau gaze într-un lichid [5], [6], [18].

Apariția bulelor cavitaționale în timpul funcționării mașinilor hidraulice și apoi surparea lor este un fenomen dăunător. Undele de șoc care apar în urma surpării cavitaționale conduc la distrugerea rapidă a diverselor părți metalice ale mașinii, efect cunoscut de altfel sub numele de *eroziune cavitațională* [5], [6], [19], [48], [80].

Înrăutățirea caracteristicilor energetice, ca rezultat al prezenței golurilor cavitaționale și reducerea duratei de funcționare a mașinilor afectate, justifică cercetările intense ce se desfășoară azi în laboratoarele cele mai variate pentru cunoașterea și înlăturarea sau cel puțin atenuarea acestui fenomen extrem de dăunător [19], [64], [65], [80].

Studiul apariției și dezvoltării bulelor de vapori și a fenomenului de eroziune cavitațională este deosebit de interesant, iar numărul tot mai mare de cercetători



care se ocupă cu acest domeniu explică și preocupările din ultimii ani în această direcție a specialiștilor Laboratorului de Cavitație din cadrul Facultății de Mecanică a Universității Politehnica Timișoara.

În toate domeniile, efectele cavitației sunt multiple:

- distrugerea materialului cu formarea frontierei solide. La baza acestui efect de eroziune cavitațională stă impactul dintre undele de șoc și microjeturile ce apar la implozia bulelor cavitaționale care generează presiuni ridicate pentru suprafețe foarte mici, într-un timp foarte scurt. Aspectul suprafeței erodate apare spongios [145], [158], [164];
- oscilația mediului lichid și a structurii metalice care închide lichidul aflat în cavitație. Oscilația bulelor cu frecvențe mici generează forțe periodice ce excită diferit componentele aflate în mișcare de rotație ale mașinilor hidraulice, generând funcția vibratoare de tipul rezonanță. Aceasta conduce la distrugerea lagărelor și componentelor de susținere a arborilor și rotorilor, care uneori pot scoate din funcțiune mașinile [79], [80], [95], [96];
- scăderea bruscă și apreciabilă a randamentului mașinilor hidraulice;
- modificarea structurală fundamentală a câmpului hidrodinamic datorită prezenței bulelor cavitaționale, mai ales în cazul curgerilor multifazice, care modifică rezistența hidraulică întâmpinată de curentul de lichid, ceea ce conduce la o scădere nepermisă a randamentului mașinii [46], [47], [48], [67].

Efectul cel mai nefast al cavitației îl reprezintă totuși, distrugerea prin eroziune a materialului pieselor aflate în câmpul cavitațional.

Deși studierea acestui fenomen, practic, a început încă din anul 1875, odată cu primele observații ale italianului Bartello, realizate pe elicele navelor Mauritania și Luisitania, nici până azi nu s-a reușit elucidarea cauzelor ce îl generează sau găsirea unor materiale perfect rezistente la distrugerea produsă de microjeturile și undele de șoc rezultate în urma imploziei bulelor cavitaționale. Din acest motiv, eroziunea materialelor prin cavitație continuă să rămână o permanentă preocupare a oamenilor de știință, majoritatea cercetărilor realizate în laborator și pe instalațiile industriale fiind orientate spre analiza factorilor ce influențează comportamentul și rezistența la eroziunea cavitației (constituția structurală, compoziția chimică, tehnologia de elaborare a semifabricatului, tratamentele termice, termochimice și mecanice, etc.) și utilizarea de alte tehnici, specifice Ingineriei suprafețelor.

În vederea procesului de selecție a materialului adecvat pentru componentele hidraulice, Espitia și Toro [46] au studiat rezistența la cavitație, microstructura și topografia suprafeței pentru mai multe materiale. Proprietățile materialului supus eroziunii prin cavitație pot fi influențate de o varietate de factori legați de particularitățile microstructurale, așa cum a arătat Park și colab. [126], care au pus în evidență efectele transformării martensitice induse prin deformare asupra timpului de incubație și a rezistenței la eroziune prin cavitație a aliajelor Fe-Cr-Ni-C.

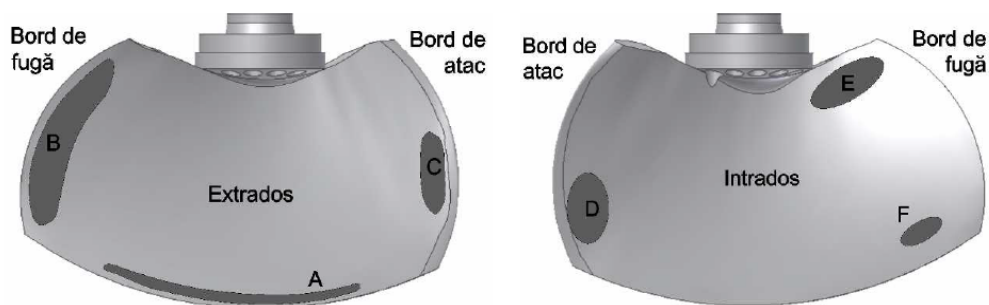
Pentru reducerea degradării prin cavitație a suprafeței materialelor au fost încercate diverse variante tehnologice. De exemplu, Mesa [98] a obținut o îmbunătățire a rezistenței la cavitație a unor oțeluri inoxidabile prin tratamente Duplex. Lo [94] a încercat alierea laser a oțelului inoxidabil AISI 316 cu pulberi fine din carbura de wolfram.

Krella și Czyniecki [89] și Chiu [34] au studiat efectul depunerii nitrurii de titan, TiN, pe substrat din oțel inoxidabil, asupra măririi rezistenței la cavitație. Garcia și colab. [51] au analizat comportarea la cavitație a oțelurilor inoxidabile

Duplex în soluții apoase de LiBr, iar Aribó și colab. [7], în soluții apoase de 3,5% NaCl. Hwang și Park [72] au observat că tratamentele termice influențează atât raportul cantitativ al celor două faze, austenita și ferita, cât și rezistența la coroziune a oțelurilor inoxidabile Duplex. Deși rezistența la eroziune prin cavitație este o caracteristică importantă pentru industriile menționate anterior, sunt cunoscute doar puține și contradictorii rezultate care privesc oțelurile inoxidabile Duplex. Astfel, Al-Hashem și colab.[2] au concluzionat că la oțelurile inoxidabile Duplex turnate în piese, realizarea unei protecții catodice descrește ușor numărul de cavități în timpul procesului de eroziune prin cavitație. Pe de altă parte, Karimi [81] arată ca viteza de eroziune rămâne constantă pentru un proces dat de cavitație, afirmație care vine în contradicție cu alte referiri din literatură. Escobar și colab.[46] au obținut o îmbunătățire a rezistenței la eroziune prin cavitație în urma procesării prin frecare cu arc rotitor. Mai mulți factori influențează comportarea la cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex, cum sunt: temperatura și viteza de deformare, considerații de Pulino – Sagradi și colab. [137], sau microstructura, analizată de Al-Hashem și Riad într-un studiu privind morfologia cavității în apa de mare [2].

În imaginile de mai jos sunt exemplificate degradările realizate pe palete și rotoare de turbine și pompe hidraulice, precum și cele apărute la elicele navale.

Astfel fig. 1.7 arată zonele de pe paletele de turbine Kaplan, frecvent erodate de cavitație, care necesită remedieri, după circa 8000 ore de funcționare [8], [17].



**Fig. 1.7** Paleta de turbine Kaplan, cu zonele cele mai afectate de eroziunea cavitației [8]

Imaginile din această figură arată că zonele foarte mari sunt cele de pe extradosul paletei, pe bordul de atac și fugă, dar și la periferia paletei. Pentru eroziunile de la borduri, care sunt cauzate de cavitație de profil [6], ele pot fi ușor diminuate, dar nu eliminate complet, prin îmbunătățirea formei bordului de fugă.

Eroziunea de la periferia paletei este specifică cavitației de rost și o soluție pentru că a fost implementată la paletele turbinelor de la Porțile de Fier I [34], prin introducerea unei nervuri schimbabile, care reduce eroziunea pe extradosul paletei, mărind astfel durata de viață a paletei, dar și care se distruge în timpul exploatării.

În fig. 1.8 și 1.9 sunt ilustrate un rotor de turbină Francis și o paletă de turbină Kaplan, ambele realizate dintr-un oțel aliat, cu eroziunile produse de cavitație și fotografiate la intrarea în reparație curentă [171], [172].



**Fig. 1.8** Rotorul Francis distrus prin eroziune cavitațională [171]



**Fig. 1.9** Paleta de rotor Kaplan distrusă prin eroziune cavitațională [172]

Dacă pentru rotorul din figura 1.8 nu mai există soluție de remediere, pentru paleta din figura 1.9 reparația poate fi realizată prin sudare. Creșterea duratei de viață a acestor piese de turbine hidraulice poate fi realizată prin tratamente termice volumice, acoperiri cu diverse pulberi ceramice și durificări ale stratului superficial prin metode noi ce implică utilizarea razei laser.

În figura 1.10 este prezentată imaginea zonei erodate de pe paleta turbinei Kaplan de la Porțile de Fier I, după circa 9000 ore de funcționare [17].



**Fig. 1.10** Detaliu al unei zone afectate de eroziunea cavitațională pe o paletă a rotorului de la Porțile de Fier I [17]

Realizarea din ultimii 60 de ani a rotoarelor și paletelor de turbine hidraulice din oțeluri inoxidabile cu structură martensitică a arătat că acestea au cea mai ridicată rezistență la cavitație. Problema mare a acestor oțeluri o reprezintă dificultatea de reparare [135]. Din acest motiv, cercetările ultimilor ani sunt orientate spre oțeluri inoxidabile, cum sunt cele Duplex, care, dincolo de proprietățile mecanice ridicate, au și disponibilitate pentru reparare prin sudare, și de creștere a rezistenței la impactul cu microjeturile și undele de șoc, prin utilizarea tehnicilor moderne de tratament [133], [134], [135].

La fel de distruse, rămân paletelile și rotoarele de pompe, în special ale celor care sunt utilizate în alimentările cu apă și la sistemele de irigații din agricultură [6]. Un astfel de rotor de pompă centrifugă este arătat în imaginea din fig. 1.11, realizat dintr-un oțel aliat [173].



**Fig. 1.11** Rotorul de pompă distrus prin eroziune cavitațională [173]

Deoarece transportul naval rămâne unul dintre domeniile de bază în dezvoltarea țărilor cu fluvii navigabile și cu ieșiri la mări și oceane, construcția de nave maritime și fluviale rămâne una din ramurile industriale cu mare avânt. Întru cât asigurarea transportului la timp depinde de viteza de propulsare a navei, constructorii și specialiștii au fost obligați să caute căi de creștere a duratei de viață a elicelor, care, așa cum se vede în imaginile din fig. 1.12 a,b, sunt puternic afectate de cavitație.



- a -



- b -

**Fig. 1.12** Elice navală: a - curentul cavitațional generat; b - degradarea prin cavitație [173]

În pas cu cercetările din domeniul cavitației și pentru materialele folosite la elicele navale sunt studiate efectele tehnicilor moderne de tratament de durificare asupra duratei de viață în apa oceanică cu diverse grade de salinitate și în apa fluvială [146].

Toate studiile realizate în laborator de către predecesori au demonstrat faptul că la oțeluri, adâncimea de pătrundere a eroziunii cavitaționale depinde în mare măsură de doi factori: hidrodinamica curgerii și natura materialului. Primul este determinat de oscilațiile vitezei și presiunii, care duc la formarea și surparea bulelor cavitaționale cu generarea de microjeturi și unde de șoc [47], [125]. Al doilea, prin structura și proprietățile mecanice constituie răspunsul la

impactul cu undele de șoc și microjeturi, reflectat în gradul de deteriorare, respectiv în rezistența la eroziunea cavitației [45], [47], [88], [93], [97], [136].

Deși rezistența la eroziunea prin cavitație reprezintă o caracteristică extrem de importantă pentru multe sisteme în industriile menționate anterior, există totuși puține cercetări privind performanțele oțelurilor inoxidabile Duplex în aceste condiții de exploatare, iar unele dintre acestea sunt contradictorii. Problemele centrale sunt legate de aprofundarea mecanismelor de propagare a fisurilor prin cavitație și de modalitățile de creștere a rezistenței la eroziunea cavitației [2], [53].

### 1.5. Obiectivele tezei de doctorat

Studiile efectuate în cadrul programului de cercetare au fost orientate către îmbunătățirea rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil Duplex, X2CrNiMoN22-5-3 prin aplicarea unor tratamente termice volumice și de suprafață.

Experimentele urmăresc găsirea unei corelații între starea structurală a materialului și viteza de degradare prin eroziune cavitațională, precum și optimizarea procesului tehnologic de prelucrare în vederea măririi duratei de viață a echipamentelor care lucrează în astfel de condiții.

Se estimează că prin aplicarea unor tehnici de acoperire a suprafeței să se obțină un sistem compus strat – substrat care să răspundă favorabil exploatarea la solicitări oligociclice în medii cavitaționale.

Având în vedere noile orientări în domeniu, prin această lucrare de doctorat se evidențiază rolul și importanța tratamentelor aplicate în asigurarea unei rezistențe sporite la eroziunea cavitațională a oțelului inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3.

**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.

**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.

## 2. MATERIALUL DE CERCETARE. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

### 2.1. Rolul elementelor de aliere în oțelurile inoxidabile Duplex

Recentele evoluții ale costurilor materiilor prime, în special a Ni au un impact semnificativ asupra oțelurilor inoxidabile austenitice X5CrNi18-10 (AISI 304) și X5CrNiMo17-12-2 (AISI 316). Pentru reducerea acestor costuri se încearcă înlocuirea acestor oțeluri austenitice cu oțeluri feritice. Acest lucru este însă posibil doar la piese cu secțiune relativ mică, a căror comportare la sudare nu este înrăutățită.

Pentru aprecierea corelației dintre compoziția chimică și microstructura oțelurilor inoxidabile se utilizează diagrama Schäffler (fig. 2.1) [115].

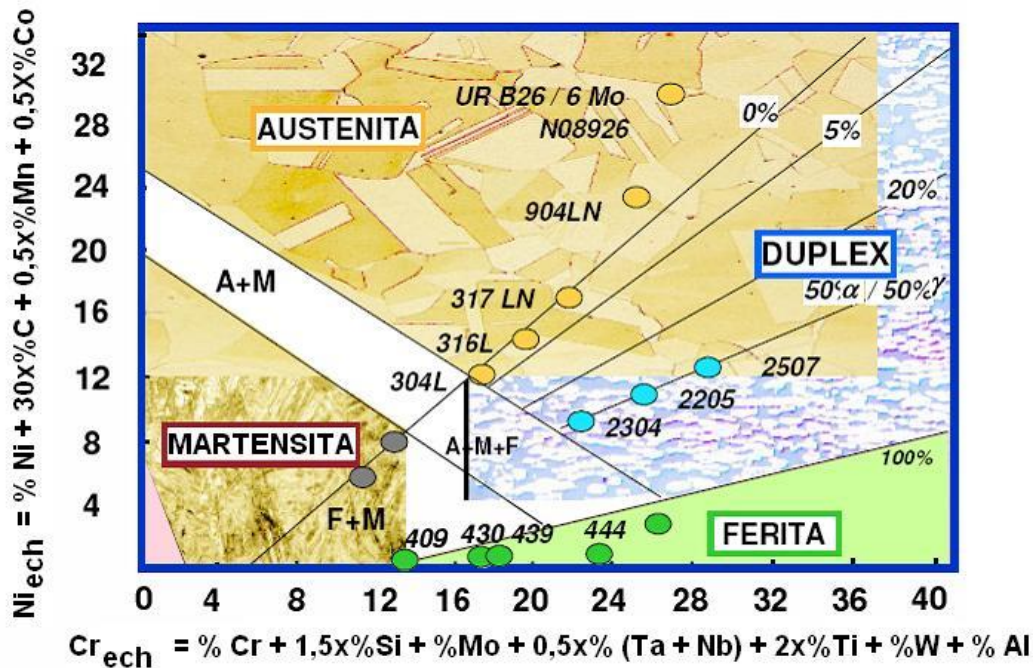


Fig. 2.1 Poziționarea unor oțeluri inoxidabile pe diagrama Schäffler [115]

Deși ea a fost construită pentru condițiile de cristalizare specifice sudării, s-a dovedit extrem de utilă pentru a ilustra cu suficientă aproximație domeniile de stabilitate ale diferitelor microstructuri caracteristice acestor oțeluri. Din fig. 2.1 se remarcă faptul că cele mai multe oțeluri inoxidabile Duplex au o microstructură constituită din cca. 50% ferită și 50% austenită.

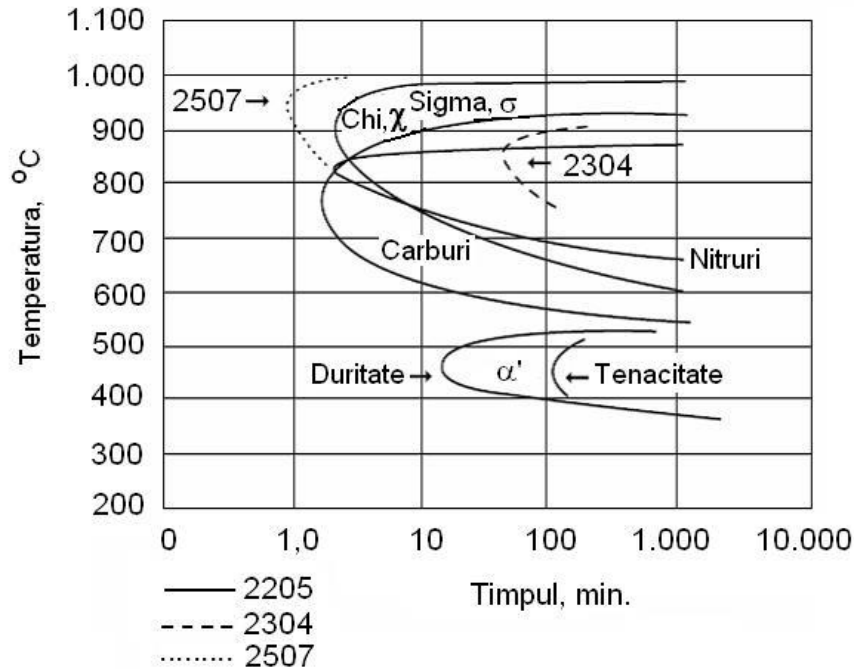
Interacțiunea principalelor elemente de aliere din compoziția chimică a oțelurilor inoxidabile Duplex este destul de complexă. Alături de obținerea unui

echilibru structural al celor două faze (F și A), trebuie evitată formarea de compuși intermetalici duri și fragili ( $\sigma$  și  $\chi$ ) care afectează tenacitatea și rezistența la coroziune. Prezența azotului ca element de aliere, întârzie semnificativ formarea acestora. O concentrație în Cr de peste 10,5% favorizează formarea unui film cu grosimea de 10 – 20 nm, numit film sau strat pasiv pe suprafața aliajului metalic, care face ca viteza de coroziune să fie neglijabilă. Dacă oțelurile inoxidabile austenitice conțin cel puțin 18% Cr, cele Duplex au peste 22% Cr. Acțiunea sa de stabilizare a fazei feritice este însoțită și de promovarea formării compușilor intermetalici.

Molibdenul este limitat la aproximativ 7,5% în oțelurile inoxidabile austenitice și la cca. 4% în oțelurile inoxidabile Duplex. Deși el mărește rezistența la coroziune locală, prin efectul de creștere a stabilității feritei favorizează precipitarea fazelor secundare cu rol dăunător asupra proprietăților de întrebuințare.

De aceea, prin aliere cu azot și cu nichel, elemente formatoare de austenită, pe de o parte se obține structura Duplex, iar pe de altă parte se compensează tendința de apariție a fazei sigma. Oțelurile inoxidabile feritice nu conțin Ni sau au un conținut redus în acest element. În schimb, oțelurile inoxidabile austenitice conțin cel puțin 8% Ni, iar cele Duplex au un conținut intermediar de Ni (4 – 7%). Deși eficacitatea Ni în întârzierea precipitării fazelor dăunătoare este mai redusă decât cea a azotului, el este indispensabil pentru obținerea austenitei. Utilizarea azotului ca element de aliere în aceste oțeluri inoxidabile provoacă separarea nitrurilor de Cr în interiorul și pe limitele grăunților de ferită, precum și pe limitele de separație dintre grăunții de ferită și de austenită.

În fig. 2.2 este redată diagrama TTP (temperatură – timp – precipitare) a oțelului Duplex 2205. Se poate observa că timpul minim de incubație a nitrurilor și carburilor de Cr la oțelul 2205 este ceva mai lung, de 1 – 2 min comparativ cu celelalte două mărci de oțel. Acest fapt se justifică în parte prin solubilitatea mai ridicată a carbonului și azotului în austenita cu un conținut mai scăzut în nichel și eventual prin efectul azotului de întârziere a precipitării carburilor. În ceea ce privesc fazele intermetalice  $\sigma$  și  $\chi$ , din fig. 2.2 rezultă că precipitarea lor se inițiază la temperaturi ușor mai ridicate, dar la durate de timp aproximativ egale cu cele ale nitrurilor și carburilor. Curbele marcate prin linii întrerupte în fig. 2.2 demonstrează că la mărcile de oțel inoxidabil Duplex cu un conținut mai înalt în Cr, Mo și Ni (oțelul 2507), timpul minim de incubație pentru fazele  $\sigma$  și  $\chi$  este mai redus, iar la cele cu un grad de aliere mai scăzut (oțel 2304) acesta este mai lung.



**Fig. 2.2** Diagrama TTP a oțelului inoxidabil Duplex 2205 călit de la 1050 °C (pentru comparare sunt intercalate două curbe pentru mărcile 2304 și 2507) [160]

În fine, fenomenul de fragilizare la 475 °C, datorat separării feritei într-o zonă feromagnetică bogată în fier și o zonă paramagnetică bogată în crom, se manifestă printr-o creștere de duritate după un timp minim de cca. 20 – 30 min și o scădere a tenacității după cca. 120 – 150 min (fig. 2.2).

Pe baza celor prezentate anterior în tabelul 2.1 se sintetizează intervalele de temperatură în care au loc reacțiile de precipitare și de transformare în acest oțel inoxidabil Duplex.

**Tabel 2.1** Oțel 2205 – reacții de precipitare și de transformare

Denumire	Temperatura, °C
Intervalul de solidificare	1445 - 1385
Călirea pentru punere în soluție	1020 - 1080
Formarea fazei $\sigma$	700 - 975
Precipitarea nitrurilor și a carburilor	450 - 800
Fragilizarea la 475 °C	350 - 525





Degradarea suprafeței probelor a fost realizată prin eroziunea cavitației, generată în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice [56], din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara (fig. 2.4).



**Fig. 2.4** Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

Pe toată durata cercetării, parametri funcționali ai aparatului au fost menținuți la valorile de proiectare și prescrise de normele ASTM G32 - 2010 [98]. Parametrii funcționali ai aparatului sunt:

- puterea instalată: 500 W;
- frecvența vibrațiilor: 20 kHz;
- amplitudinea vibrațiilor: 50  $\mu\text{m}$  +5%;
- tensiunea de alimentare: 220 V / 50 Hz;
- lichid de lucru: apă din rețeaua publică.

Înainte de începerea experimentului de cavitație, suprafețele de atac (frontale) au fost lustruite la o rugozitate  $R_a=0,2\div0,8 \mu\text{m}$ , cu aparatul din fig. 2.5.



**Fig. 2.5** Instalația **Buehler Phoenix Beta** pentru șlefuire – lustruire  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

Procedura de cercetare este cea descrisă de normele internaționale ASTM G32-2010 [34], [126], iar derularea etapelor de încercare, specifică laboratorului [33], [47] a constat în:

- cântărirea probei și înregistrarea masei inițiale (mai întâi la o balanță electronică (fig. 2.6) și apoi la una analitică de precizie (fig. 2.7));
- fixarea probei în sonotrodă prin înfiletare (fig. 2.8);
- fixarea sonotrodei în suportul aparatului vibrator și conectarea transductorului piezoceramic la sursa de curent (fig. 2.8 și fig. 2.9);
- imersarea probei în vasul cu lichidul de lucru (apa distilată sau potabilă de la rețea), pe o adâncime de 5-10 mm, fig. 2.9;
- fixarea duratei intermediare de atac a cavitației (5,10, respectiv 15 minute) și pornirea generatorului electronic de ultrasunete, simultan cu sistemul de recirculare a apei de răcire (fig. 2.9) din serpentina de cupru din vasul cu lichidul de lucru;
- după epuizarea fiecărei durate de timp alocată atacului cavitațional, proba a fost spălată în soluție de acetonă și uscată cu o suflanta, după care s-a cântărit la balanța electronică și la cea de precizie pentru a se determina masa erodată;
- după fiecare perioadă de testare, proba a fost fotografiată cu ajutorul aparatului foto – Canon PowerShot Sx200 IS, 12 x Optical Zoom, a cărui rezoluție permite suplimentar evidențierea extinderii distrugerilor pe suprafață (fig. 2.12 – 2.16) și mai puțin în profunzime și apoi analizată la microscopul optic.



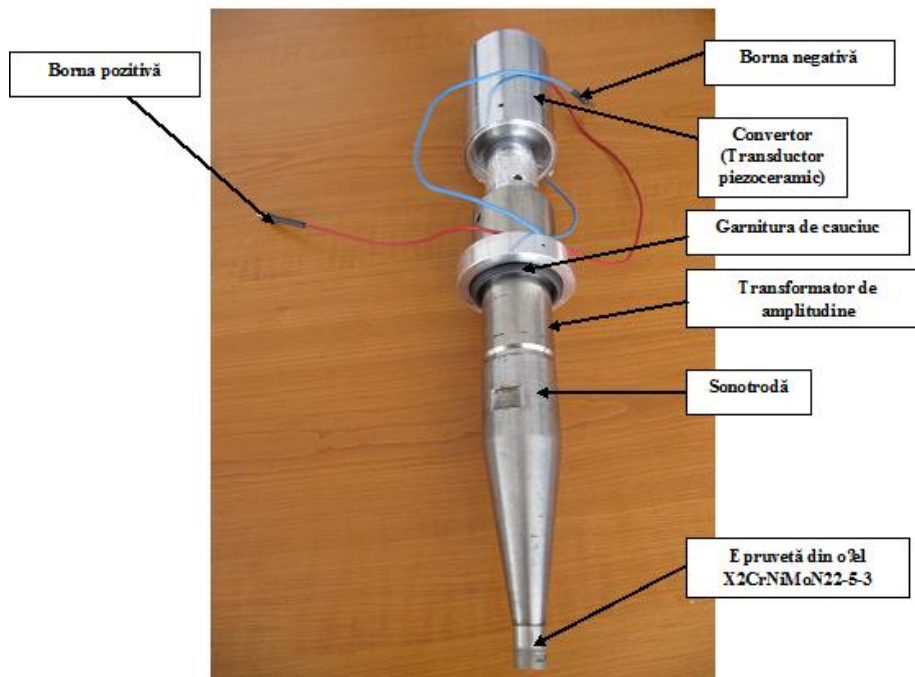
**Fig. 2.6** Balanță electronică cu patru zecimale



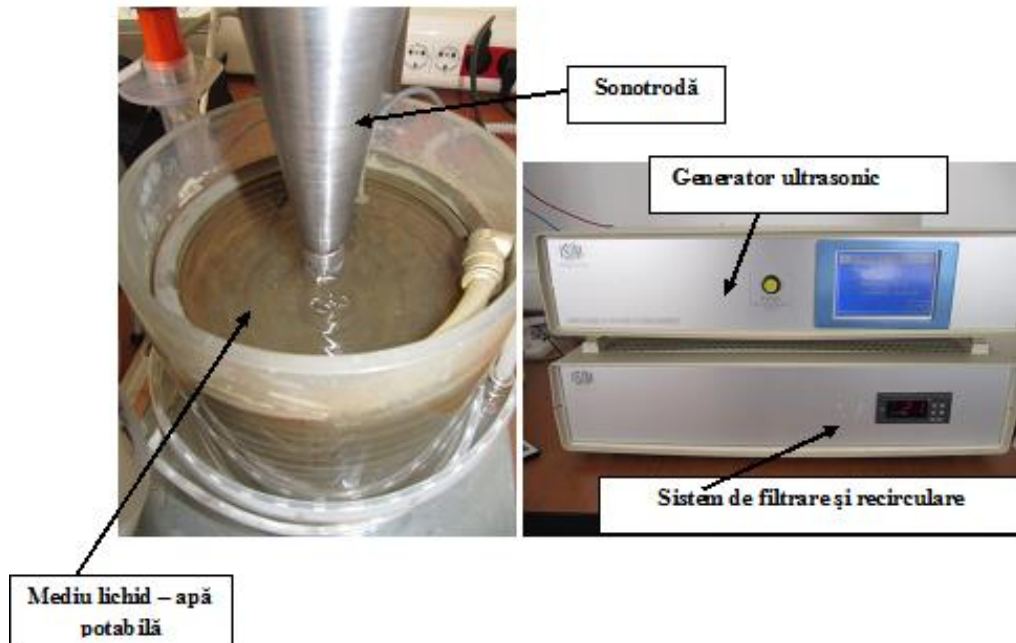
**Fig. 2.7** Balanța analitică de tip **Zařklady** **Mechaniki Precyzyjnej WP 1**

(foto: Lavinia Mădălina Micu)

Procedura de cercetare este cea descrisă de normele internaționale ASTM G32-2010 [34], [126], iar derularea etapelor de încercare, specifică laboratorului [33], [47] a constat în:



**Fig. 2.8** Ansamblul rezonator mecanic  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)



**Fig. 2.9** Epruveta în procesul cavitațional  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

Conform cutumei laboratorului, durata totală de atac cavitațional a fost de 165 minute, divizată în câte o perioadă de 5 și 10 minute și 10 perioade de 15 minute fiecare.

Atât la durate intermediare de atac cât și la finalul celor 165 min la o parte din suprafețele degradate s-a cercetat topografia suprafeței utilizând atât stereomicroscopul din fig. 2.10 cât și microscopul electronic cu baleiaj din fig. 2.11.

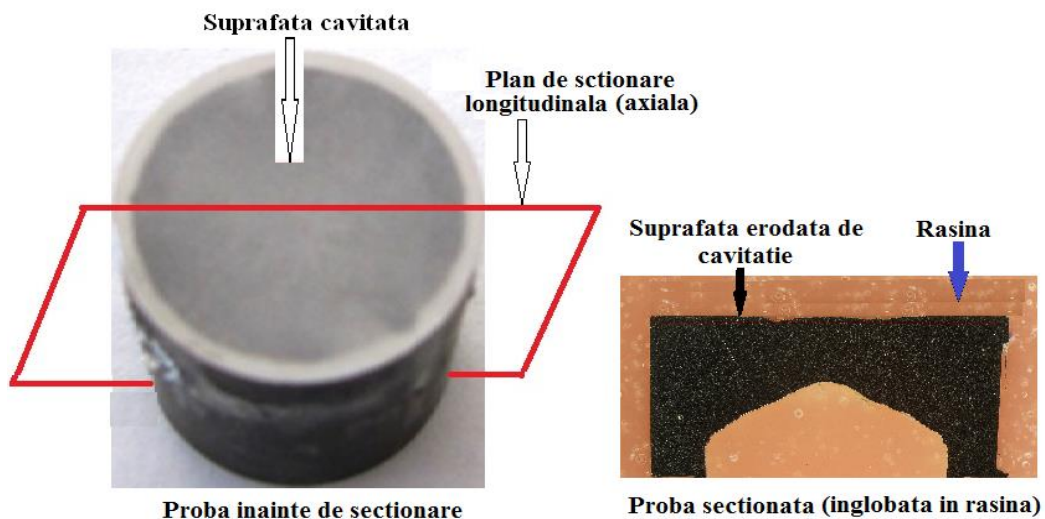
Ulterior, probele au fost secționare longitudinal (fig. 2.12) și pregătite metalografic în vederea examinării atât la microscopul optic (fig. 2.13) cât și la microscopul electronic cu baleiaj (fig. 2.11), a stratului marginal în care se amorsează și se propagă fisurile de eroziune prin cavitație.



**Fig. 2.10** Steromicroscopul optic **OPLIMPUS SYX7**  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)



**Fig. 2.11** Microscopul electronic cu baleiaj **TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax**  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)



**Fig. 2.12** Pregătirea probelor pentru analize la microscopul optic și electronic



**Fig. 2.13** Microscop optic Leica DM2700M  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

În fine, după cavitatea fiecărui set de câte trei probe, acestea au fost supuse determinărilor de duritate Vickers și măsurătorilor de rugozitate a suprafeței. Măsurătorile de rugozitate au fost realizate în cca. 10 puncte, pe suprafața fiecărei probe folosind aparatul Mitutoyo din figura 2.14.



**Fig. 2.14** Aparatul **Mitutoyo** pentru măsurarea rugozității  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

### 2.3. Concluzii

Predicția microstructurii oțelurilor inoxidabile Duplex în funcție de compoziția chimică poate fi realizată, cu suficientă aproximație, după modelul Schäffler.

Rolul elementelor de aliere din oțelurile inoxidabile Duplex vizează pe de o parte obținerea unui echilibru structural al celor două faze (F și A), iar pe de altă parte, evitarea formării de compuși intermetalici duri și fragili (Sigma  $\sigma$ , Chi  $\chi$ , nitruri  $\text{Cr}_2\text{N}$ , carburi,  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ , etc.) care afectează tenacitatea și rezistența la coroziune.



## 3. TRATAMENTE TERMICE VOLUMICE ȘI REZISTENȚA LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE

### 3.1. Planul experimental

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 (fig. 3.1). 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 (tabelul 3.1). Scopul urmărit a vizat efectul reacțiilor de transformare și de precipitare în stare solidă asupra rezistenței la eroziune prin cavitație.

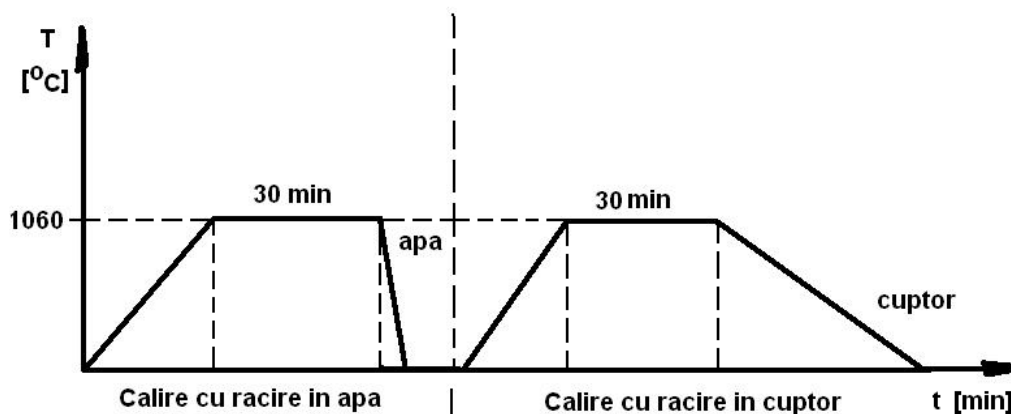


Fig. 3.1 Ciclograma tratamentului termic de călire pentru punere în soluție

Tabel 3.1 Istoria termică a probelor utilizate în experimente

	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

Înainte de începerea testelor de cavitație, suprafețele de atac (frontale) au fost lustruite la o rugozitate  $R_a=0,2\div0,8 \mu\text{m}$ .

După cavitatea fiecărui set de probe, acestea au fost supuse examenilor de duritate Vickers și măsurătorilor de rugozitate.

La sfârșitul testelor de cavitație, microstructura probelor și topografia suprafețelor au fost investigate prin microscopie optică și electronică, iar rezultatele obținute au fost discutate în funcție de tratamentul termic aplicat și de durata

atacului eroziv. Frația celor două faze, (58% austenită și 42% ferită), a fost stabilită prin analiza metalografică cantitativă a 10 imagini diferite. Pentru atacul metalografic al secțiunilor longitudinale prin probele cavitate s-a folosit reactivul Vilella (45 ml glicerina, 15 ml acid azotic, 30 ml acid clorhidric).

### 3.2. Examinări sclerometrice

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). Histograma valorilor de duritate este redată în fig. 3.2.

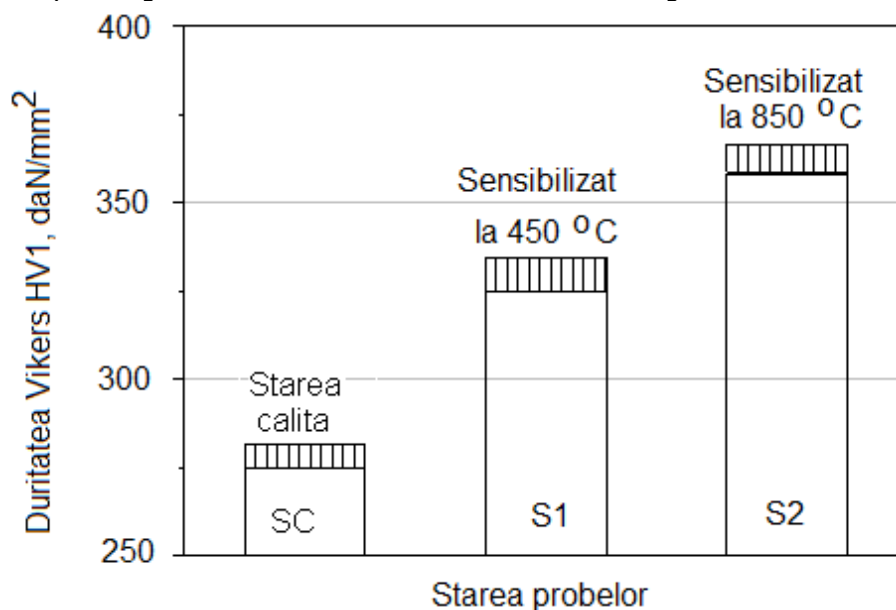


Fig. 3.2 Histograma durității în funcție de tratamentul termic aplicat

Conform datelor reprezentate în aceasta figură, 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. Este de așteptat ca aceste modificări de duritate să conducă la diferențe importante în privința comportării la eroziunea prin cavitație a acestui oțel.

### 3.3. Curbele specifice și parametrii caracteristici eroziunii prin cavitație

Testele de cavitație au fost realizate în conformitate cu metodologia prezentată în capitolul 2 al lucrării. Astfel, pe baza pierderilor masice  $\Delta m_i$ , înregistrate la finalul fiecărei perioade intermediare de testare, „i”, s-au determinat pierderile masice cumulate  $m$ , cu relația:

$$m = \sum_{i=1}^{12} \Delta m_i \quad (3.1)$$

În continuare, s-au determinat valorile experimentale pentru adâncimile medii de pătrundere a eroziunii MDE și vitezei acesteia MDER, cu relațiile:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, cumulată

$$MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{4 \cdot \Delta m_i \cdot 10^6}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) [\mu m] \quad (3.2)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii:

$$MDER_i = \frac{\Delta MDE_i}{\Delta t_i} \quad (3.3)$$

unde:

i - reprezintă perioada de testare;

$\Delta m_i$  - este masa de material, pierdută prin eroziune, în perioada i, în grame;

$\rho$  - densitatea oțelului, în grame/mm<sup>3</sup>;

$\Delta t_i$  - durata cavitației corespunzătoare perioade „i” (5 min, 10 min sau 15 min);

$d_p$  - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ( $d_p = 15,9$  mm - deoarece, diferența dintre diametrul suprafeței erodate efective și cea a suprafeței atacate este foarte mică, peste 90% din suprafață este erodată);

$\Delta MDE_i$  - valoarea adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, realizată prin cavitație în perioada  $\Delta t_i$ ,

Aproximarea valorilor experimentale este realizată prin curbe analitice construite cu relațiile stabilite pe baza modelului prezentat în [53].

Formele analitice ale relațiilor sunt:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii:

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) \quad (3.4)$$

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii:

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-B \cdot t} \quad (3.5)$$

unde:

A - este parametrul de scară, stabilit statistic pentru construirea curbei de aproximare, cu condiția ca abaterile punctelor experimentale față de această curbă să fie minime;

B - este parametrul de formă al curbei.

Utilizarea curbelor de aproximare 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 cate trei probe, s-a calculat valoarea medie a pierderilor masice, pentru fiecare perioadă intermediară de testare. In fig. 3.3, 3.7, 3.11 și

3.15 sunt redate graficele de variație în timp a acestora, iar în fig. 3.4, 3.8, 3.12 și 3.16 sunt prezentate curbele vitezelor de pierdere masice ale aceluiași probe.

Din analiza lor, se sesizează faptul că cele mai mici valori au fost înregistrate la probele tratate termic prin calire pentru punere în soluție urmată de recoacere pentru sensibilizare la 850 °C timp de 2 ore și răcire în aer.

Conform fig. 3.5, 3.9, 3.13 și 3.17 adâncimile medii cumulate de pătrundere a eroziunii se prezintă sub următoarele rapoarte:

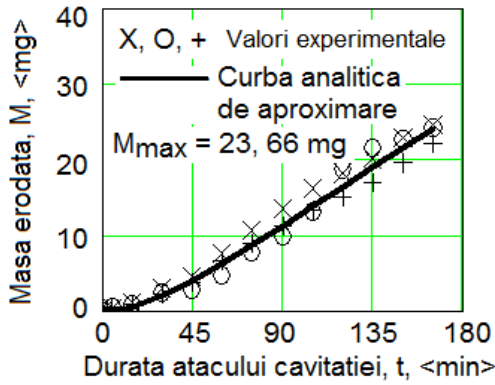
$$- \quad \frac{MDE_{\max(\text{aer})}}{MDE_{\max(\text{apa})}} = 0,84$$

$$- \quad \frac{MDE_{\max(\text{sensibilizare la } 475^{\circ}\text{C})}}{MDE_{\max(\text{sensibilizare la } 850^{\circ}\text{C})}} = 1,37$$

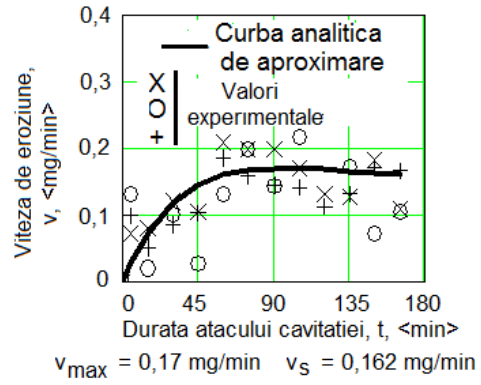
$$- \quad \frac{MDE_{\max(\text{aer})}}{MDE_{\max(\text{sensibilizare la } 850^{\circ}\text{C})}} = 1,11$$

$$- \quad \frac{MDE_{\max(\text{apa})}}{MDE_{\max(\text{sensibilizare la } 850^{\circ}\text{C})}} = 1,33$$

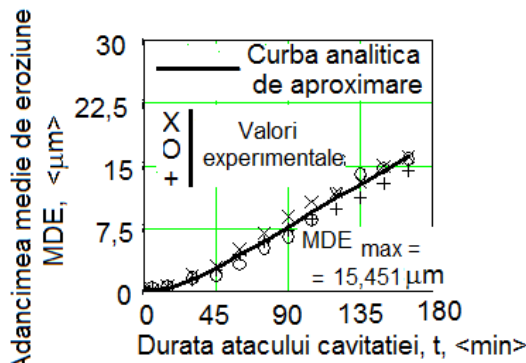
❖ **Primul set de probe: 1060 °C/30 min/cuptor**



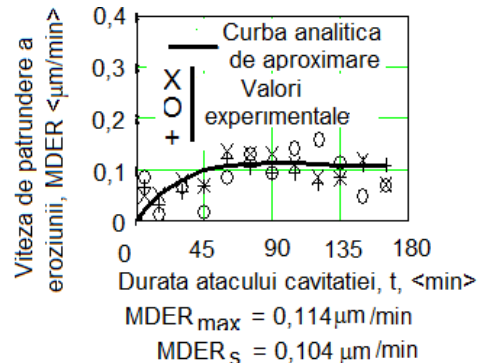
**Fig. 3.3** Curba pierderilor masice cumulate



**Fig. 3.4** Curba vitezei de pierderi masice



**Fig. 3.5** Curba adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii



**Fig. 3.6** Curba vitezei de pătrundere a eroziunii

❖ Al doilea set de probe: 1060 °C /30 min/apă

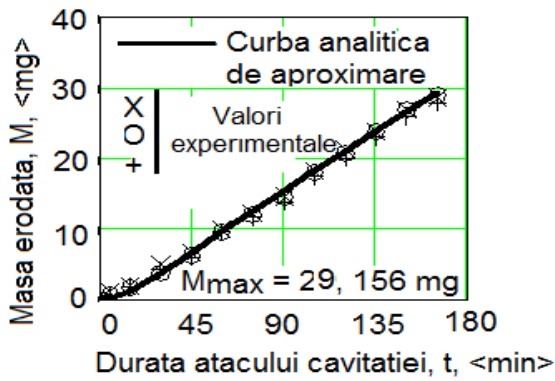


Fig. 3.7 Curba pierderilor masice cumulate

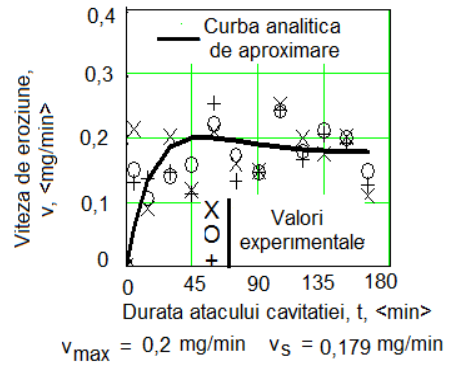


Fig. 3.8 Curba vitezei de pierderi masice

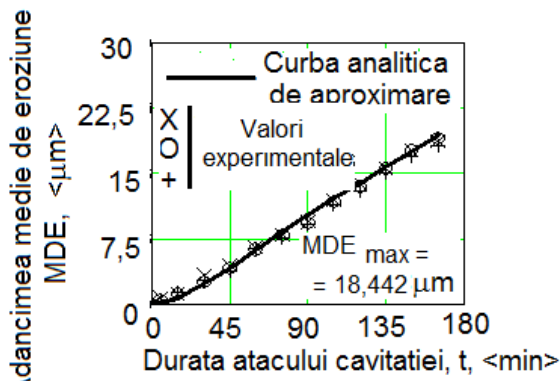


Fig. 3.9 Curba adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii

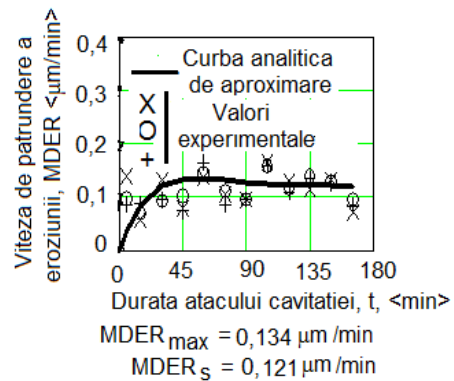


Fig. 3.10 Curba vitezei de ptrundere a eroziunii

❖ Al treilea set de probe: 1060 °C/30 min/apă + sensibilizare 475 °C/4 h/aer

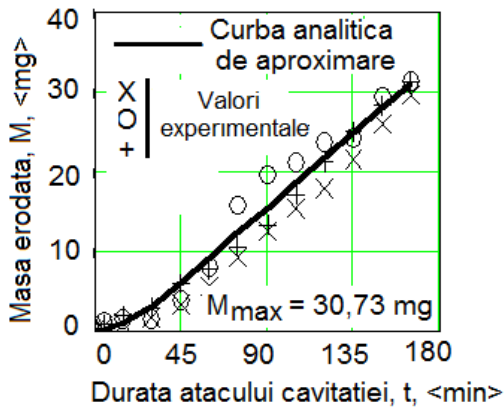


Fig. 3.11 Curba pierderilor masice cumulate

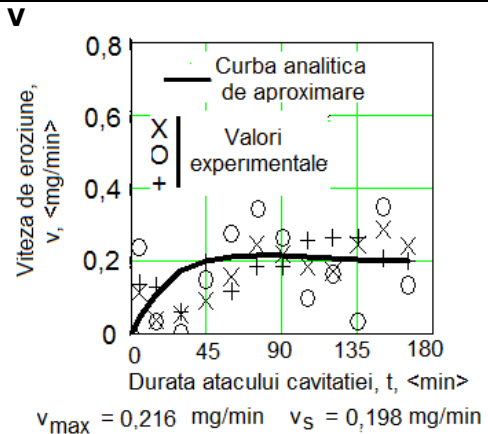


Fig. 3.12 Curba vitezei de pierderi masice

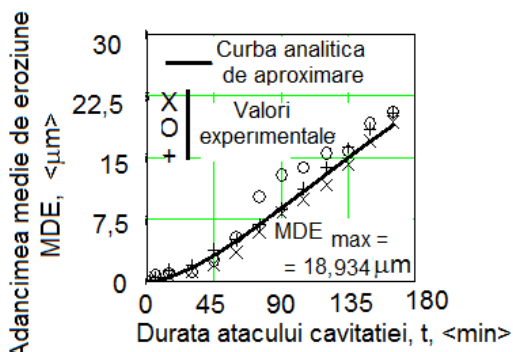


Fig. 3.13 Curba adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii

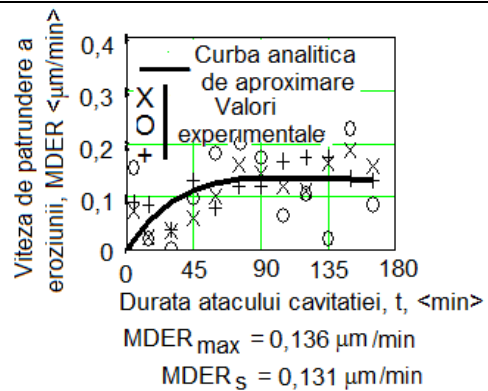
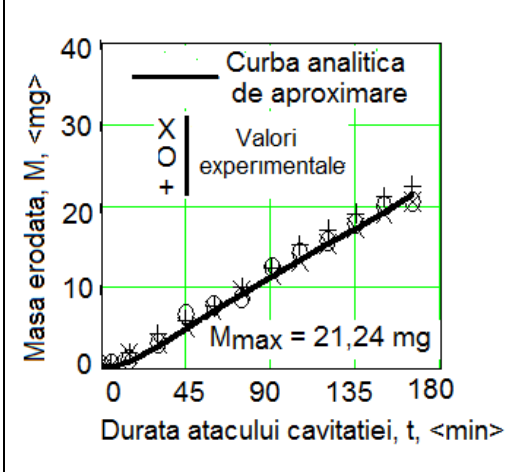
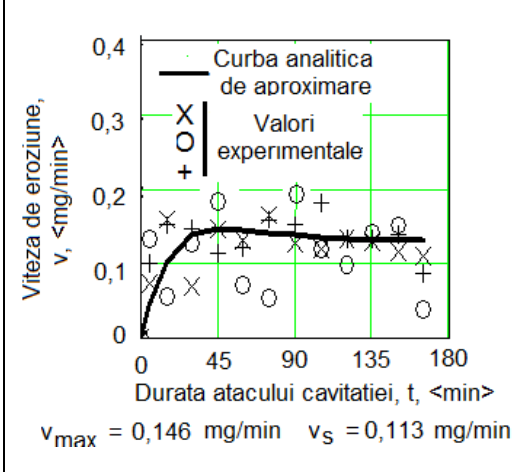


Fig. 3.14 Curba vitezei de pătrundere a eroziunii

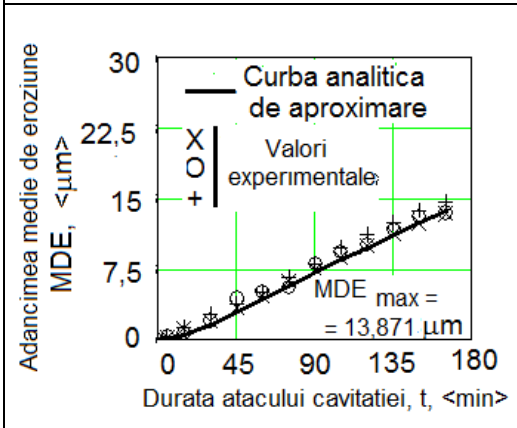
❖ Al patrulea set de probe: 1060°C/30 min/apă + sensibilizare 850°C/2 h/aer



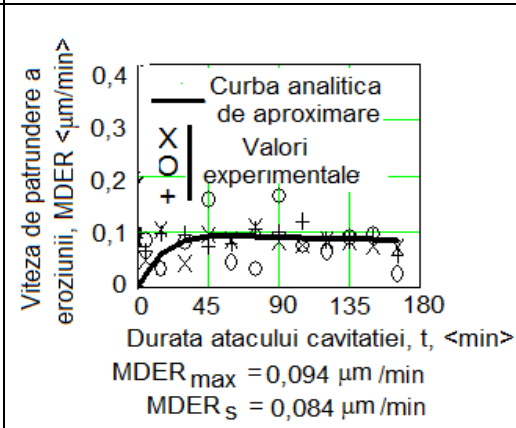
**Fig. 3.15** Curba pierderilor masice cumulate



**Fig. 3.16** Curba vitezei de pierderi masice



**Fig. 3.17** Curba adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii



**Fig. 3.18** Curba vitezei de pătrundere a eroziunii



Pentru evaluarea rezistenței la cavitație, în fig. 3.19...3.22 sunt comparate, pe baza curbelor specifice, valorile adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii MDE (fig. 3.19 și 3.21) și a vitezelor acestora, MDER (fig. 3.20 și 3.22) calculate cu relațiile (3.4) și (3.5).

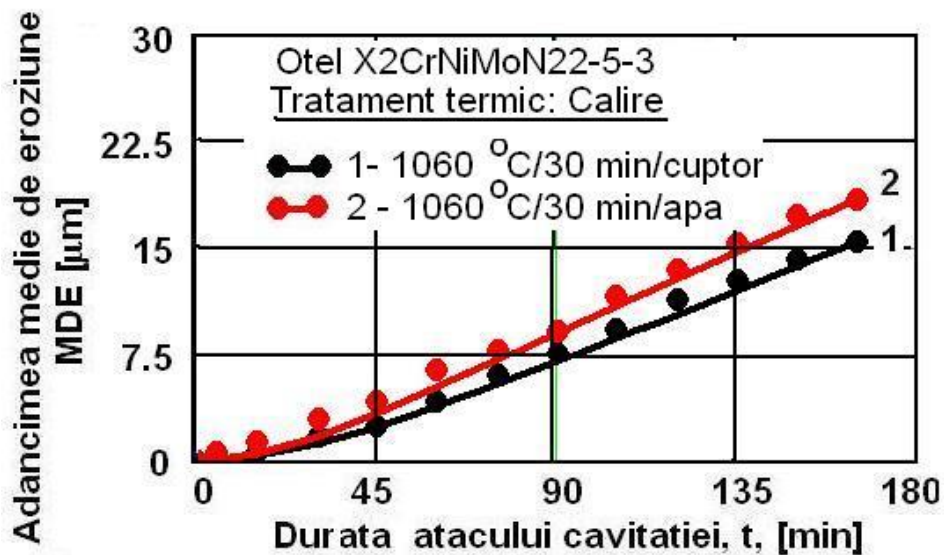


Fig. 3.19 Variația adâncimii de eroziune cu durata atacului cavitației

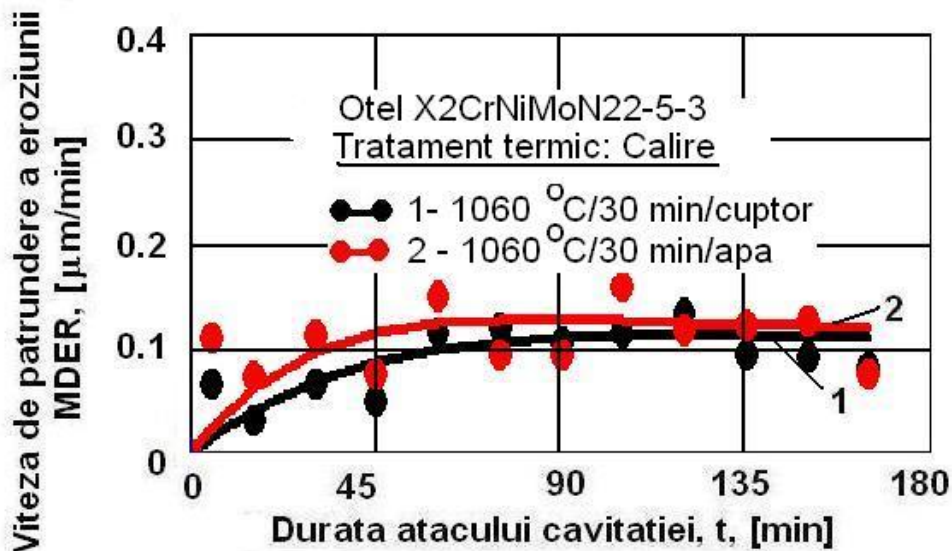
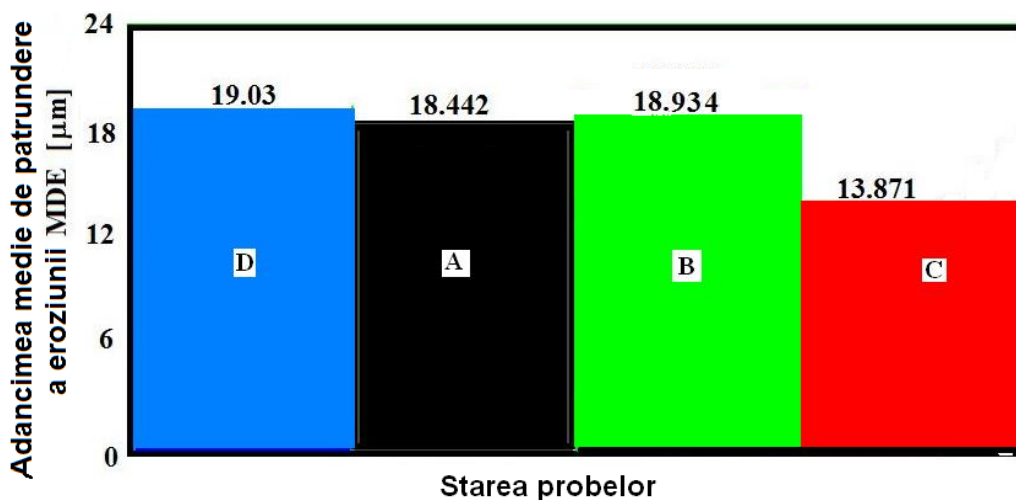


Fig. 3.20 Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației

Diagramele din fig. 3.19 și 3.20 pun în evidență diferențele de comportare la cavitație, date de modul de răcire al probelor (în cuptor și în apă). Din comparația curbelor adâncimilor medii de pătrundere (fig. 3.19), 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 (fig. 3.19 - după cca. 45 minute de atac), reflectată și de modul în care viteza tinde spre valoarea de stabilizare, fig. 3.20), 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).

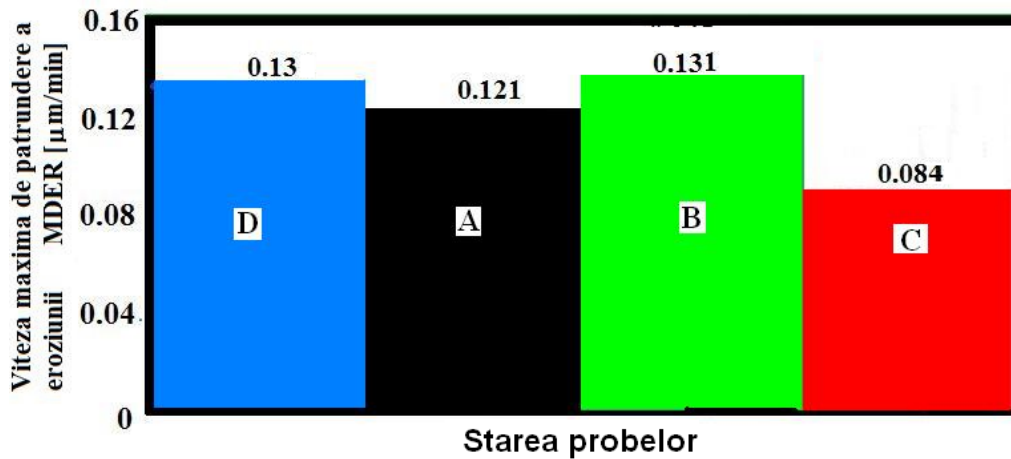
În fig. 3.21 și 3.22 sunt comparate rezistențele la cavitație ale oțelului analizat în cele patru stări de tratament aplicat, cu cea a oțelului 41Cr4, considerat ca etalon în cadrul laboratorului de cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

Cele mai favorabile valori ale celor doi parametri ce caracterizează rezistența la cavitație le prezintă starea structurală obținută prin calire pentru punere în soluție urmată de recoacere pentru sensibilizare la 850 °C. Atât adâncimea medie de pătrundere a eroziunii cât și viteza maximă de eroziune au cele mai defavorabile valori după tratamentul de recoacere la 475 °C.



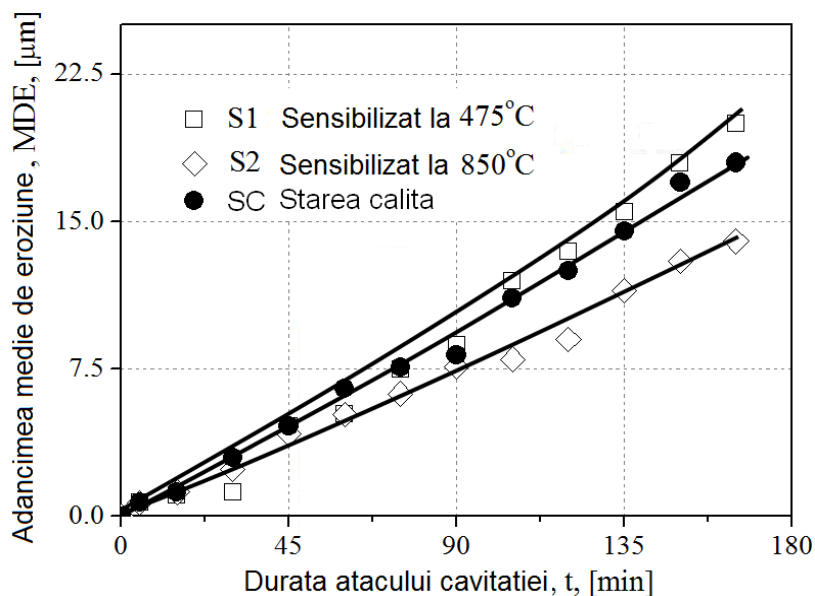
**Fig. 3.21** Comparație pe baza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, cumulată în 165 minute de atac:

- 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.

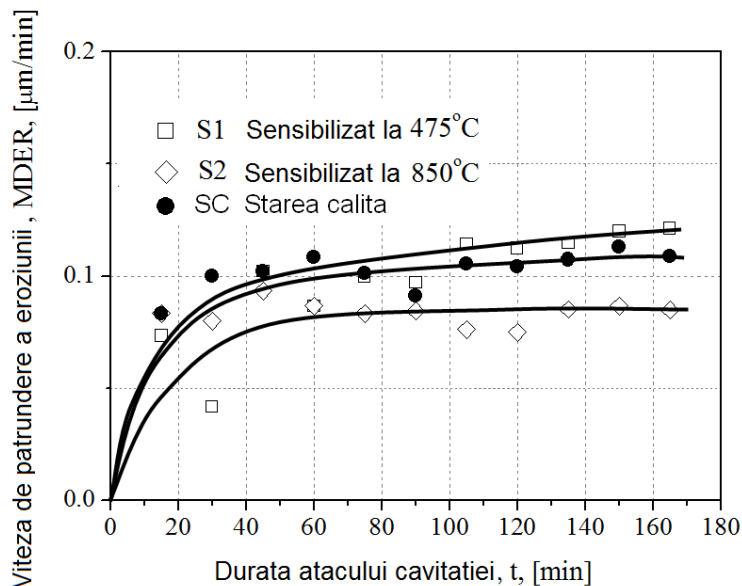


**Fig. 3.22** Comparație după viteza maximă de pătrundere a eroziunii prin cavitația vibratoare:  
**A** – Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060 °C /30 min/apă;  
**B** - Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060 °C /30 min/apă + sensibilizare 475 °C /4 h/ aer;  
**C** – Oțel inoxidabil Duplex X2CrNiMoN22-5-3 călit 1060 °C /30 min/apă + sensibilizare 850 °C /2 h/ aer;  
**D** – Oțel aliat pentru imbunatatire, 41Cr4, considerat ca etalon.

Efectele schimbărilor microstructurale, asupra curbelor de variație a adâncimii medii cumulate a eroziunii și a vitezei de pătrundere a acesteia cu durata de testare la cavitație sunt redată în fig. 3.23 și 3.24.



**Fig. 3.23** Variația adâncimii de eroziune cu durata atacului cavitației



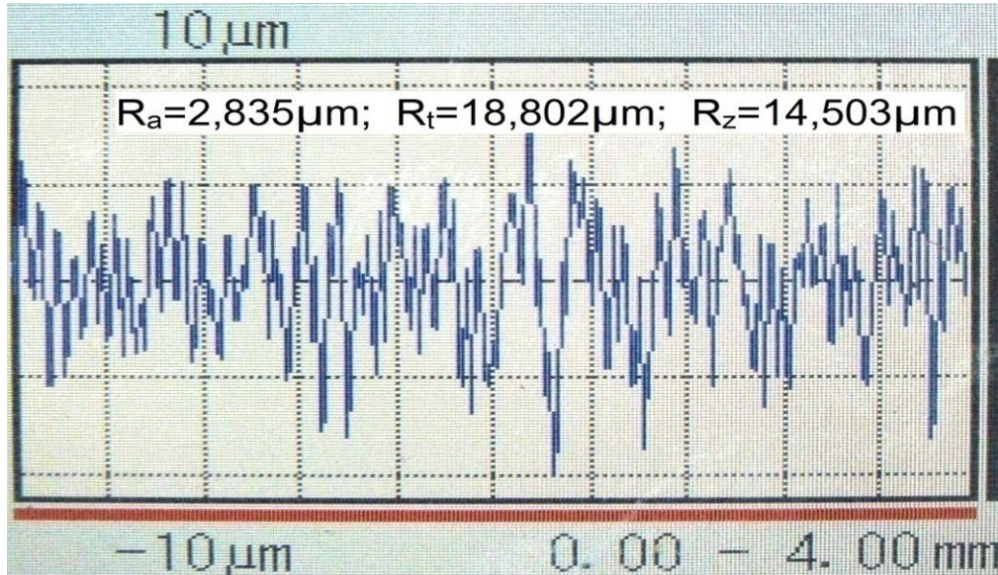
**Fig. 3.24** Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației

Dispersia datelor experimentale față de valorile teoretice indică influența microstructurii asupra atacului prin eroziunea cavitației pentru diferite valori ale timpului de expunere.

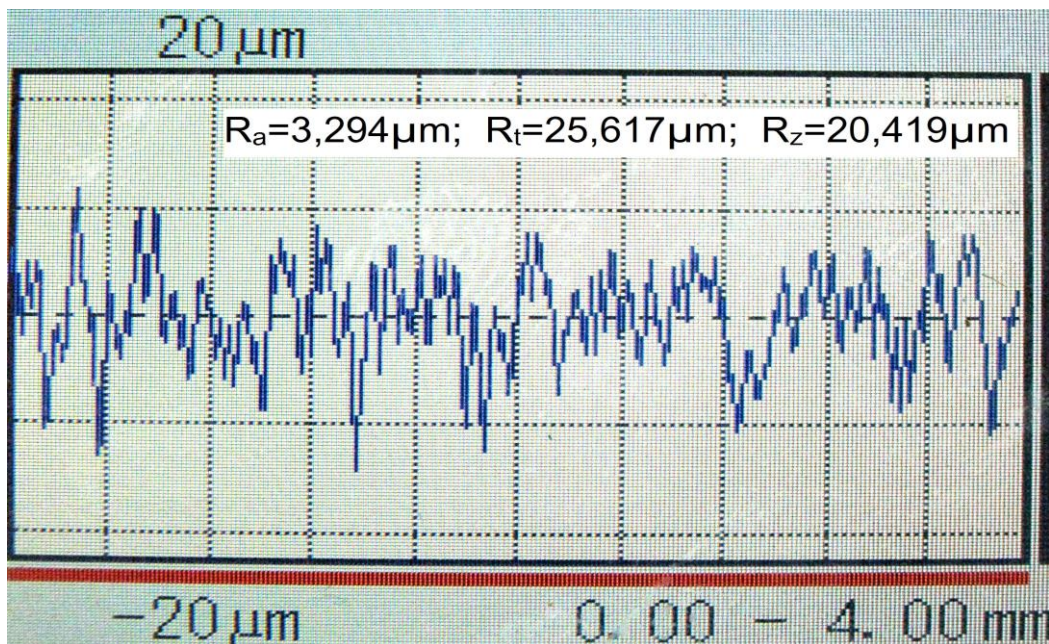
Comparativ cu starea structurală obținută prin călirea pentru punere în soluție se poate observa că, după 165 minute de atac al cavitației (fig. 3.7 și 3.8), prin aplicarea unei recoaceri pentru sensibilizare la 850 °C se obține o reducere cu cca. 11% a adâncimii maxime de eroziune și cu cca. 28% a vitezei 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,  $\alpha$ , respectiv bogate,  $\alpha'$  (cu rol fragilizant), în crom, înrăutățește rezistența la eroziune prin cavitație. Potrivit datelor reprezentate în fig. 3.23 și 3.24 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 [54].

### 3.4. Determinări de rugozitate a suprafețelor cavitate

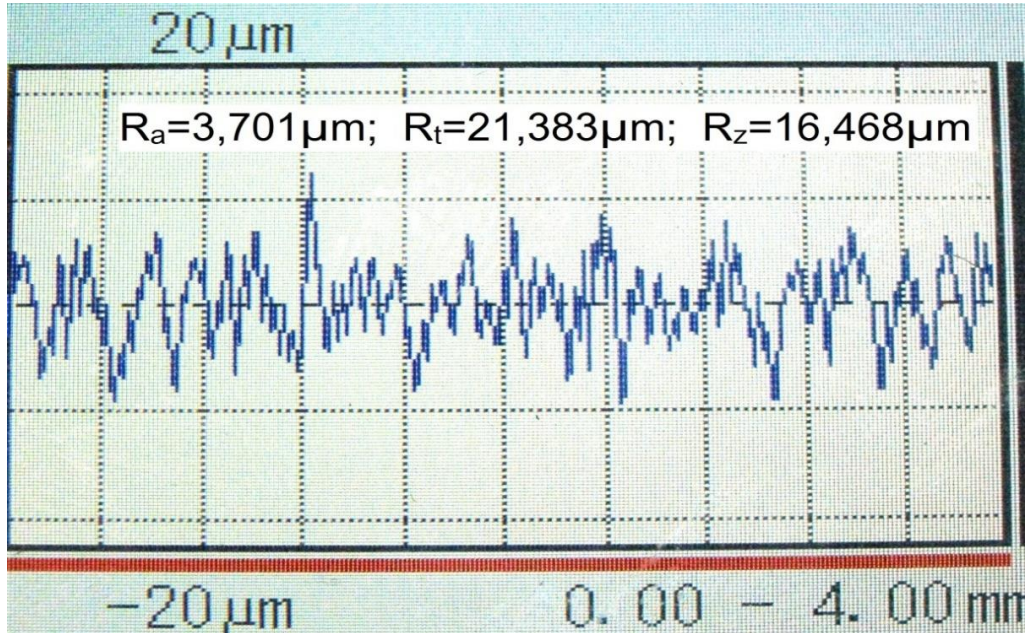
În fig. 3.25...3.28 se exemplifica profilogramele suprafeței cavitate timp de 165 min pentru cele patru variante de tratamente termice aplicate, iar în fig. 3.29...3.31 sunt redate valorile medii ale rugozității  $R_a$  măsurată pe trei direcții dispuse la 120°.



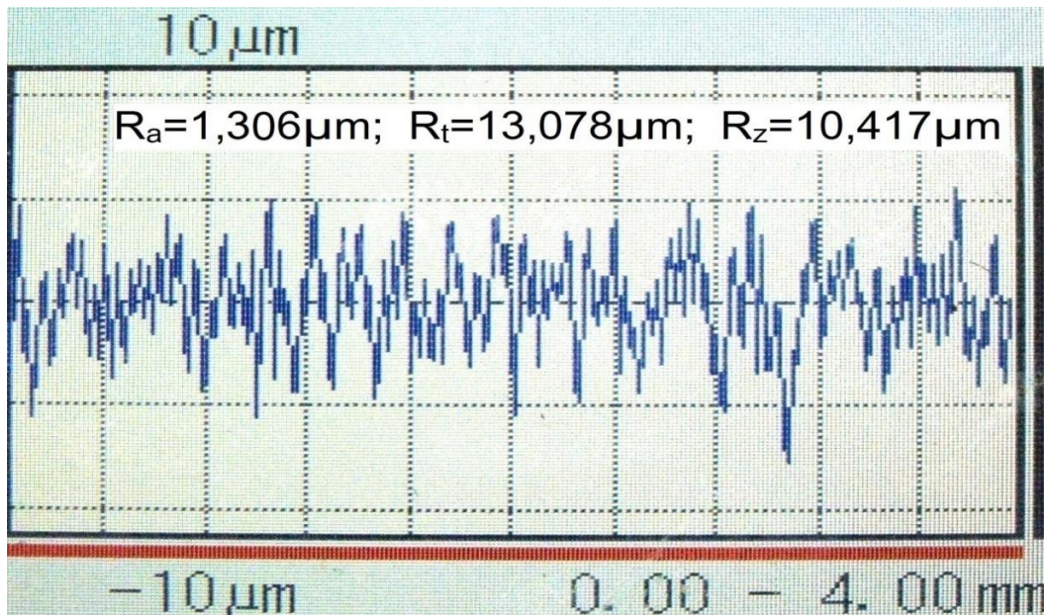
**Fig. 3.25** Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație, timp de 165 minute, (1060 °C /30min/răcire în cuptor)



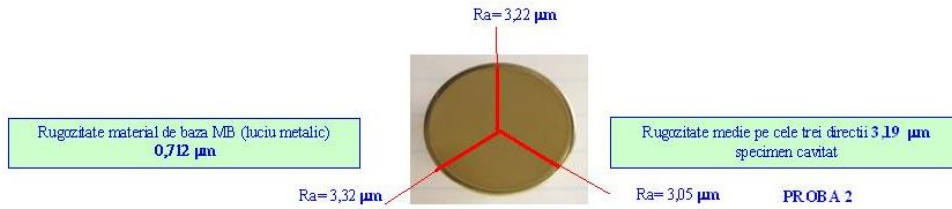
**Fig. 3.26** Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație, timp de 165 minute, (1060 °C /30min/răcire în apă)



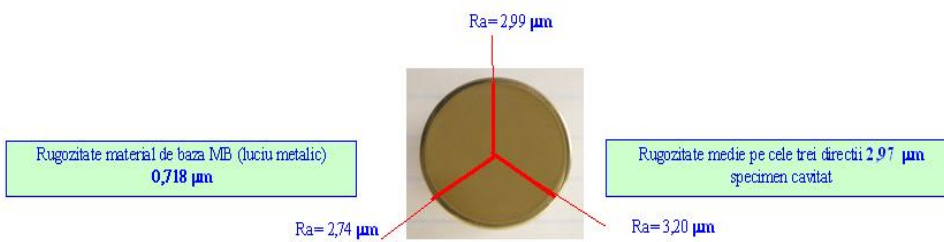
**Fig. 3.27** Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație, timp de 165 minute, (1060 °C /30min/răcire în apă+ sensibilizare la 475 °C /4h/aer)



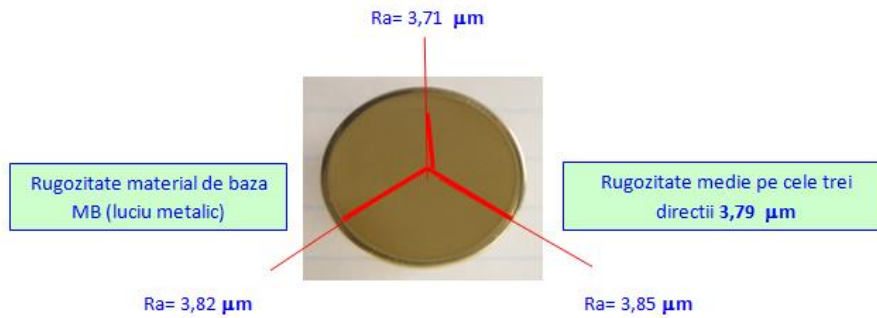
**Fig. 3.28** Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație, timp de 165 minute, (1060 °C /30min/răcire în apă+ sensibilizare la 850 °C /2h/aer)



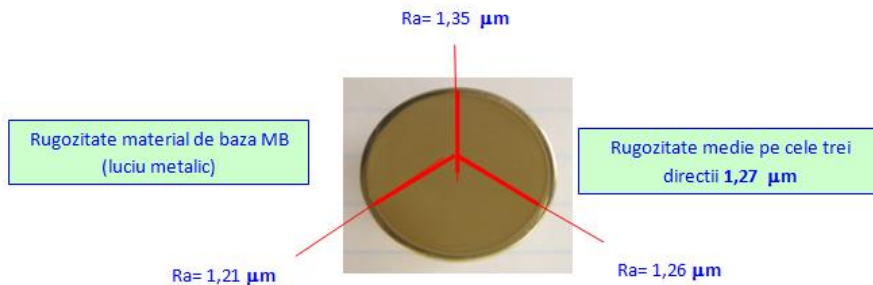
**Fig. 3.29** Măsurarea rugozității Ra cu Aparat Mitutoyo SJ 201 P, după 165 minute de atac al cavității (1060 °C /30min/răcire în apă)



**Fig. 3.30** Măsurarea rugozității Ra cu Aparat Mitutoyo SJ 201 P (1060 °C /30min/răcire în cuptor)



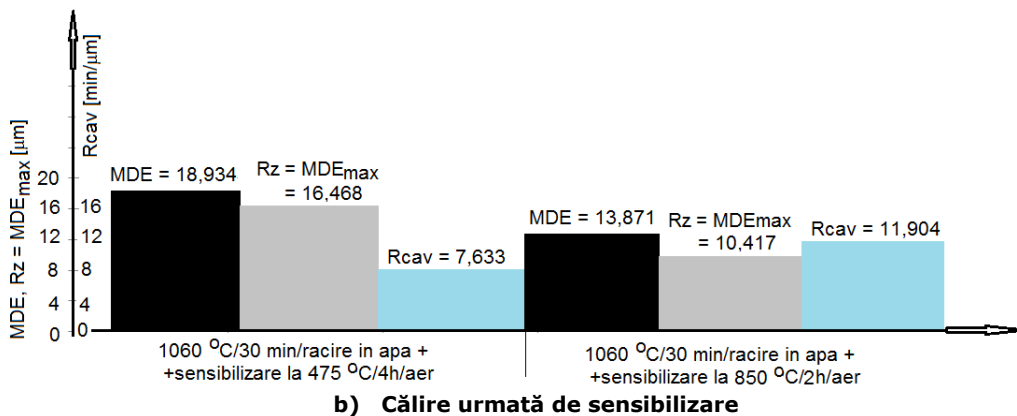
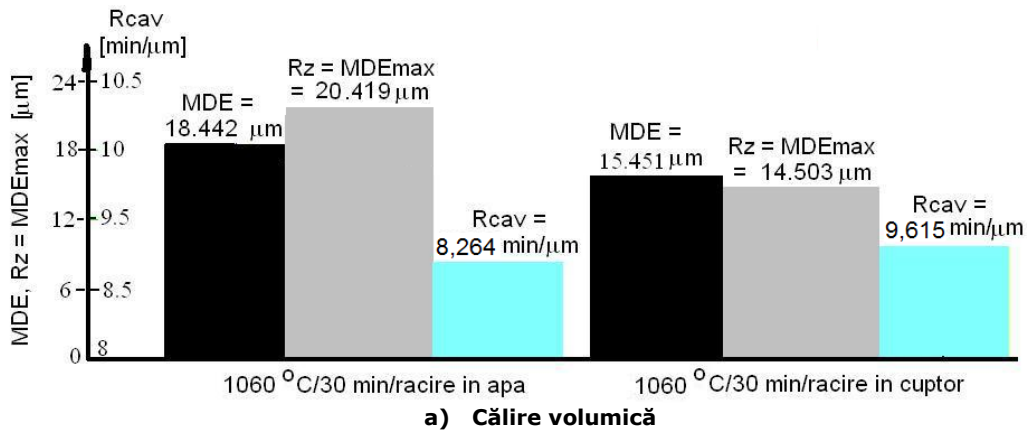
**Fig. 3.31** Măsurarea rugozității Ra cu Aparat Mitutoyo SJ 201 P (1060 °C /30min/răcire în apa + 475 °C /4h/aer)



**Fig. 3.32** Măsurarea rugozității Ra cu Aparat Mitutoyo SJ 201 P (1060 °C/30min/răcire în apa + 850 °C /2h/aer)

În fig. 3.33a este pusă în evidență influența mediului de răcire, prin compararea profilogramelor suprafețelor erodate, evaluate pe baza parametrilor de rugozitate. Din această diagramă rezultă că prin răcire mai lentă, rezistența la cavitație crește, simultan cu reducerea adâncimii de pătrundere a eroziunii. Toți parametrii 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 microstructura, care este superioară celei obținute prin răcire în apă (de cca. 52%), chiar dacă duritatea este ușor mai mică [103].

Din compararea parametrilor caracteristici eroziunii, obținuți în urma testelor realizate pe probe calite și sensibilizate (fig. 3.33b), se constată un spor substanțial adus rezistenței la cavitație vibratoare de sensibilizarea la 850 °C cu o durată de mentinere de 2 ore și cu răcire în aer. Sporul de rezistență, față de cel obținut prin sensibilizare la 475 °C cu o durată de mentinere de 4 ore, caracterizat prin  $R_{cav}$ , este de cca. 56%, iar față de calirea volumică cu răcire în apă crește cu aproximativ 44%.



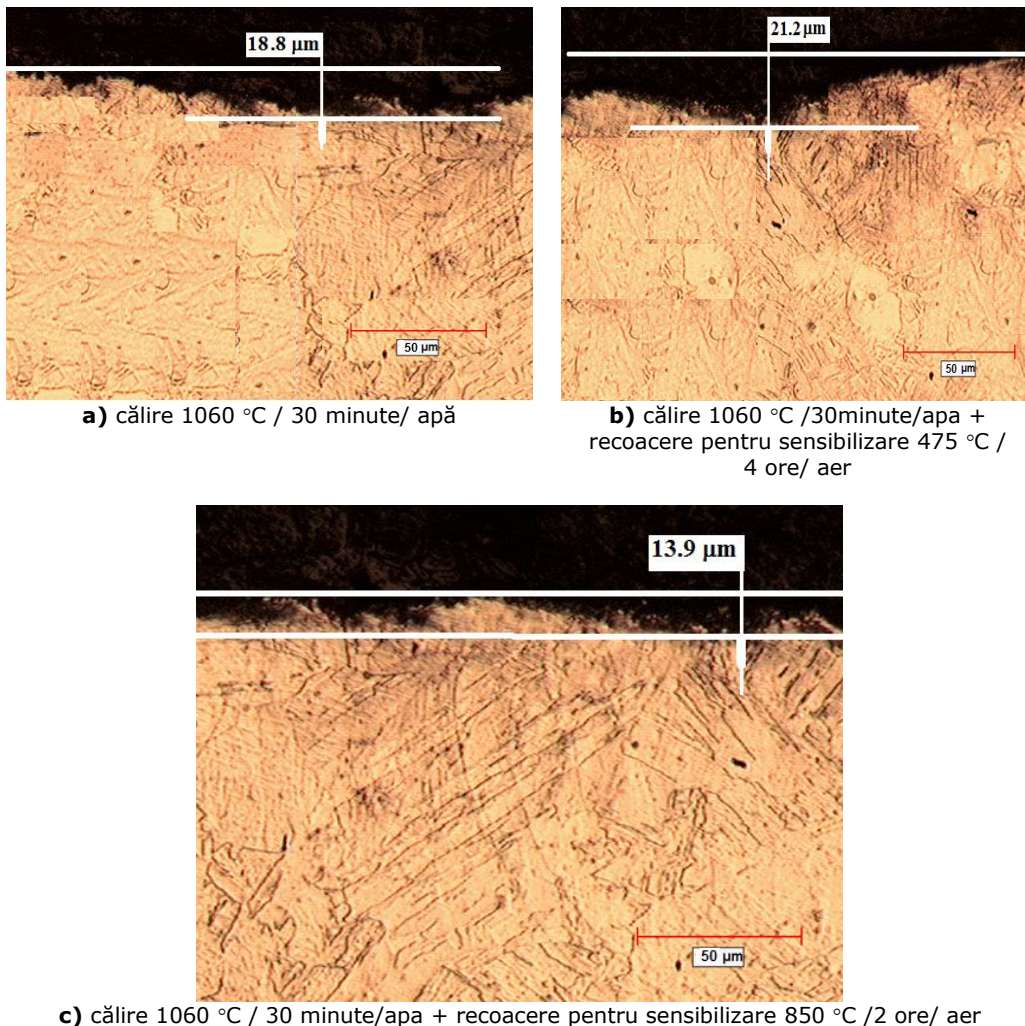
**Fig. 3.33** Corelarea rezistenței la cavitație cu rugozitatea suprafețelor



### 3.5. Examinări metalografice

În fig. 3.34 sunt redată imagini ale degradării materialului din suprafața expusă cavitației (s-a măsurat cea mai adâncă cavernă, din secțiune). Se poate observa cu ușurință propagarea fisurilor printre granițele dintre austenită și ferită, cu evoluție în matricea feritică. În aceste imagini se remarcă o tasare a stratului atacat de cavitație, care conduce la reducerea vitezei de eroziune și stabilizarea ei la valoarea maximă, fenomen specific oțelurilor cu bună și foarte bună rezistență la cavitație [82].

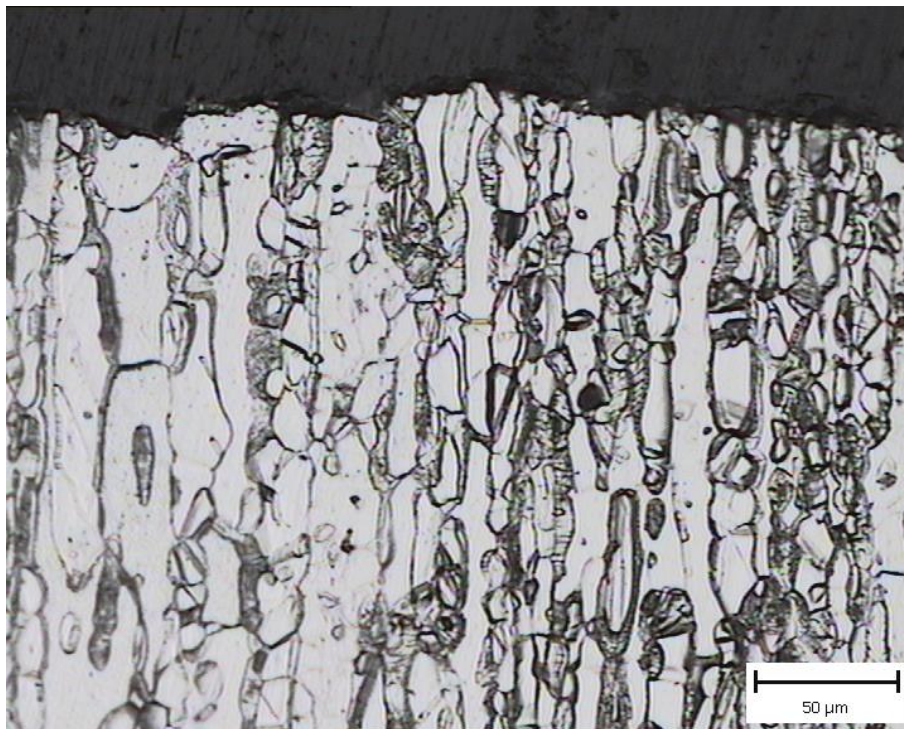
Totodată, prin comparație, se observă că cele mai mari caverne sunt realizate în oțelul recopt la 475 °C, fig. 3.33b, confirmând cele afirmate anterior.



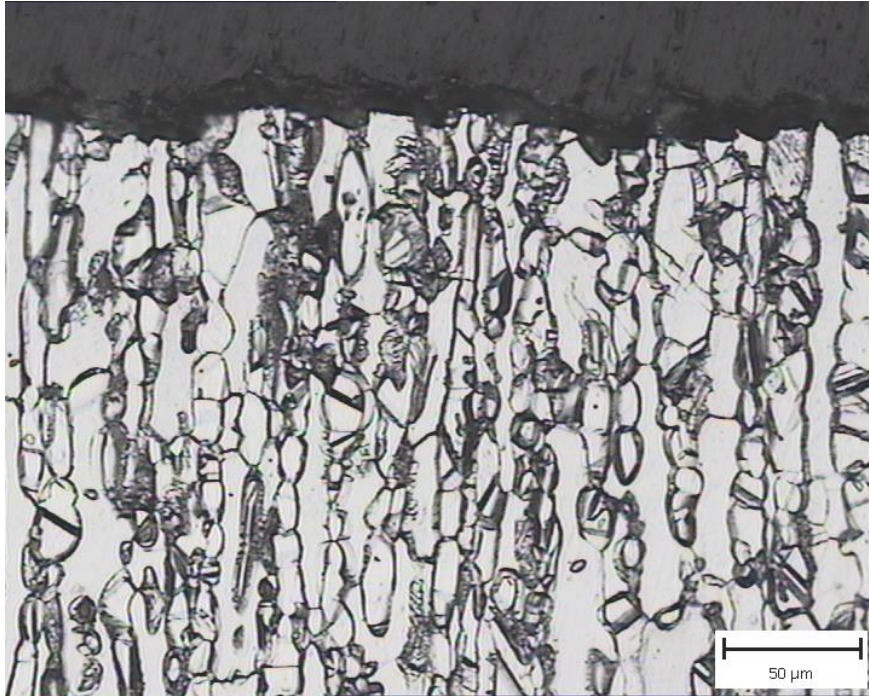
**Fig. 3.34** Imagini ale distrugerii stratului atacat de cavitație (deformații și propagări ale fisurii) – mărire 8x

Diferențele foarte mici dintre MDE calculat (fig. 3.19) și valoarea măsurată (fig. 3.34), arată comportarea uniformă a structurii oțelului, rezultată prin tratamentul aplicat, la impactul cu undele de șoc și microjeturile generate de implozia bulelor cavitaționale în timpul atacului.

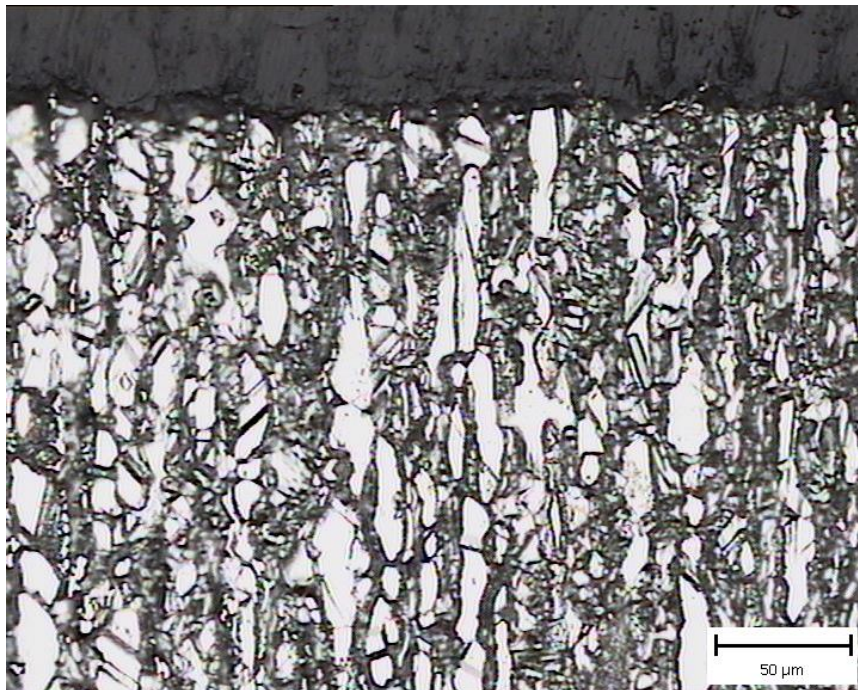
În fig. 3.35...3.37 se exemplifică microstructura secțiunilor perpendiculare pe suprafețele cavitate ale probelor tratate termic prin călire pentru punere în soluție cu răcire în apă (fig. 3.35), respectiv supuse unei fragilizari la 475 °C (fig. 3.36), sau unei recoaceri pentru sensibilizare la 850 °C (fig. 3.37) în urma călirii pentru punere în soluție.



**Fig. 3.35** x 200 Microstructura oțelului tratat termic prin călire 1060 °C /apă



**Fig. 3.36** x 200 Microstructura de călire 1060 °C /apă urmată de sensibilizare 475 °C /4h/aer



**Fig. 3.37** x 200 Microstructura de călire 1060 °C /apă urmată de sensibilizare 850 °C /2h/aer

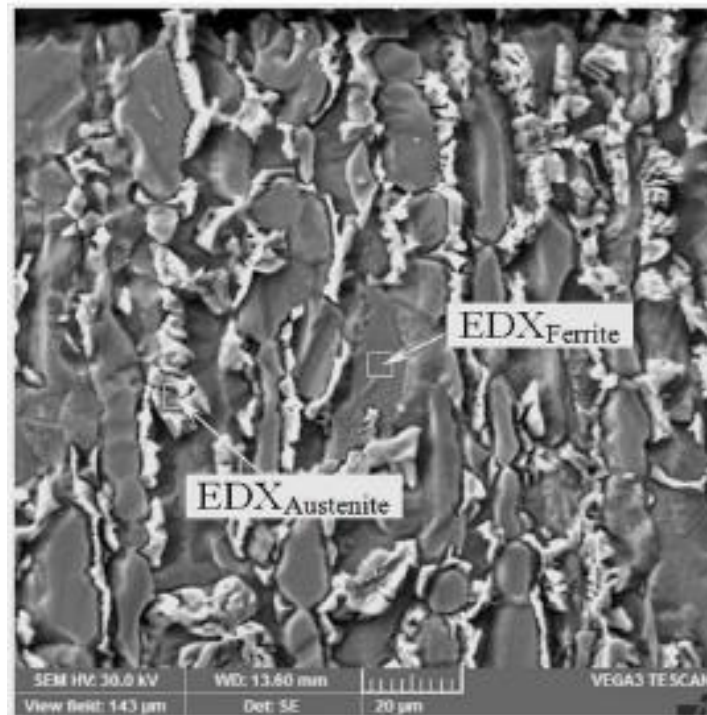
Aplicarea unei recoaceri pentru sensibilizare la 475 °C timp de 4 h, după călirea în apă, nu provoacă schimbări structurale sesizabile microscopic (fig. 3.36), în schimb prin ridicarea temperaturii de recoacere la 850 °C se provoacă fenomene de precipitare a unor faze secundare și de reformare a austenitei din ferita (fig. 3.37).

Ambele tratamente de sensibilizare se manifestă printr-o creștere sensibilă a durtății materialului (fig. 3.2), comparativ cu starea structurală obținută în urma călirii pentru punere în soluție. Astfel, dacă după călirea pentru punere în soluție durtatea are valori medii de 275 HV1, prin fragilizare la 475 °C aceasta se mărește la 330 HV1, iar în urma expunerii materialului la 850 °C, se obțin valori de 361 HV1.

Aceste modificări de microstructură și de duritate explică diferențele de comportare la eroziune prin cavitație a acestui oțel. Din fig. 3.36 și 3.37 se poate constata că atacul cavitațional s-a propagat cu preponderență în faza de ferită și pe limitele de separație dintre ferită și austenită. Într-o măsură prin fragilizare la 475 °C au apărut domenii feritice bogate în crom,  $\alpha'$  ele vor fi sediul unor degradări mai pronunțate de material prin eroziunea cavitației (fig. 3.36). Astfel se explică asemănările și diferențele apărute pe suprafețele cavității ale probelor S1 și S2. La probele sensibilizate la o temperatură de 850 °C, deși durificarea prin îmbatrânire este ușor mai accentuată decât cea obținută prin expunere la 475 °C, degradarea prin cavitație se propagă mult mai uniform (fig. 3.37 comparativ cu fig. 3.36). Urmare a acestor schimbări microstructurale, se produce o redistribuire a principalelor elemente de aliere în graunții celor două faze, ferita și austenita. Aceste diferențe au fost puse în evidență prin analize de dispersie în energie a razelor X (tabelul 3.2).

**Tabel 3.2** Rezultatele analizelor EDX

Proba	Element, % masă	EDX <sub>Ferita</sub>	EDX <sub>Austenita</sub>
S1 (în acord cu tabelul 3.1)	Cr	22.4	21.2
	Ni	5.3	5.9
	Mo	3.1	2.8
	N	≤ 0.04	0.32
S2 (în acord cu tabelul 3.1)	Cr	21.2	21.8
	Ni	5.4	5.5
	Mo	3.09	2.9
	N	≤ 0.04	0.34



- a -

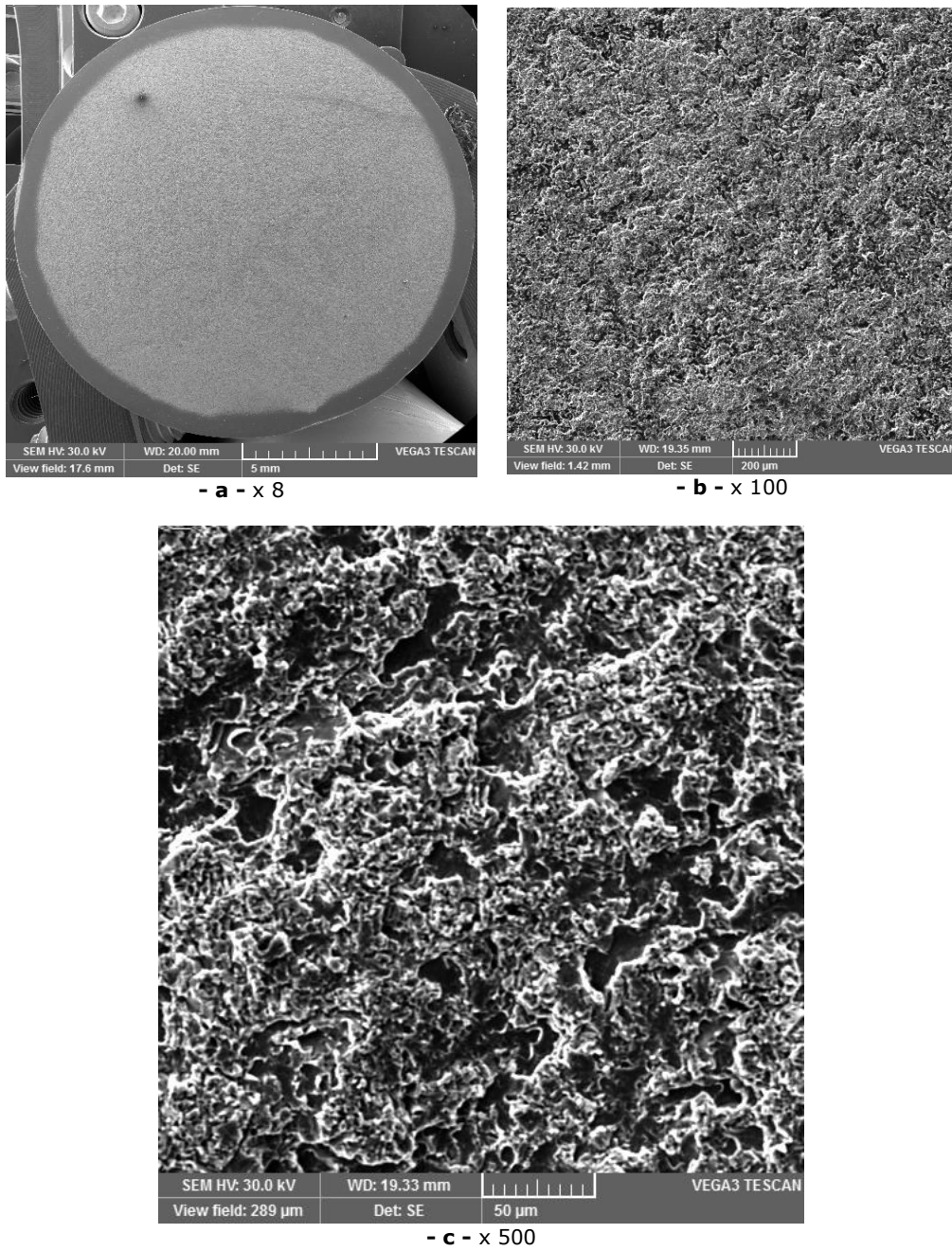


- b -

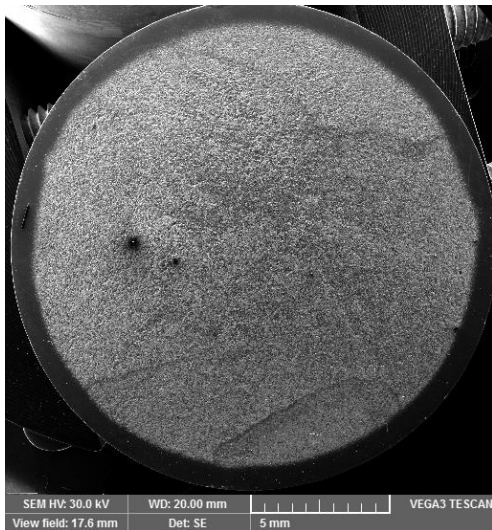
**Fig. 3.38** Proba S1: a - aria investigată EDX; b - rețea de microfisuri pe suprafața probelor cavitate (dezvoltate în grăunții de ferită)

Microjeturile care urmează imploziei bulelor cavitaționale și ale căror viteze pot atinge valori de mai multe sute de metri pe secundă [53], [149] conduc la deformări plastice importante și la formarea rețelelor de microfisuri (indicate cu săgeți în fig. 3.38) asociate fenomenului de oboseală datorat contracțiilor ciclice care se manifestă pe durata atacului cavitațional.

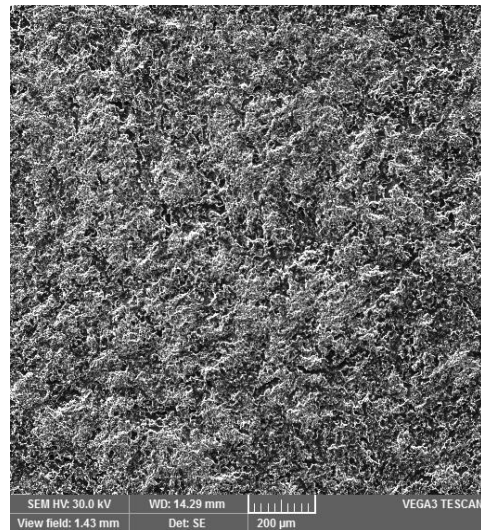
Topografiile tipice ale suprafeței probelor tratate termic diferit și testate timp de 165 min la cavitație ultrasonică sunt redată în fig. 3.39...3.41.



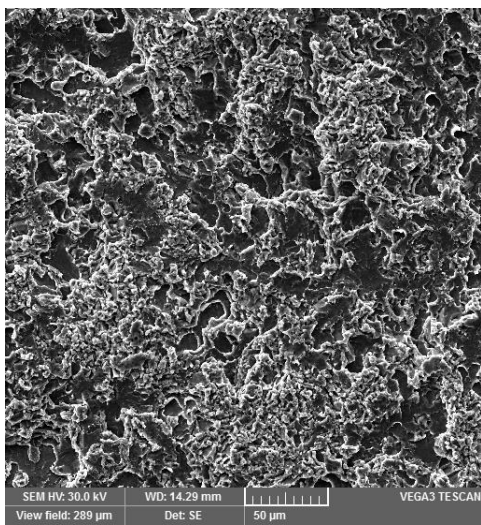
**Fig. 3.39** Macro – și micrografia suprafeței cavitate a probelor supuse călirii 1060 °C/apă



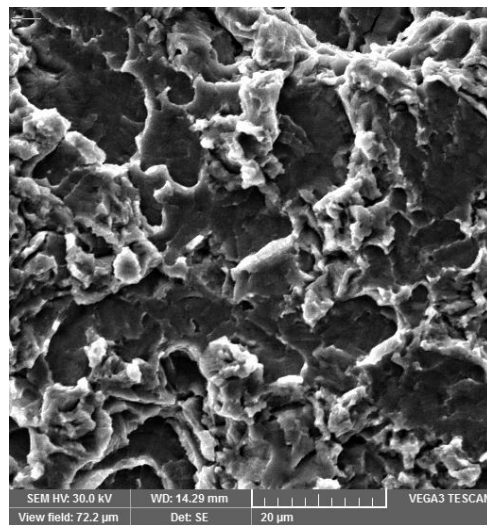
- a - x 8



- b - x 100

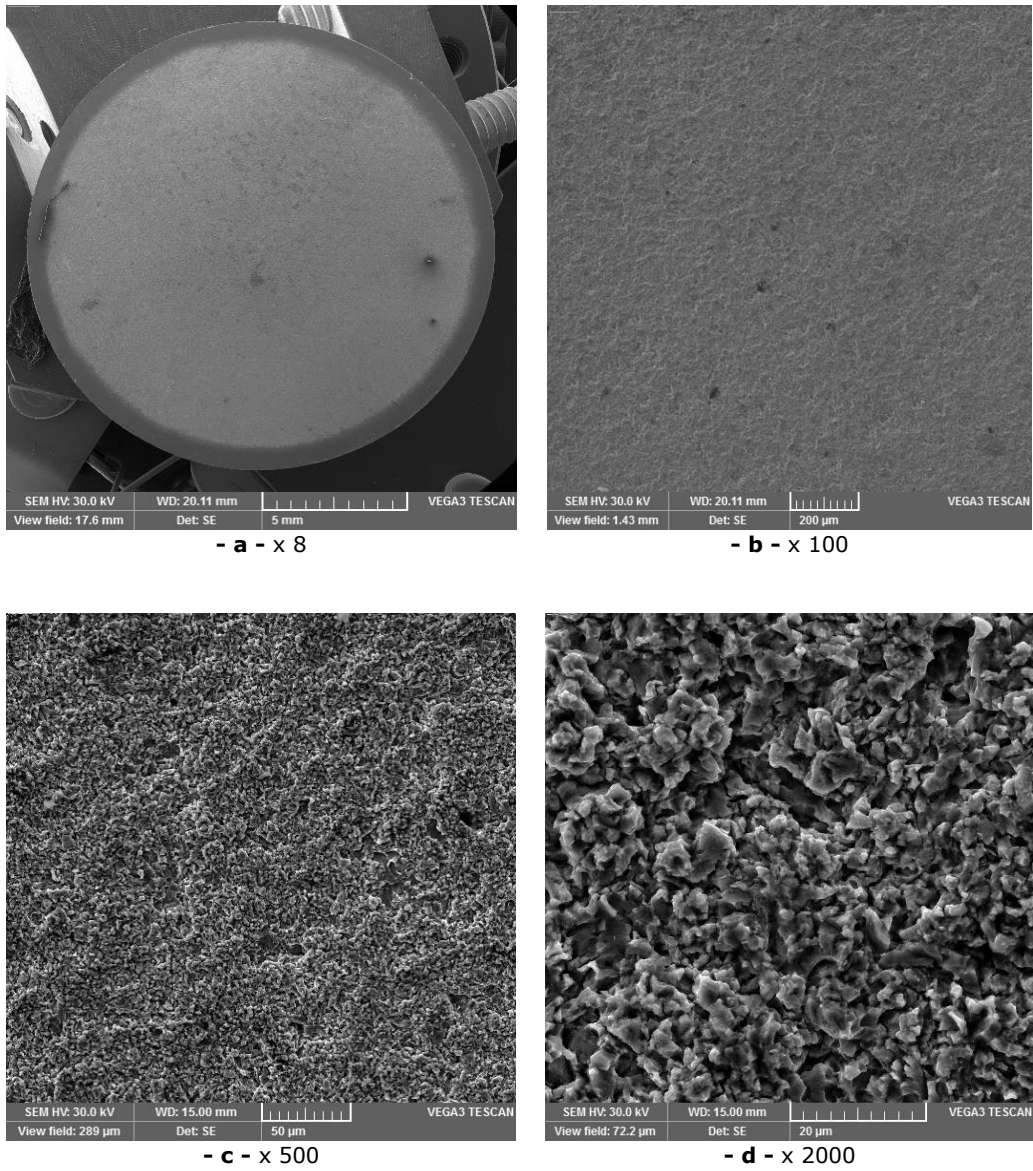


- c - x 500



- d - x 2000

**Fig. 3.40** Macro – și micrografia suprafeței cavități a probelor supuse călirii 1060 °C/apă urmată de recoacere pentru sensibilizare la 475 °C/aer



**Fig. 3.41** Macro – și micrografia suprafeței cavități a probelor supuse călirii 1060 °C/apă urmată de recoacere pentru sensibilizare la 850 °C/aer



Așa cum era de așteptat, 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 progresează, atacul se concentrează în faza de austenită și apoi se generalizează în faza de ferită. Imaginile prezentate în fig. 3.39 și 3.40 demonstrează că nu apar diferențe semnificative în privința topografiei suprafeței probelor călite în apă, respectiv sensibilizate la 475 °C după călire. Explicația acestui fenomen rezidă în faptul că întrucât oțelul analizat conține în microstructură cca. 50% austenită, efectul de fragilizare apărut prin formarea fazei  $\alpha'$  bogată în crom nu este atât de dăunător ca în cazul unui oțel inoxidabil pur feritic.

Precipitarea fazelor secundare în matricea de ferită sau pe limitele grăunților în cazul expunerii oțelului la 850 °C, provoacă o durificare prin îmbătrânire și implicit o degradare mai lentă și uniformă a suprafeței la eroziunea prin cavitație (fig. 3.41).

### 3.6. Analize de difracție cu raze X

Pentru asemenea investigații s-a folosit difractometrul Dron 3, redat în fig. 3.42 din dotarea Departamentului de Ingineria Materialelor și Fabricației, Universitatea Politehnica Timișoara.

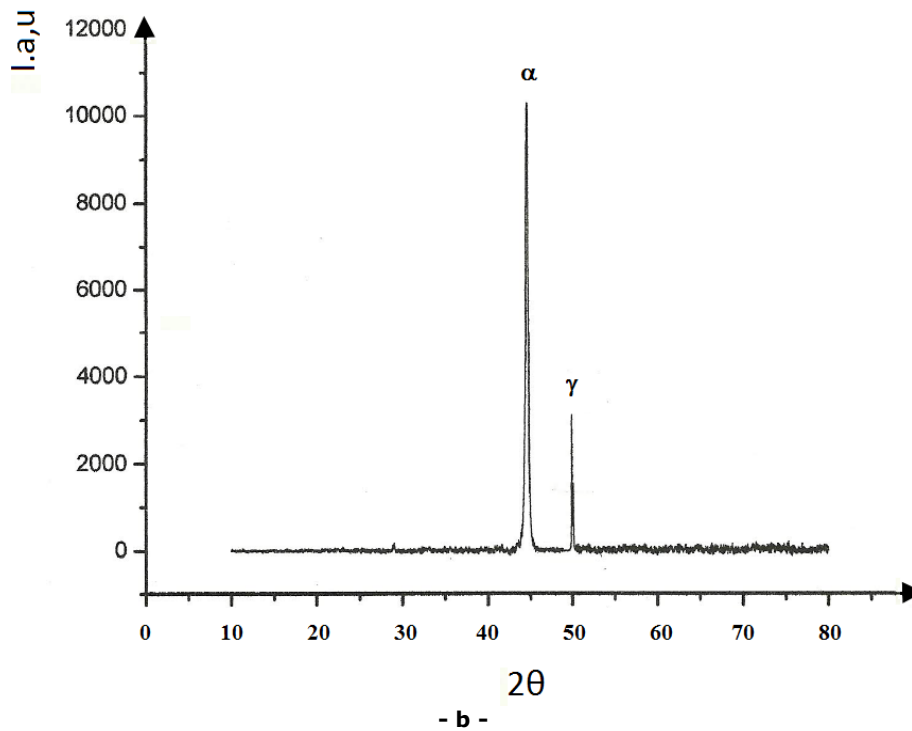
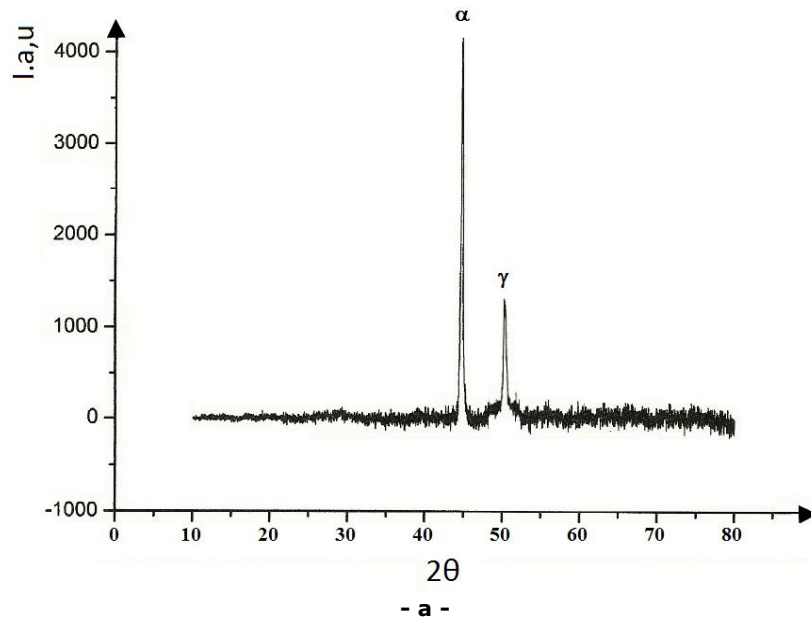


**Fig. 3.42.** Echipamentul de difracție cu raze X, Dron 3

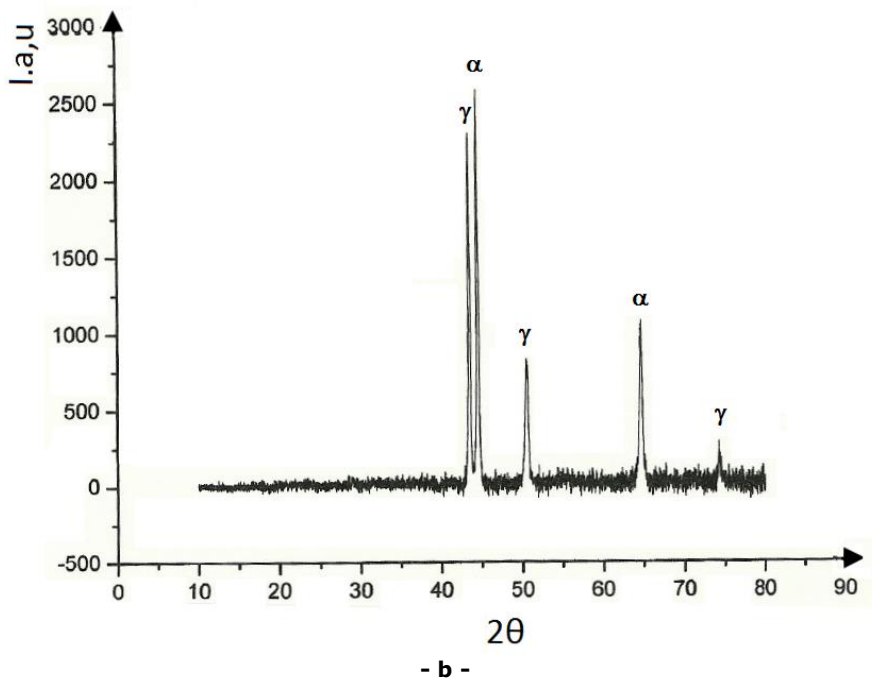
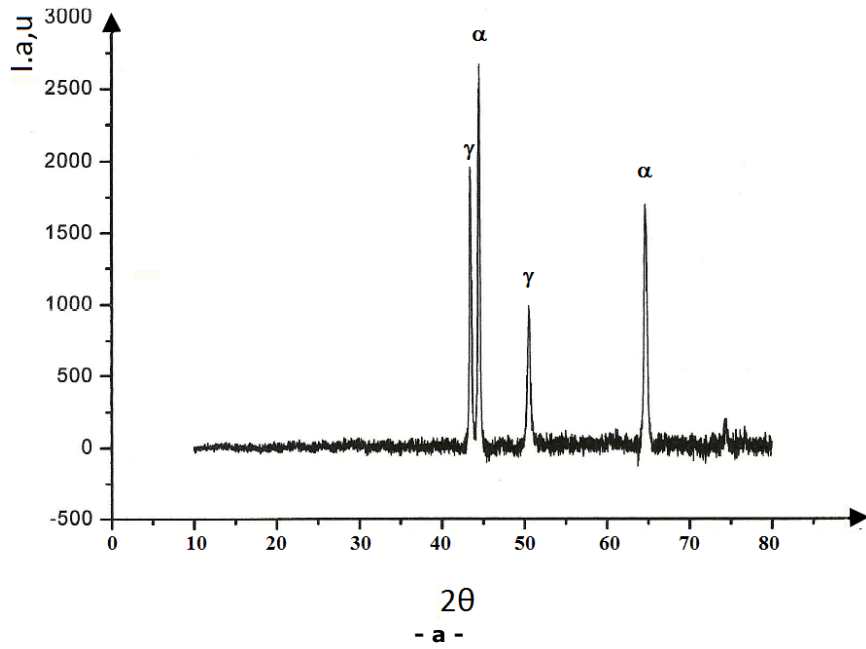
Parametrii de lucru utilizați au fost:

- intensitatea curentului electric,  $I = 30 \text{ mA}$ ;
- anticatodul de  $\text{Mo}$ ,  $\lambda_{\text{KMo}} = 0,71\text{\AA}$ ;
- tensiunea aplicată,  $U = 40 \text{ kV}$ ;
- viteza tubului de raze X,  $v_d = 2^\circ/\text{min}$ .

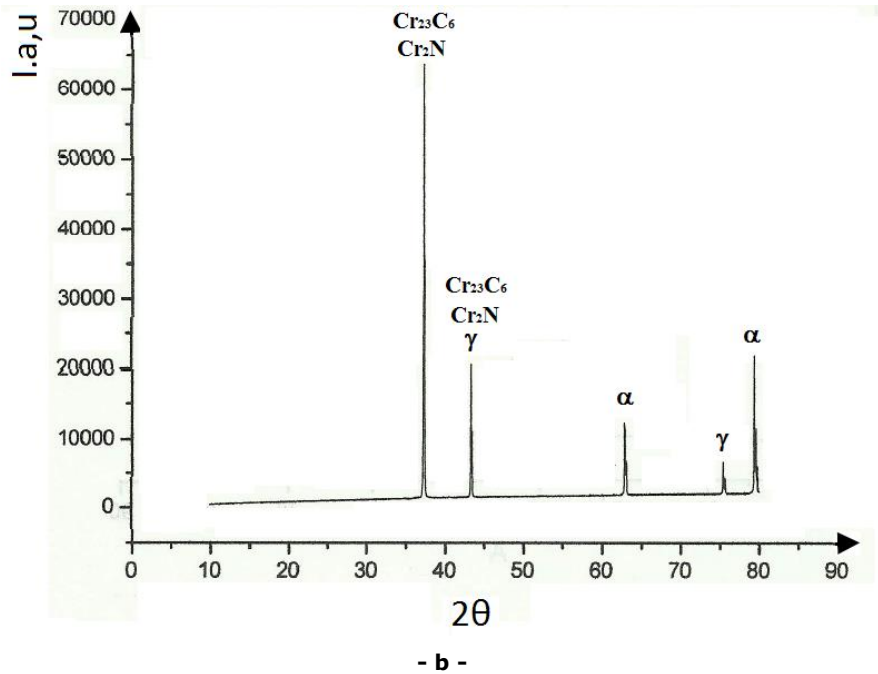
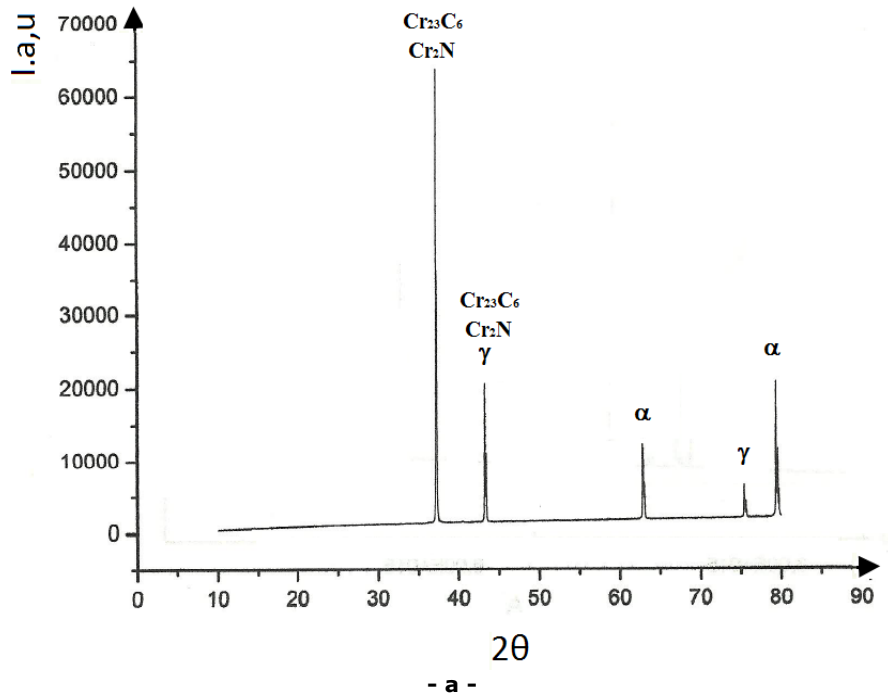
În fig. 3.43...3.45 sunt prezentate spectrele de difracție cu raze X, obținute pe secțiunea transversală a probelor, înainte și după testele de eroziune prin cavitație, supuse celor 3 cicluri termice distincte.



**Fig. 3.43.** Imaginea de difracție a probelor supuse călirii pentru punere în soluție, 1050 °C /apă: a – înainte de cavitație; b – după testul de cavitație



**Fig. 3.44.** Imaginea de difracție a probelor supuse călirii pentru punere în soluție, 1050 °C /apă, urmată de recoacere pentru sensibilizare 475 °C /4h/aer: a – înainte de cavitație; b – după testul de cavitație



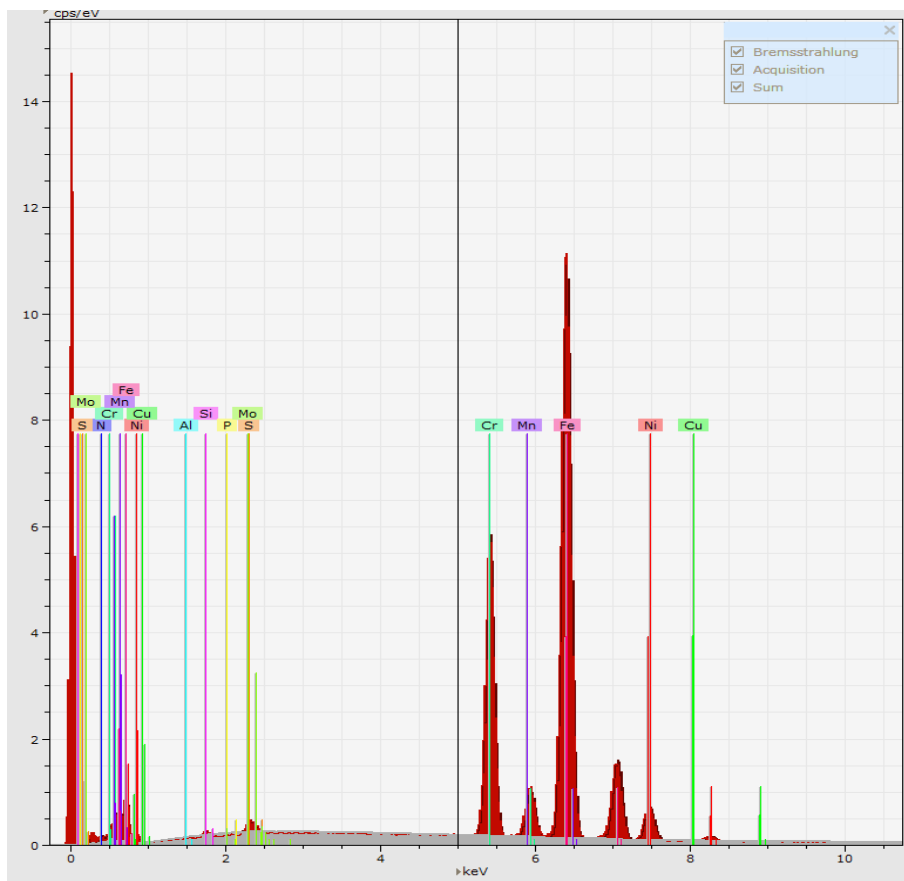
**Fig. 3.45.** Imaginea de difracție a probelor supuse călirii pentru punere în soluție, 1050 °C /apă, urmată de recoacere pentru sensibilizare 850 °C /2h/aer: a – înainte de cavitație; b – după testul de cavitație

În urma indexării spectrelor de difracție s-au constatat următoarele:

- testele de eroziunea cavitației nu provoacă schimbări ale naturii fazelor microstructurale din oțel;
- tratamentul de călire pentru punere în soluție bazat pe o răcire bruscă în apă fixează la temperatura camerei microstructura stabilă la temperaturi înalte, constituită din ferită, F și austenită, A (fig. 3.43);
- efectuarea unei recoaceri pentru sensibilizare la 475 °C nu conduce la modificări ale naturii fazelor (fig. 3.44);
- recoacerea pentru sensibilizare la 850 °C se manifestă prin precipitarea unor nitruri de crom,  $Cr_2N$ , carburi de crom,  $Cr_{23}C_6$  și a fazei  $\sigma$  (fig. 3.45).

### 3.7. Analize EDX

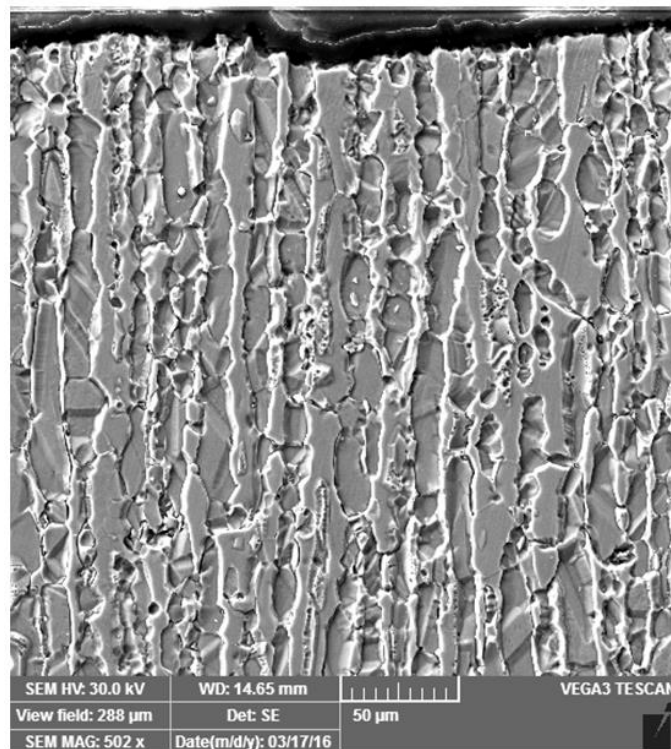
Compoziția chimică și microstructura stratului marginal afectat de eroziunea prin cavitație la probele supuse celor trei variante tehnologice de tratament termic volumic a fost investigată la microscopul electronic cu baleiaj folosind tehnica spectroscopiei în energie dispersivă a razelor X, EDX (fig. 3.46...3.48).



-a -

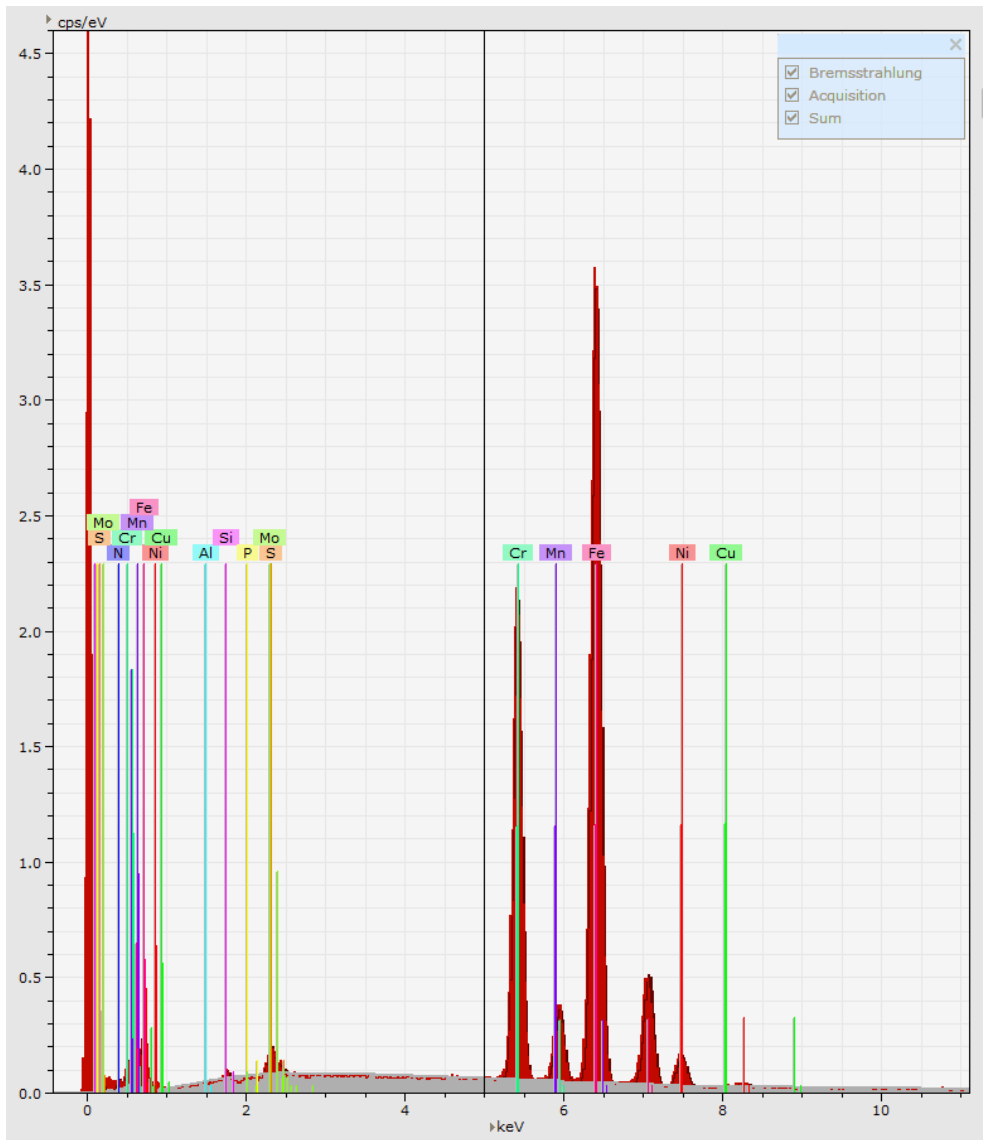
Results		Primary energy		30.0 keV	
		Tilt angle		0.0°	
	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Nickel	K series	5.73	5.51	4.74	0.18
Copper	K series	0.35	0.34	0.27	0.04
Nitrogen	K series	3.69	3.55	12.78	0.81
Aluminium	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Silicon	K series	0.31	0.30	0.54	0.04
Phosphorus	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfur	K series	0.30	0.29	0.45	0.04
Chromium	K series	21.49	20.66	20.06	0.59
Manganese	K series	0.67	0.64	0.59	0.05
Iron	K series	67.22	64.64	58.43	1.73
Molybdenum	K series	4.23	4.07	2.14	0.28
	<b>Total</b>	<b>103.99</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

- b -



- c -

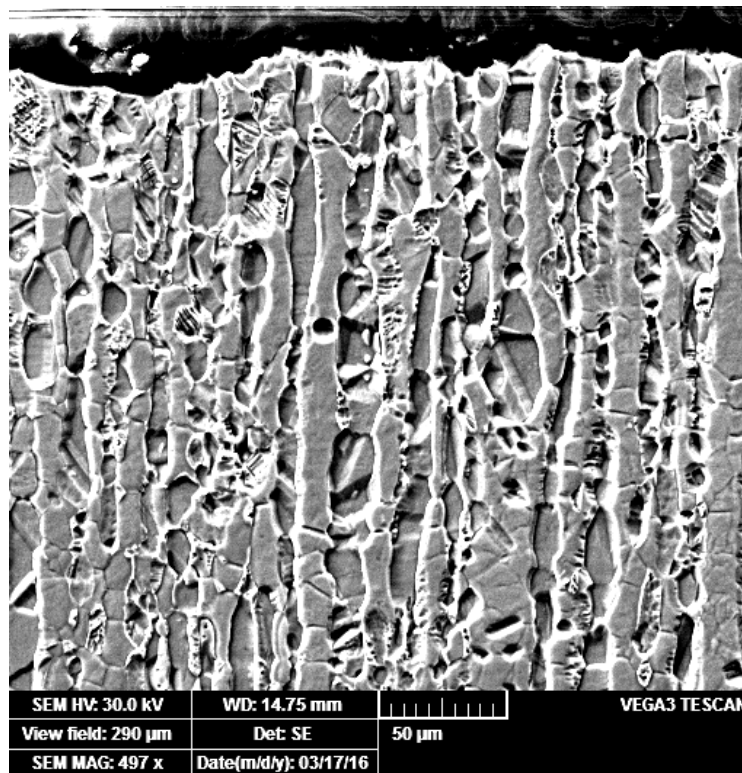
**Fig. 3.46** Investigații EDX asupra probelor cavitate după tratamentul termic de călire pentru punere în soluție, 1050 °C/apă: a- componenții aliajului; b – determinări de compoziție; c – microstructura unei secțiuni prin probă



- a -

<b>Results</b>		Primary energy		30.0 keV	
		Tilt angle		0.0°	
	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Nickel	K series	3.68	3.59	3.11	0.14
Copper	K series	0.19	0.19	0.15	0.04
Nitrogen	K series	3.28	3.20	11.62	1.04
Aluminium	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Silicon	K series	0.37	0.37	0.66	0.06
Phosphorus	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfur	K series	0.22	0.21	0.34	0.04
Chromium	K series	24.06	23.47	22.96	0.67
Manganese	K series	0.55	0.54	0.50	0.05
Iron	K series	65.62	64.00	58.30	1.70
Molybdenum	K series	4.54	4.43	2.35	0.44
<b>Total</b>		<b>102.52</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

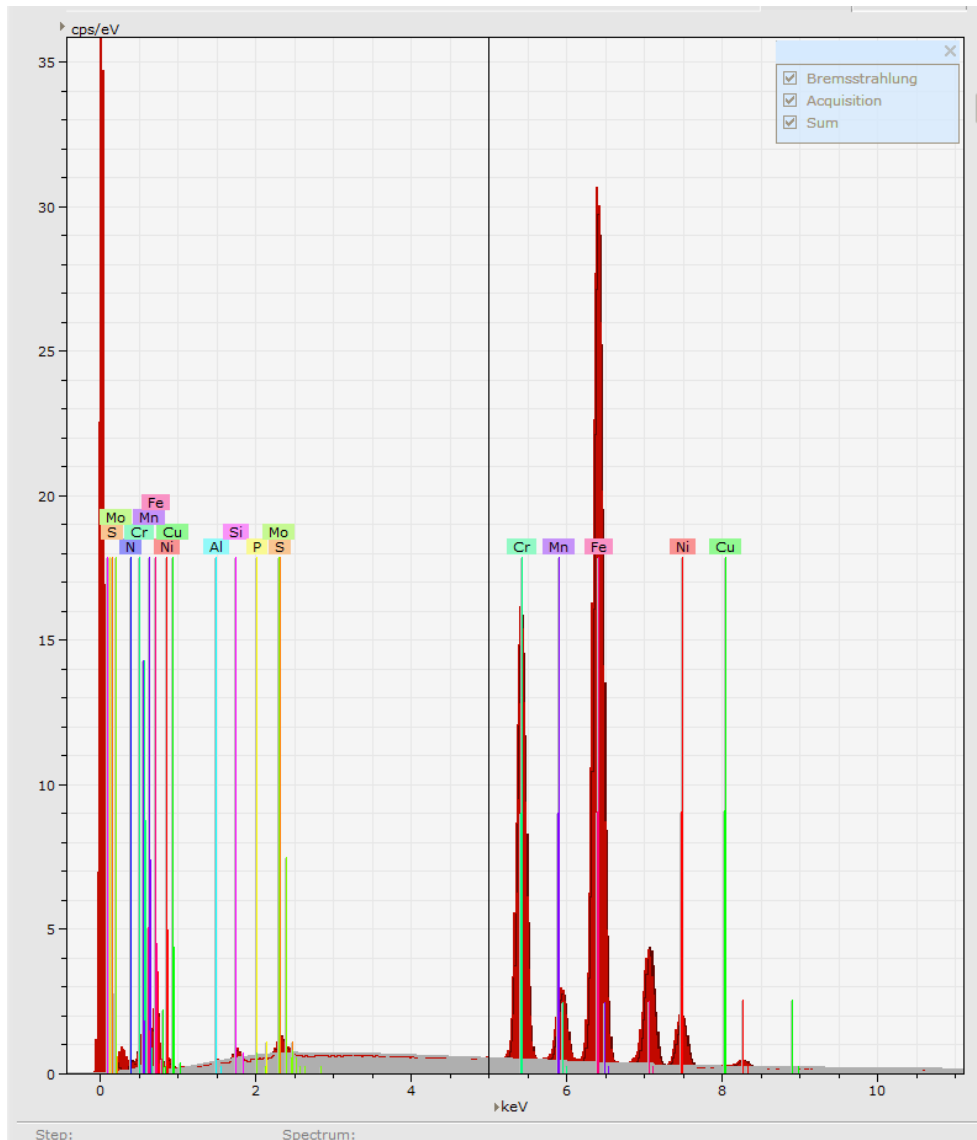
- b -



- c -

**Fig. 3.47** Investigații EDX asupra probelor cavitate după tratamentul termic de călire pentru punere în soluție, 1050 °C/apă urmată de sensibilizare la 475 °C /4h/aer: a- componenții aliajului; b – determinări de compoziție; c – microstructura unei secțiuni prin probă

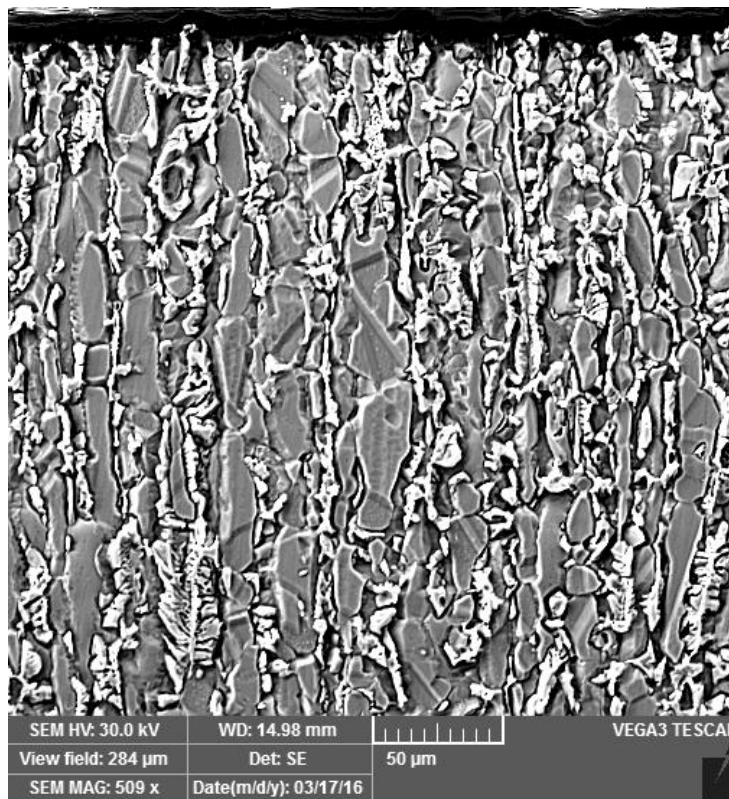




- a -

Results		Primary energy		30.0 keV	
		Tilt angle		0.0°	
	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Nickel	K series	5.80	5.56	4.80	0.17
Copper	K series	0.37	0.35	0.28	0.04
Nitrogen	K series	3.49	3.35	12.11	0.62
Aluminium	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Silicon	K series	0.32	0.31	0.56	0.04
Phosphorus	K series	0.00	0.00	0.00	0.00
Sulfur	K series	0.29	0.27	0.43	0.04
Chromium	K series	22.07	21.16	20.62	0.60
Manganese	K series	0.57	0.55	0.51	0.04
Iron	K series	67.57	64.78	58.76	1.73
Molybdenum	K series	3.82	3.66	1.93	0.19
	<b>Total</b>	<b>104.30</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

- b -



- c -

**Fig. 3.48** Investigații EDX asupra probelor cavitate după tratamentul termic de călire pentru punere în soluție, 1050 °C /apă urmată de sensibilizare la 850 °C /2h/aer: a- componenții aliajului; b – determinări de compoziție; c – microstructura unei secțiuni prin probă

Rezultatele acestor determinări atestă următoarele:

- pentru condițiile experimentale utilizate, procesul de cavitație ultrasonică nu provoacă modificări de compoziție chimică în stratul marginal al materialului considerat;
- variația concentrației elementelor de aliere, în limitele admise pentru acest oțel, este o urmare a modificării prin tratamentele aplicate a redistribuirii lor între ferită și austenită și a impreciziei determinărilor cantitative ale elementelor ușoare;
- microstructura stratului de suprafață testat la cavitație întărește rezultatele prezentate anterior, în sensul că cea mai înaltă rezistență la eroziunea cavitației se obține în urma tratamentului de sensibilizare la 850 °C, iar cea mai slabă rezistență apare după recoacerea de sensibilizare la 475 °C (fig. 3.48 c comparativ cu fig. 3.47 c).

### 3.8. Concluzii

- ❖ Reacțiile de transformare și de precipitare în stare solidă specifice oțelului inoxidabil Duplex analizat sunt responsabile de comportarea sa la eroziune prin cavitație.
- ❖ 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 durtății de la cca. 275 HV (stare călită) la cca. 330 HV (stare de fragilizare) și o mărire cu cca. 21% a vitezei maxime de eroziune a cavitației. Într-un câț oțelul are în microstructură cca. 50% austenită, efectul fragilizant al fazei feritice  $\alpha'$  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.
- ❖ 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.
- ❖ Atacul cavitațional se propagă cu preponderență în faza de ferită și pe limitele grăunților de ferită – austenită, după care se declanșează și în grăunții de austenită.
- ❖ Ecrisarea stratului din suprafața cavitată, după un timp relativ scurt de atac, asigură un spor suplimentar de rezistență la cavitație.

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

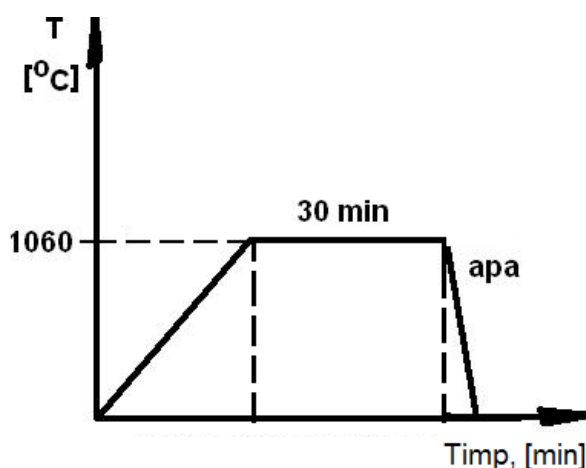
**Tratamentele termochimice** aplicate unui material metalic au drept scop creșterea duriității stratului de suprafață și a rezistenței la coroziune a acestuia, fără a modifica tenacitatea miezului.

### 4.1. Nitrurarea în gaz

**Nitrurarea** este un tratament termochimic ce se aplică oțelurilor și fontelor pentru a se obține un strat îmbogățit în azot la suprafața piesei, în vederea îmbunătățirii proprietăților de întrebuințare și anume: creșterea duriității, a rezistenței la uzare, coroziune și oboseală [145].

Pentru a pune în evidență efectul acestui tratament termochimic asupra comportării pieselor ce funcționează în regim de cavitație, pentru comparație, s-au folosit rezultatele obținute pe același oțel, tratat termic numai prin călire pentru punere în soluție de la 1060 °C, cu răcire în apă.

Principalii parametri tehnologici ai acestui proces sunt temperatura și durata de încălzire. În fig. 4.1a este prezentată ciclograma tratamentului termic – călire pentru punere în soluție, iar în fig. 4.1b este redată ciclograma tratamentului termochimic de nitrurare în amoniac, aplicat epruvetelor analizate. Se știe că oțelurile inoxidabile pot fi nitrurate doar în urma aplicării unui pretratament special (sablare sau decapare chimică) din cauza filmului de oxid de crom care se formează pe suprafață în urma contactului cu oxigenul atmosferic care împiedică absorbția azotului. În cazul de față s-a procedat la o sablare ușoară cu nisip pentru eliminarea stratului de oxid de crom.



a – Ciclograma călirii pentru punere în soluție

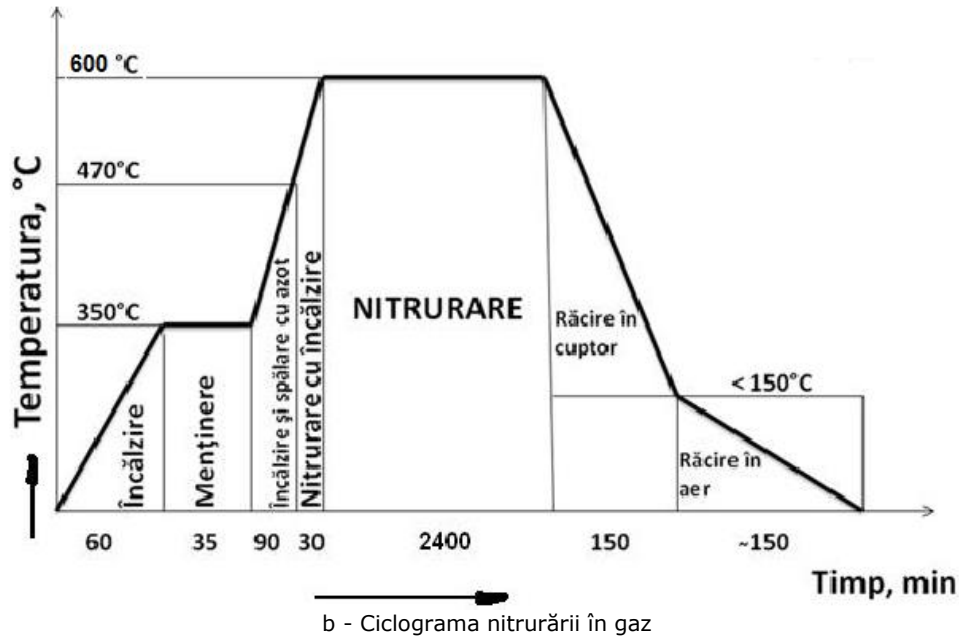
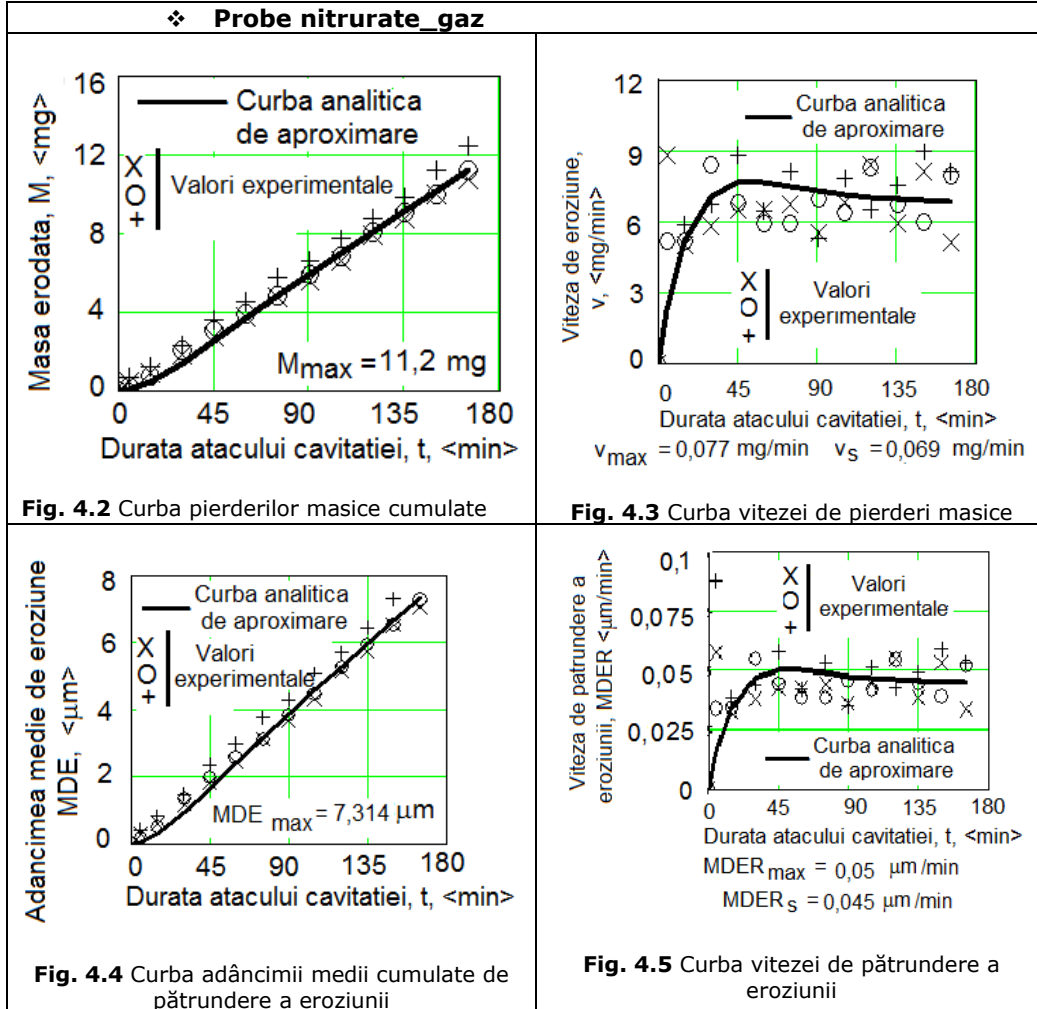


Fig. 4.1 Ciclogramele tratamentelor aplicate probelor cercetate la eroziunea cavitației

## 4.2. Rezultatele cercetării la cavitație

Având la bază testele experimentale, a fost calculată valoarea medie a pierderilor masice, pentru fiecare perioadă intermediară de atac. Fig. 4.2...4.5 redau atât variația în timp a acestora cât și vitezele lor pe aceleași probe.

Modul de evoluție al comportării și rezistenței suprafeței nitrurate în gaz, la eroziunea cavitației este dat de curba specifică (1) din fig. 4.6 care arată variația adâncimii medii cumulate de pătrundere a eroziunii (MDE) cu durata atacului cavitației.



Determinarea adâncimilor medii, corespunzătoare fiecărei perioade intermediare de atac (5, 10 sau 15 minute), s-a făcut cu relația [18], [80]:

$$\Delta MDE_i = \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \text{ [mm]} \quad (4.1)$$

unde:

$i = 1 \dots 12$  – reprezintă perioada de testare (5 min, 10 min sau 15 min);

$\Delta MDE_i$  – adâncimea medie de pătrundere a eroziunii în perioada  $\Delta t$ ;

$\Delta t_i$  – durata expunerii la cavitație în perioada „i”;

$\Delta m_i$  – pierderi de masă în perioada „i” [grame];

$\rho$  – densitatea oțelului [grame/mm<sup>3</sup>];

$d_p$  – diametrul probei ( $d_p \approx 15,9$  mm).

Adâncimea medie cumulată, de pătrundere a eroziunii, MDE, dată în diagrama din fig. 4.2, s-a determinat cu relația:

$$MDE_{\bar{t}} = \sum_{i=1}^{i=12} \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot n \cdot d_p^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

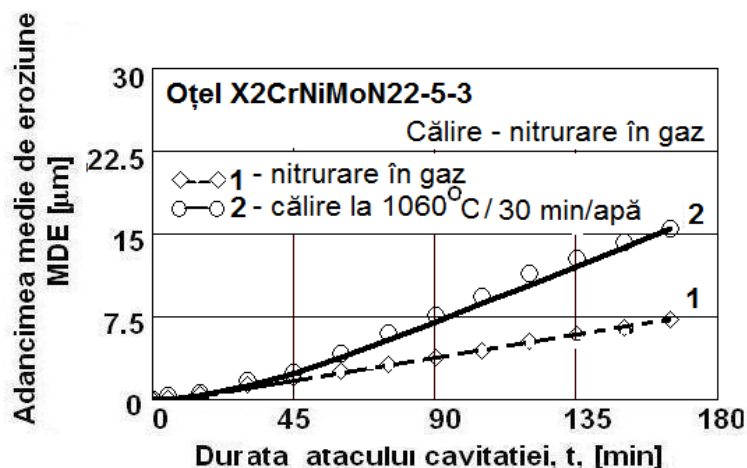


Fig. 4.6 Variația adâncimii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației

Tot în fig. 4.6 este prezentată curba specifică a aceluiași oțel, supus tratamentului termic volumic de călire pentru punere în soluție cu răcire în apă, conform ciclogramei din fig. 4.1 a. Din analiza comparativă a celor două curbe se observă că, începând cu minutul 30 și până la finalizarea testului, nitruarea în gaz conferă suprafeței atacate de cavitație o rezistență mult superioară celei obținute prin aplicarea tratamentului termic de călire pentru punere în soluție.

După raportul dintre tangentele celor două curbe, din intervalul 30-165 minute, rezultă că sporul de rezistență adus prin nitruare în gaz este de cca. 2,67 ori mai mare decât cel realizat prin tratamentul termic de călire pentru punere în soluție de la 1060 °C, cu răcire în apă.

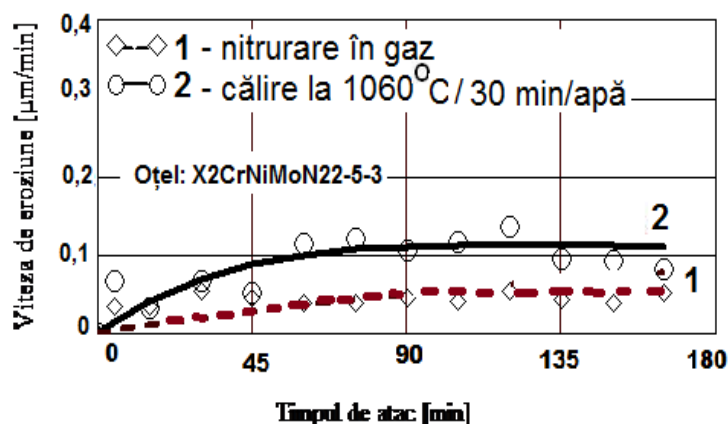


Fig. 4.7 Variația vitezei de pătrundere a eroziunii cu timpul de atac

Din evoluția curbelor de mediere a punctelor experimentale ale vitezelor de eroziune, fig. 4.7, rezultă că stratul realizat prin niturare în gaz (curba 1) are o comportare la cavitație constant superioară suprafeței epruvetei tratate termic prin călire prin punere în soluție (curba 2). De asemenea, dispersia punctelor experimentale față de curba de mediere arată că epruveta nitrurată în gaz are și o comportare omogenă din punct de vedere al folosirii energiei absorbite la impactul cu microjeturile și undele de șoc generate de implozia bulelor cavitaționale, pentru producerea deformațiilor elasto-plactice, fisurare și rupere a materialului.

Stabilizarea vitezei de pătrundere a eroziunii, la valoarea maximă, conform cercetărilor realizate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara [18], [75], [33], [38], [68], [150] dar și al celor obținute de Garcia - Hammitt [21], [22], [65], [66], Frank și colaboratorii [48], [49], Steller [152], [153], [154] arată că rezistența suprafeței oțelului Duplex nitrurat în gaz la eroziunea prin cavitație este specifică oțelurilor cu comportări și rezistențe foarte bune.

Comparând valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza de pătrundere a eroziunii cu cea a oțelului tratat termic prin călire pentru punere în soluție (curba 2) rezultă, de asemenea, o creștere a rezistenței de cca. 2,6 ori, similar raportului dintre tangentele la curbele MDE(t), din fig. 4.6.

### 4.3. Rezultatele examinărilor sclerometrice și de rugozitate

În fig. 4.8 este redată curba gradient de duritate pe secțiunea transversală a probelor nitrurate, remarcându-se faptul că, duritatea maximă a suprafeței se situează la valori medii de cca. 630 – 640 HV0.5, iar cea a miezului este de 280 – 305 HV0.5, fiind corespunzătoare tratamentului de călire pentru punere în soluție. Se apreciază că adâncimea stratului nitrurat, considerată ca fiind distanța de la suprafață până la zona cu o duritate ușor superioară celei a miezului, a fost de cca. 0,12 mm.

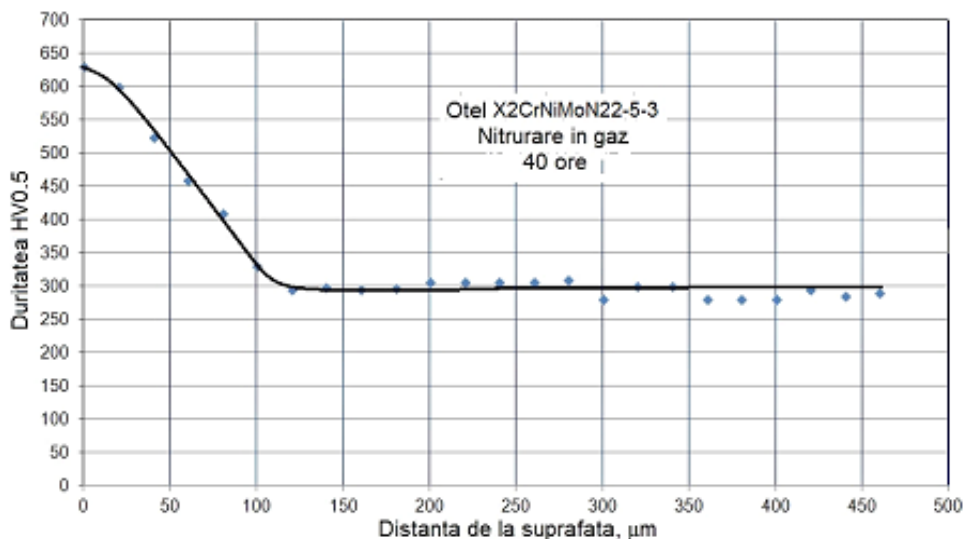
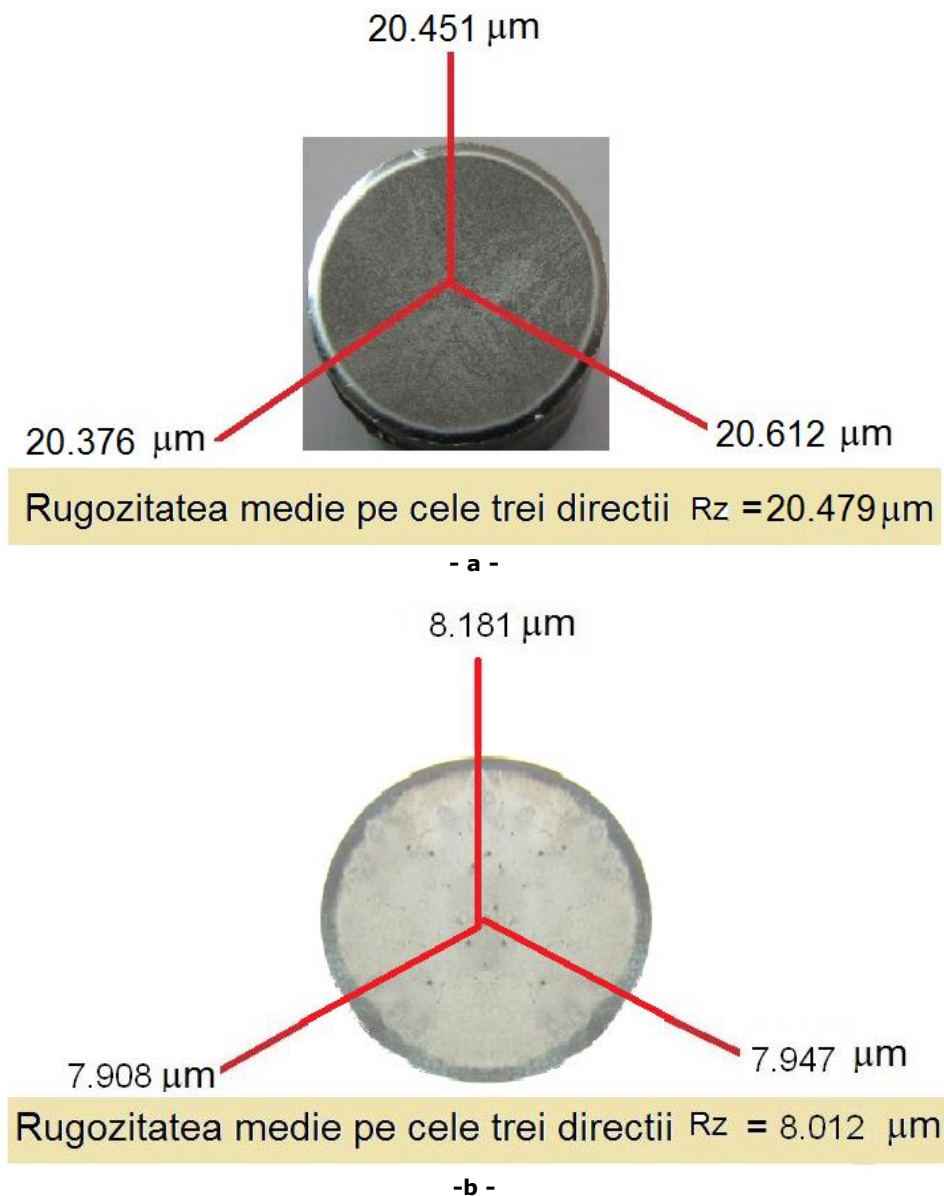


Fig.4.8 Variația durității cu microsarcini în funcție de distanța de la suprafață



Rezistența la cavitația vibratoare, mai bună a suprafeței nitrurate în gaz, în comparație cu cea supusă tratamentului termic de călire pentru punere în soluție, este confirmată și de rugozitatea medie  $R_z$ , măsurată cu aparatul Mitutoyo după trei direcții (dispuse la aproximativ  $60^\circ$  una față de cealaltă), (fig. 4.9), care este de cca. 2,55 ori mai mică. Și aceste măsurători de rugozitate, asociate denivelărilor create de microjeturi în suprafața cavitată ilustrază rezistența diferită a diverselor zone ale suprafeței, ca o expresie a constituției structurale de la începutul cavitației și modificată pe parcursul atacului.

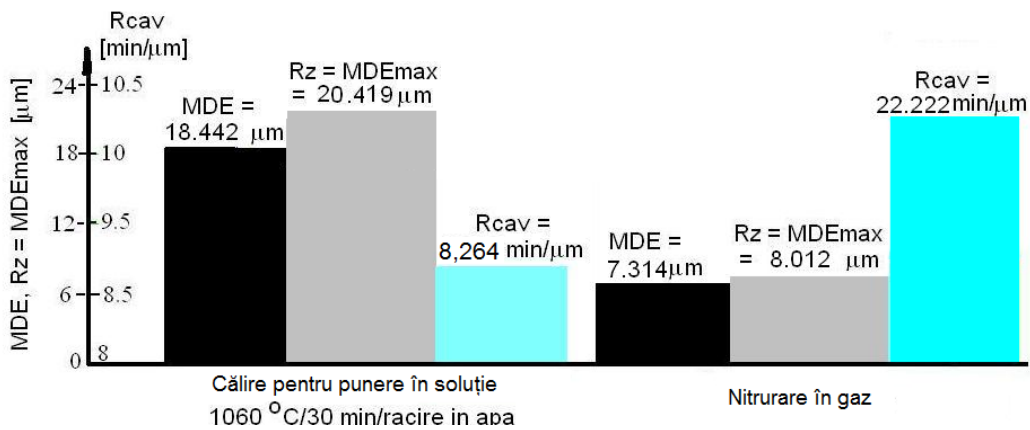


**Fig. 4.9** Valorile rugozității pe suprafața erodată de cavitație, timp de 165 minute: a- probe călite pentru punere în soluție; b- probe nitrurate

În fig. 4.10 este realizată o comparație a parametrilor caracteristici pentru a arăta o diferență clară de rezistență la cavitația vibratoare, creată prin cele două tehnologii de tratament (nitruare în gaz și călire pentru punere în soluție de la 1060 °C, cu răcire în apă).

Semnificațiile simbolurilor din fig. 4.10 sunt:

- parametrul rugozitate maximă Rz s-a considerat a fi egal cu adâncimea maximă a cavernei MDE max, aflată pe direcția de măsurare cu aparatul Mitutoyo;
- R<sub>cav</sub> reprezintă rezistența la cavitație, dată de inversul valorii spre care tinde să se stabilizeze viteza de pătrundere a eroziunii MDER [6].



**Fig. 4.10** Corelația dintre parametrii eroziunii prin cavitație

După valorile lui R<sub>cav</sub>, rezultă că prin nitruare în gaz rezistența la eroziunea cavitației crește cu cca.9 %, iar adâncimea medie de pătrundere a eroziunii se reduce cu cca. 152%.







Din fig. 4.10 se observă că, la probele călite pentru punere în soluție, rugozitatea maximă Rz (respectiv adâncimea maximă MDEmax) este inferioară celei medii MDE, pe când la cea nitrurată în gaz situația este inversă. Această situație este firească, deoarece, în cazul probei călite pentru punere în soluție, cea mai adâncă cavernă din suprafața cavitată nu s-a întâlnit pe direcția de măsurare, în timp ce la proba nitrurată în gaz s-a depistat o cavernă cu adâncimea mai mare decât cea medie calculată cu relația (2). Cele două situații arată complexitatea mecanismului de producere a eroziunii în diversele zone ale suprafețelor, sub impactul cu microjeturile și undele de șoc generate de implozia bulelor cavitaționale.

#### 4.4. Analize micrografice (MO + Topo + EDX)

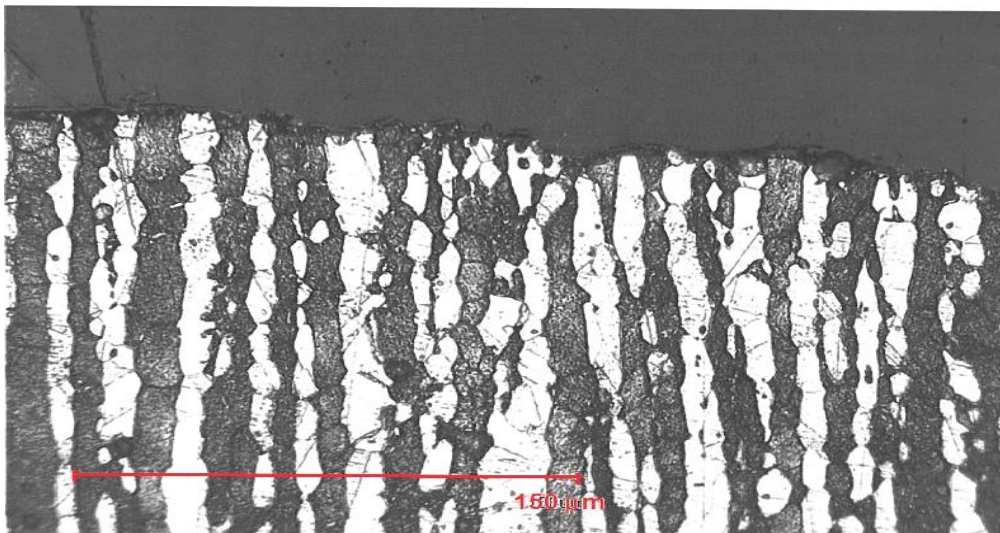
Rezistența mai mare la atacul cavitației, pe durata testării este confirmată și de imaginile suprafeței erodate, prezentate în tabelul 3.1, după 90 și respectiv 165 minute de atac al cavitației. Se remarcă modul florar de degradare a suprafeței nitrurate în gaz, diferit de cel al suprafeței probei călite, care este una aproximativ circulară. Explicația este dată de neomogenitatea dispersiei dunității în stratul nitrurat, microzona mai dură fiind greu de distrus prin eroziune. Totodată, se observă caverne produse aleatoriu în suprafața nitrurată, spre deosebire de

degradarea suprafeței probei călite care este mai omogenă cu pittingurile uniform dispersate în toată suprafața erodată. Acest mod de distrugere este explicat de morfologia transformărilor care, sub impactul microjeturilor și undelor de șoc, se produc în structura suprafeței.

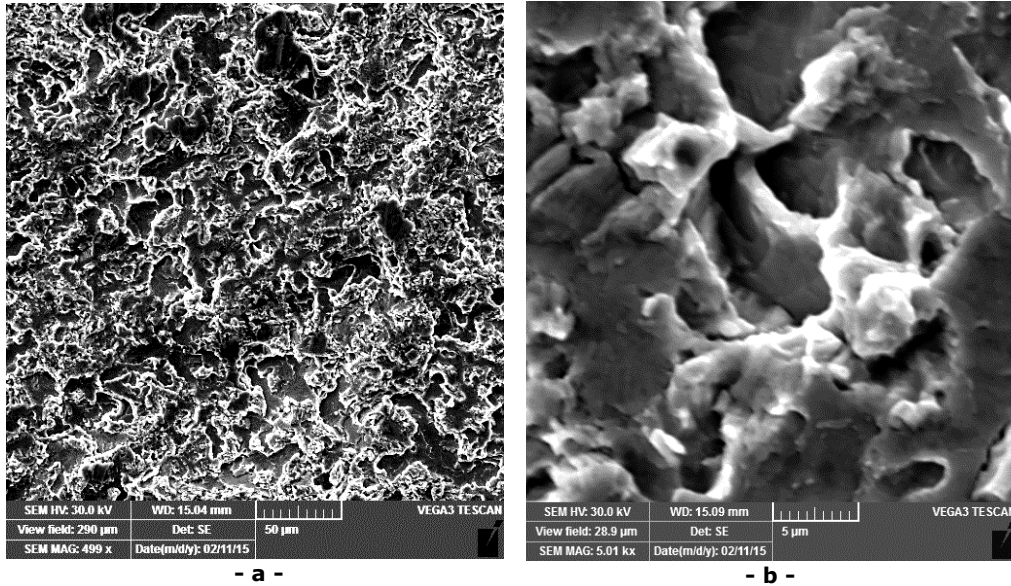
**Tabel 4.1** Imagini ale suprafeței erodate după tratamentele aplicate

Tratament aplicat	Durata de atac cavitațional		
	0	90	165
Călire pentru punere în soluție			
Nitrurare în gaz			

Imaginile micrografice redată în fig. 4.11 și 4.12 arată că degradarea suprafeței nitrurate se amorsează și se dezvoltă cu preponderență pe interfețele dintre ferită și austenită, dar cu o intensitate mai redusă, respectiv apar cavități mai mici ca dimensiuni, comparativ cu starea structurală obținută prin călire pentru punere în soluție.

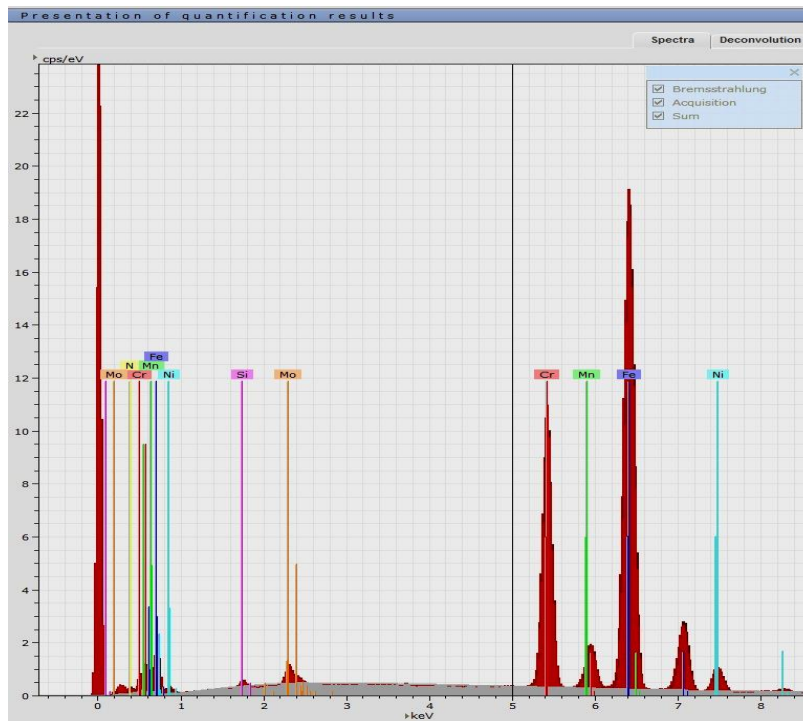


**Fig. 4.11** Microstructura unei secțiuni longitudinale prin zona cavitată timp de 165 min

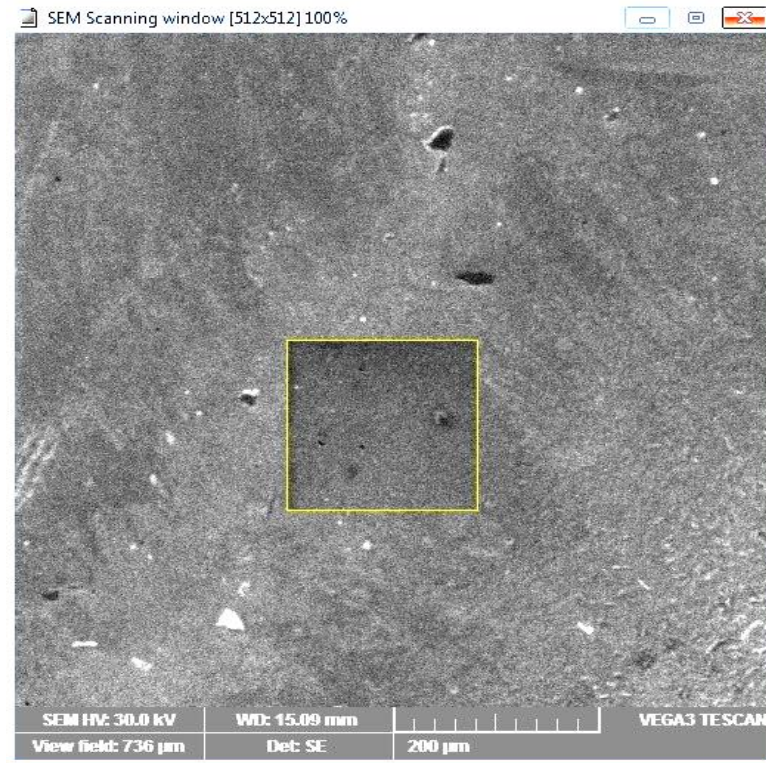


**Fig. 4.12** Topografia suprafeței nitruate și cavitare timp de 165 min: a- x 500; b – x 5000

Analizele EDX ale unor microvolumine de material din stratul nitruat, înainte și după încercările de eroziune prin cavitație (fig. 4.13 și 4.14), demonstrează că nu se produc modificări semnificative ale compoziției chimice prin cavitație.



**- a -**

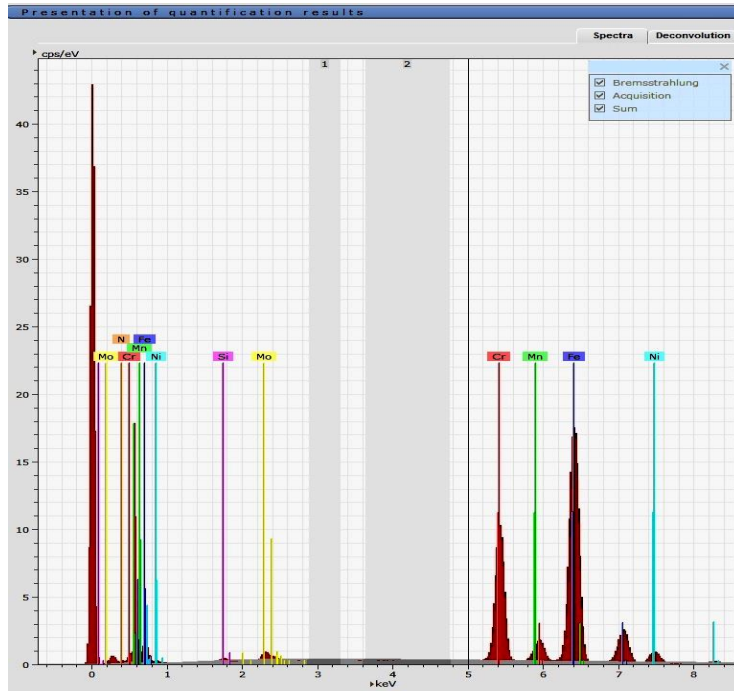


- b -

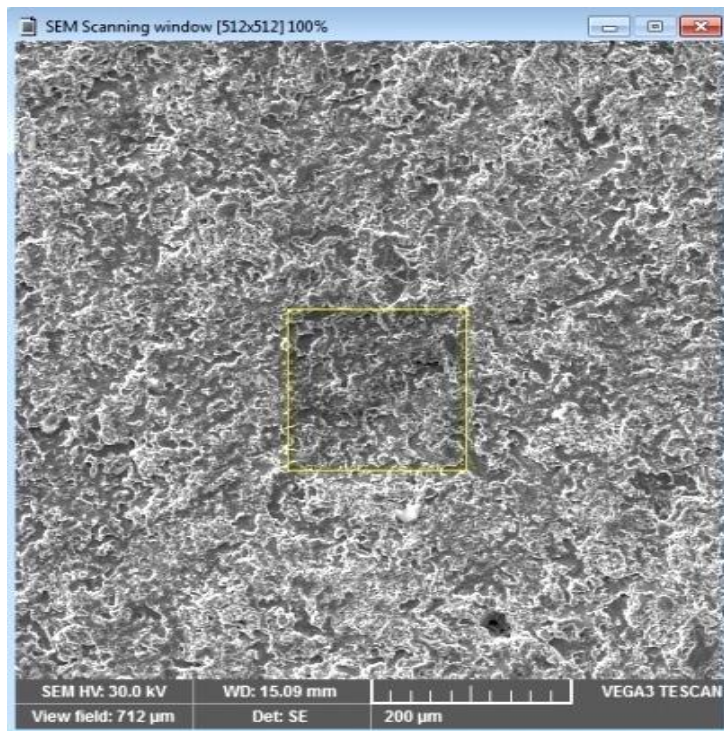
<b>Results</b>					
		Primary energy		30.0 keV	
		Tilt angle		0.0°	
	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Chromium	K series	22.13	22.16	21.56	0.60
Manganese	K series	0.82	0.82	0.76	0.05
Iron	K series	64.27	64.35	58.29	1.65
Nickel	K series	4.54	4.55	3.92	0.14
Silicon	K series	0.49	0.49	0.88	0.05
Nitrogen	K series	3.42	3.43	12.37	0.67
Molybdenum	K series	4.20	4.21	2.22	0.23
<b>Total</b>		<b>99.88</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

- c -

**Fig. 4.13** Investigații spectrografice ale probei nitrurate în gaz și necavitate:  
 a - spectrele de difracție; b- imagine SEM a zonei investigate;  
 c - concentrația elementelor chimice



- a -



- b -

Results					
		Primary energy		30.0 keV	
		Tilt angle		0.0°	
	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Chromium	K series	23.70	22.67	21.78	0.65
Manganese	K series	0.94	0.90	0.82	0.05
Iron	K series	68.15	65.18	58.32	1.75
Nickel	K series	4.66	4.46	3.79	0.15
Silicon	K series	0.57	0.54	0.97	0.06
Molybdenum	K series	2.73	2.61	1.36	0.17
Nitrogen	K series	3.80	3.63	12.95	0.74
	<b>Total</b>	<b>104.55</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

- c -

**Fig. 4.14** Investigații spectrografice ale probei nitrurate în gaz și cavitate:  
a-spectrele de difracție; b- imagine SEM a zonei investigate;  
c - concentrația elementelor chimice

#### 4.5. Nitrurare cu fascicul laser

Nitrurarea cu fascicul 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 [39], [68], [75] 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.

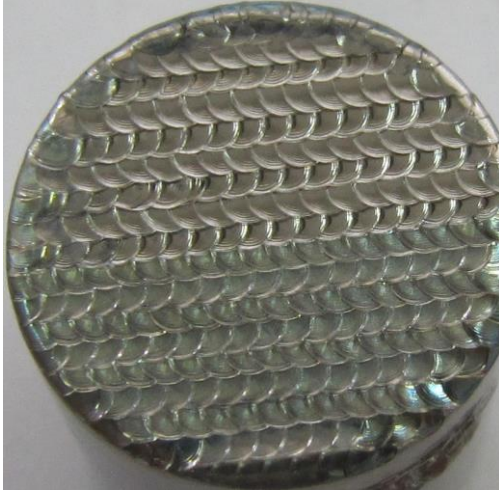
Parametrii de proces ai laserului ca: puterea, frecvența pulsului, diametrul spotului razei pe suprafața piesei de prelucrat, viteza transversală a piesei sau a radiației laser, presiunea gazului folosit, cât și puritatea gazului au un puternic efect asupra tratamentului de nitrurare.

Cu toate acestea, majoritatea parametrilor sunt asociați cu intensitatea puterii impulsului laserului pe suprafața piesei, prin urmare, investigarea procesului de nitrurare laser cu gaz și influența intensității impulsului asupra calității suprafeței nitrurate devine esențială. Concentrația de azot în secțiune este influențată de debitul de azot, de energia pulsului laser și de profilul pulsului [39], [68].

#### 4.6. Determinarea curbelor de cavitație

Suprafețele frontale ale epruvetelor destinate cercetării comportării și rezistenței la cavitație, au suferit un tratament termochimic de nitrurare (fig. 4.15) cu ajutorul unui laser pulsant programabil Nd-YAG, ce dotează standul Trumpf HL 124 P LCU (fig. 4.16).

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



**Fig. 4.15** Epruvetă nitrurată cu laser la 240W



**Fig. 4.17** Imaginea de lucru cu aparatul vibrator



**Fig. 4.16** Standul experimental

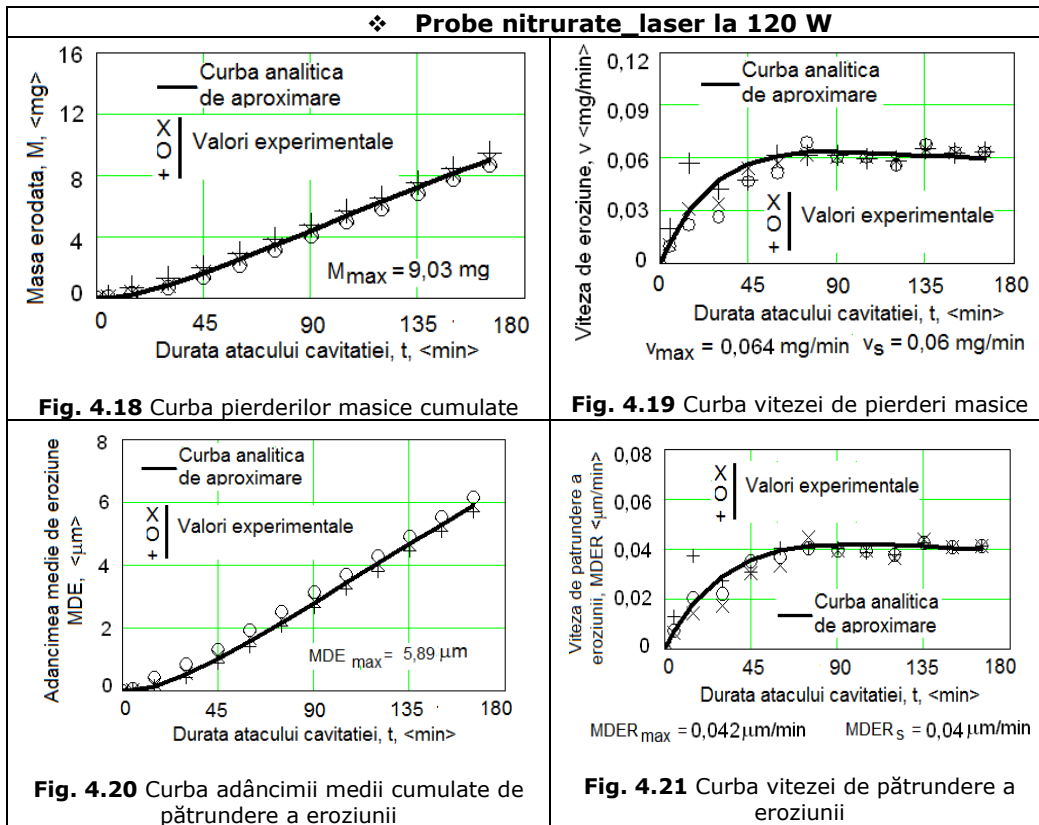
Fasciculul laser a baleiat pe suprafața probelor cu o viteză de 4.07 mm/s, timp de 10 ms, într-o atmosferă de azot pur cu un debit de 33 l/min. Puterea în impuls a fost diferită, în funcție de regimul ales, astfel:

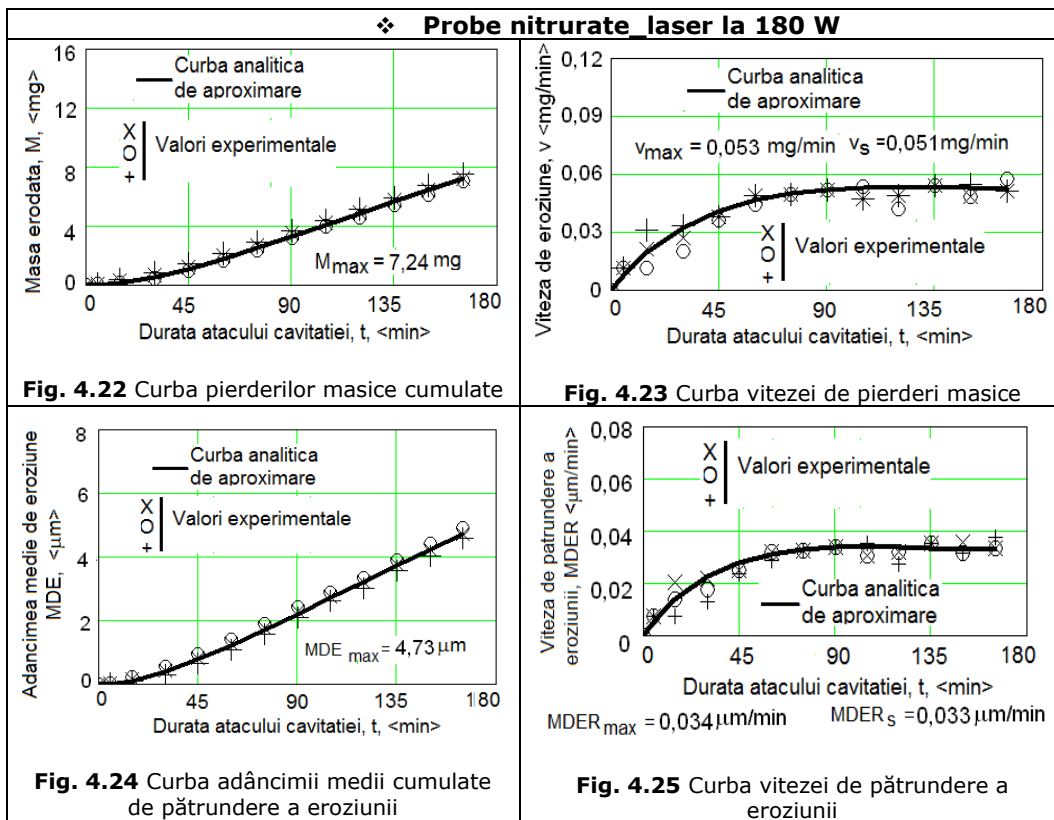
- primul set de probe a fost expus la 240 W;
- al doilea set de probe, la 180 W;
- al treilea set de probe a fost expus la 120 W.

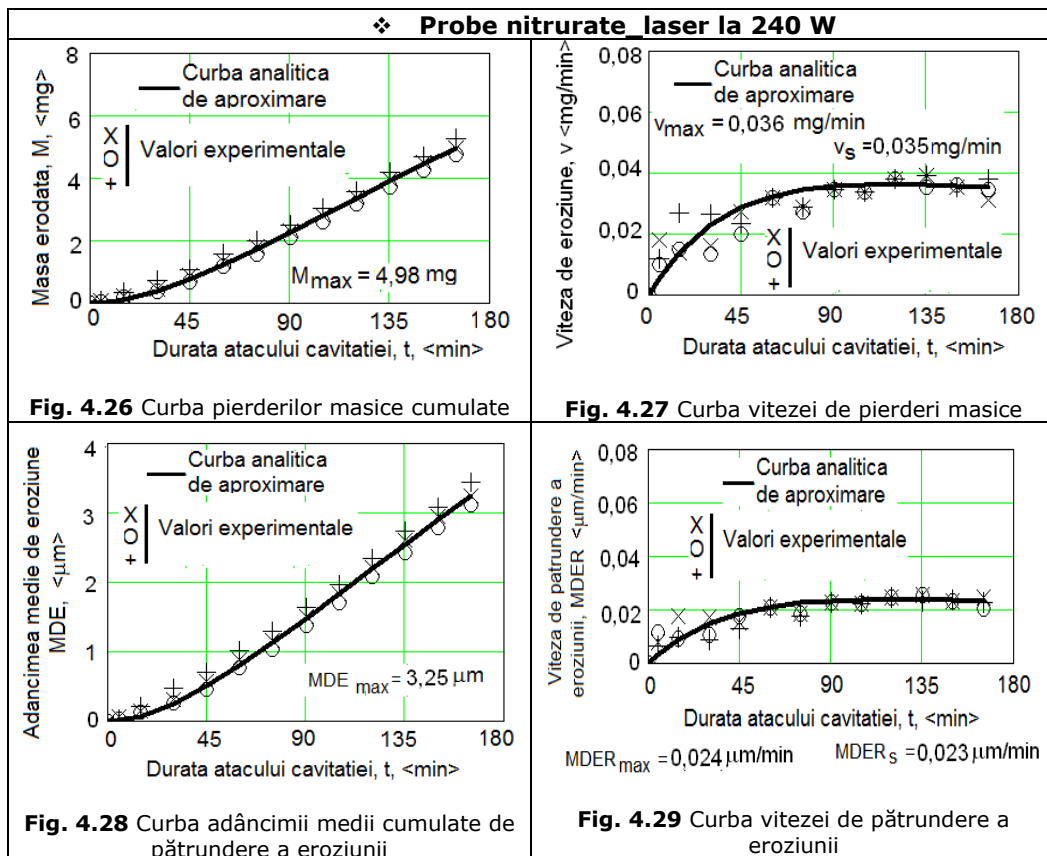


În vederea analizării efectului produs de tratamentul termochimic asupra rezistenței la cavitație, probele tratate au fost supuse unui atac cavitațional controlat (în perioade de timp distincte, conform cutumei Laboratorului [81], [98], [149], [165], din durata totală de 165 minute de expunere la implozia bulelor cavitaționale) pe standul experimental utilizat și la incercările anterioare (fig. 4.17).

Pentru a trasa curbele specifice eroziunii cavitaționale  $M(t)$  și  $v(t)$ , după fiecare perioadă de testare, (fig. 4.18...4.29), a fost determinată valoarea masei erodate, cu ajutorul unei balanțe analitice de mare precizie, model ZATCŁADY.







Pe baza pierderilor masice înregistrate la finalul fiecărei perioade de testare (de 5, 10 și 15 minute), prin utilizarea relațiilor cunoscute [81], [98], [149] au fost determinate valorile adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii, MDE, respectiv vitezelor medii de pătrundere a eroziunii, MDER, aferente fiecărui interval și au fost trasate curbele de mediere MDE(t) și MDER(t) redată în fig. 4.30 și 4.31.

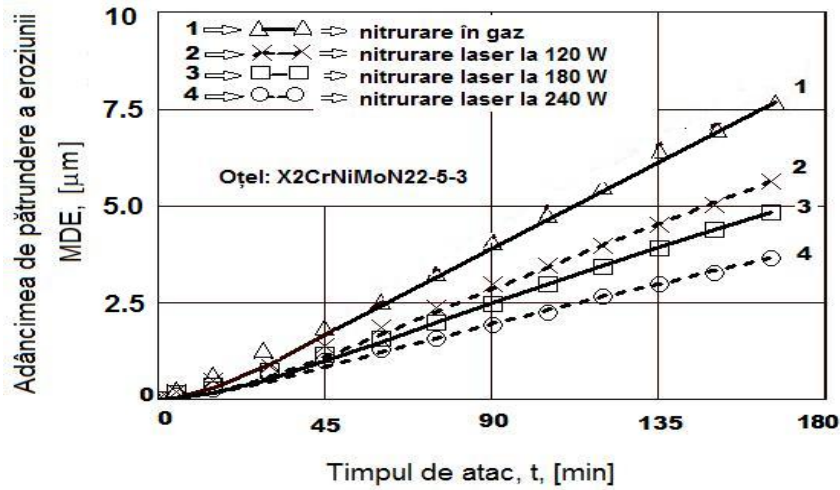


Fig. 4.30 Variația adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitațional

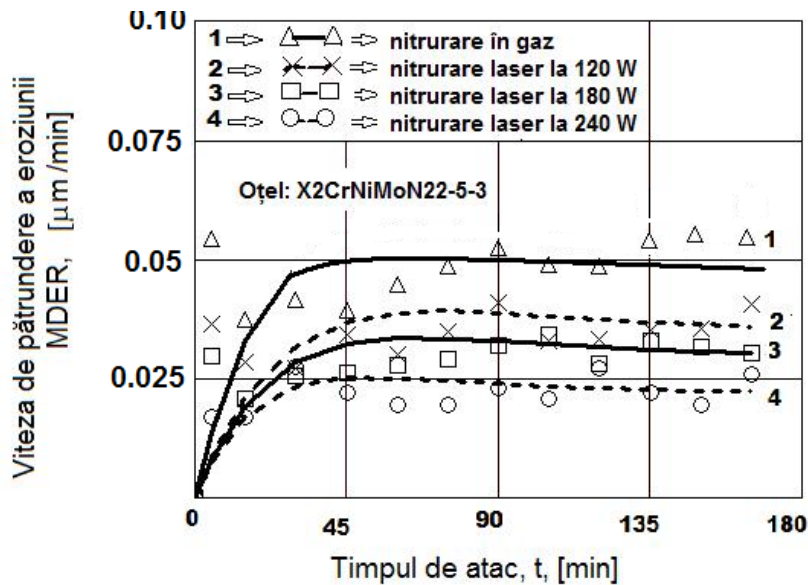


Fig. 4.31 Evoluția vitezei de pătrundere a eroziunii cu timpul de atac

Analiza diagramelor din fig. 4.30 și 4.31 permite următoarele observații:

- curbele de mediere construite cu relațiile specifice [5], [10], [68] au evoluții specifice suprafețelor cu foarte bună și excelentă rezistență la cavitație, [5], [11], [14], [158];
- 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%.

#### 4.7. Rezultate privind microstructura și proprietățile mecanice

După fiecare perioadă de atac cavitațional au fost efectuate imagini ale suprafeței testate utilizând un aparat de fotografiat Canon Power Shot SX200 IS. Rezultatele obținute sunt prezentate în fig. 4.32 și ele evidențiază maniera în care se extind fenomenele de degradare a suprafeței.

Se poate remarca faptul, că pe măsura creșterii duratei de atac, suprafețele devin tot mai mătuite, iar vârfurile striățiunilor sunt diminuate. Totuși, se vede efectul durtății create prin raza laser după cele 165 minute de atac; forma striată rămâne, grosimea stratului nitrurat cu fascicul laser nefiind depășită, fenomen bine evidențiat în fig. 4.33, 4.34 și 4.35.



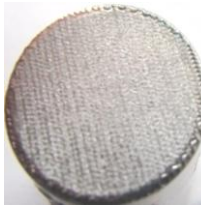









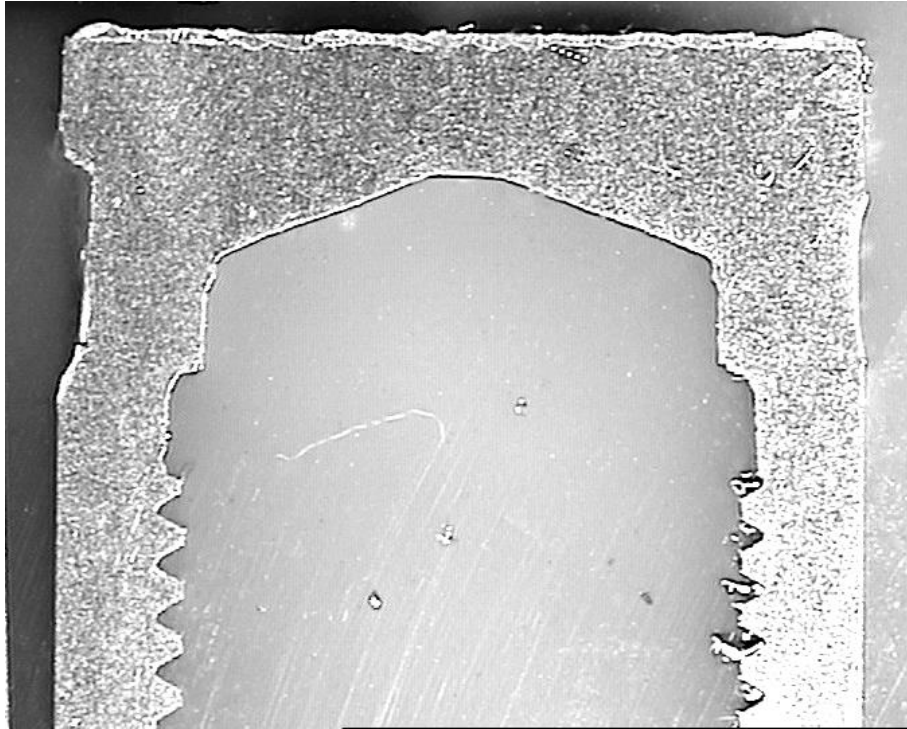
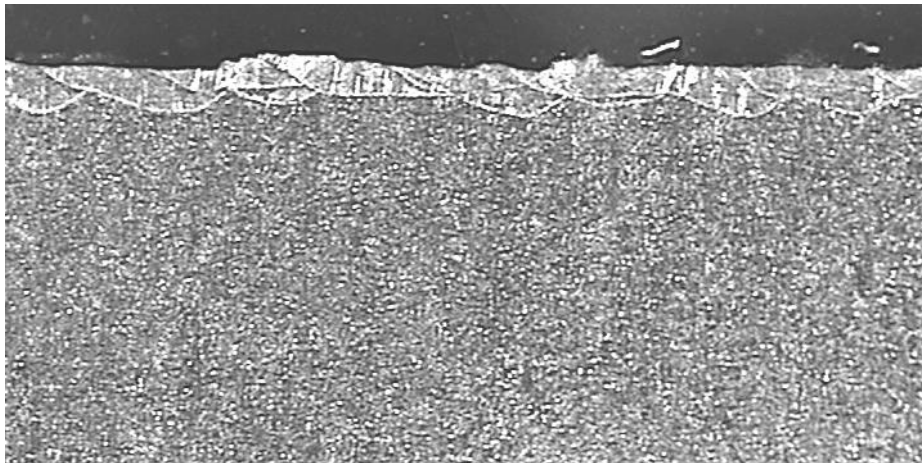
Tratamente	Durata de atac cavitațional			
	0	60	90	165
Nitrurare laser la 120 W				
Nitrurare laser la 180 W				
Nitrurare laser la 240 W				

Fig. 4.32 Imaginile macrografice ale suprafețelor testate la diverse perioade de timp

În fig. 4.33 – 4.35 se exemplifică imaginile macro – și microstructurale ale sistemului strat – substrat pentru condițiile experimentale de tratament cu fascicul laser.

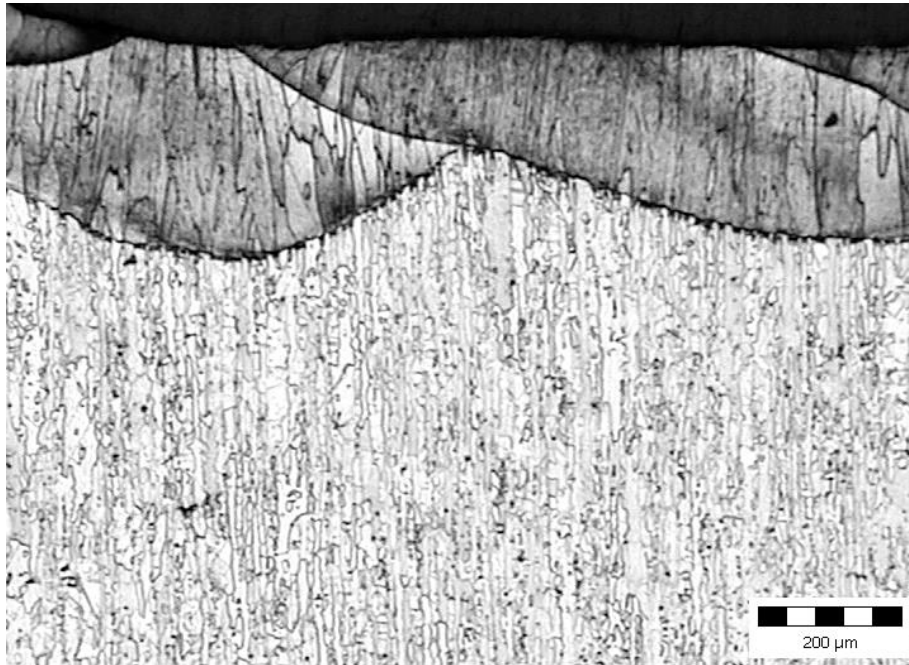


- a - x 8

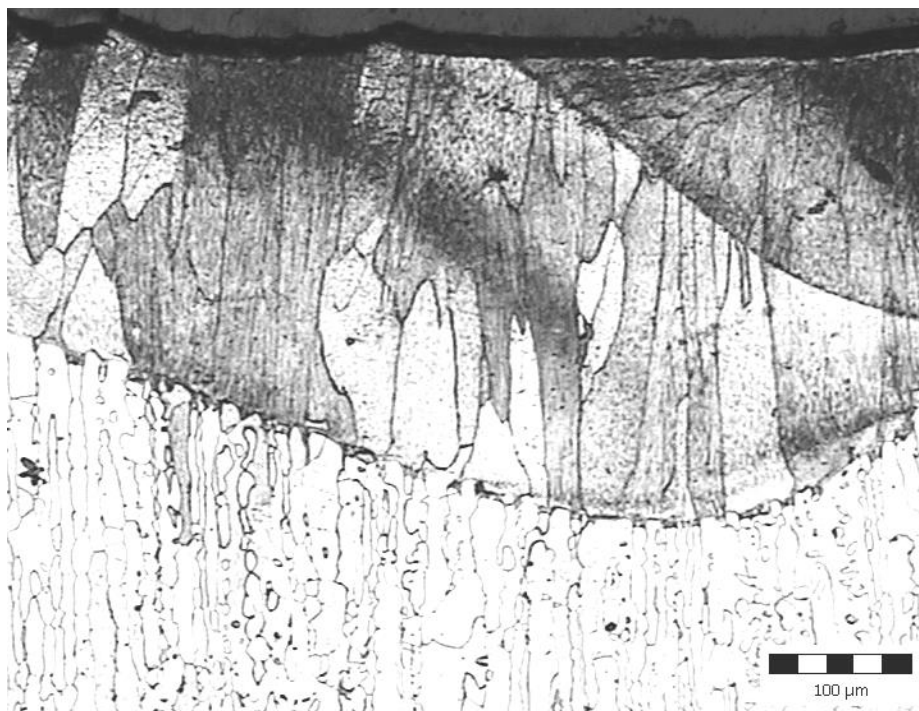


- b - x 40

**Fig. 4.33** Imaginea macrografică a unei secțiuni transversale prin proba de cavitație nitrurată cu laser

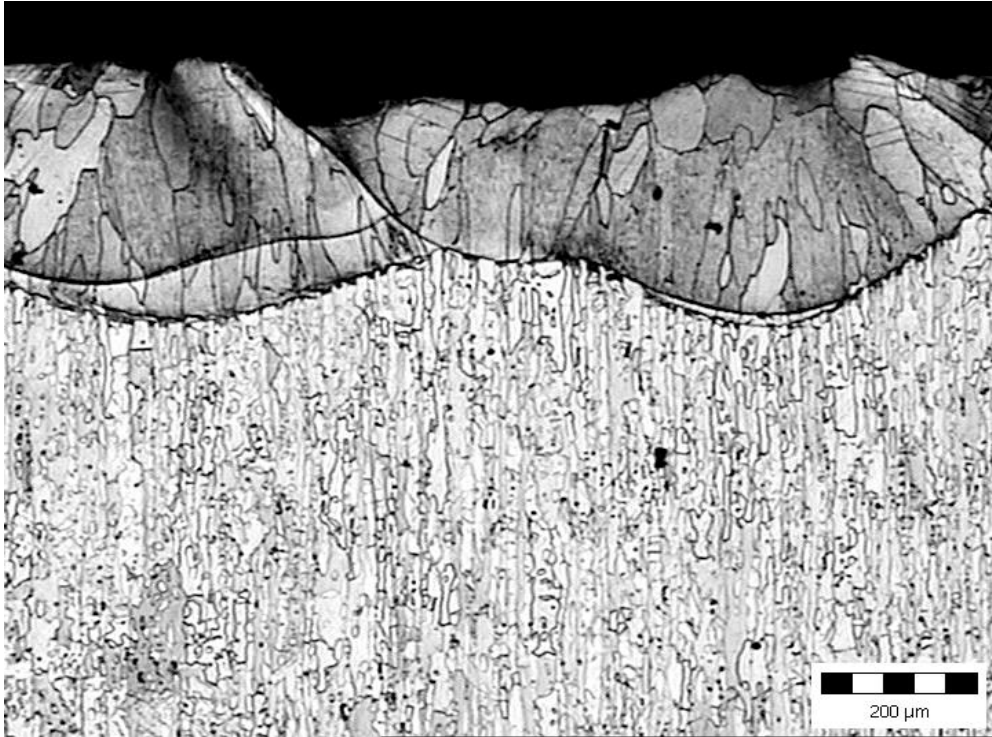


- a -

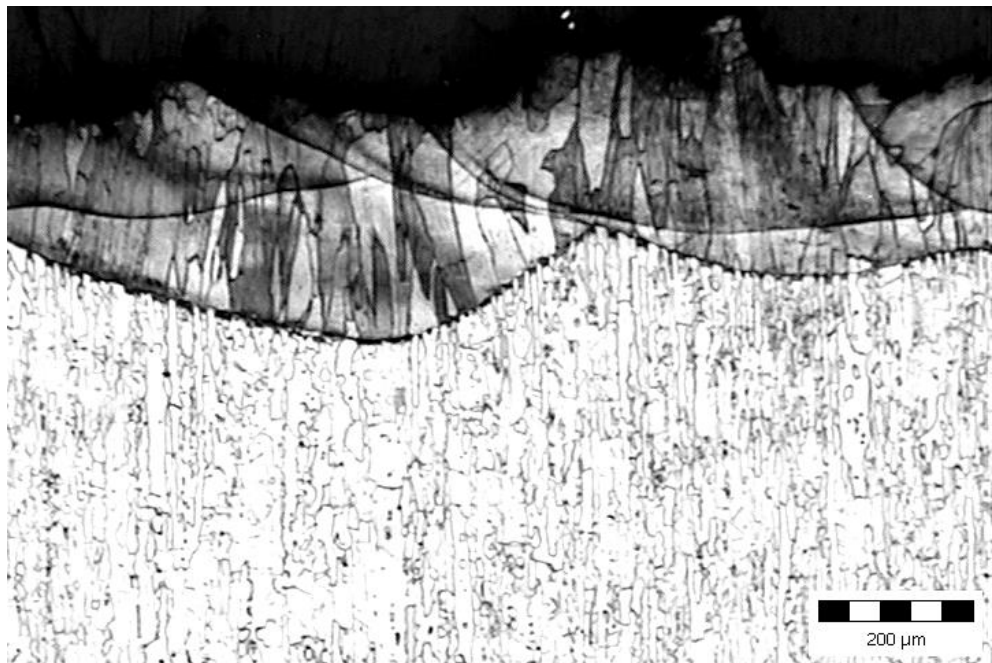


- b -

**Fig. 4.34** Imaginea micrografică a unei secțiuni transversale prin proba nitrurată și necavitată

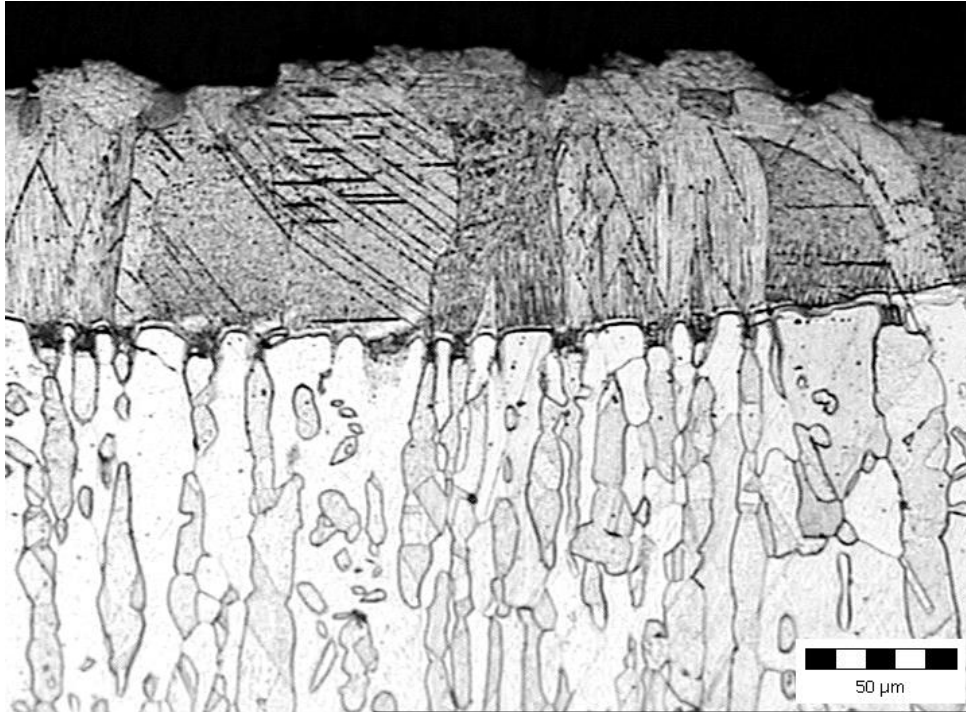


- a -



- b -





- c -

**Fig. 4.35** Imaginea micrografică a unei secțiuni transversale prin proba nitrurată și ulterior cavitată

Din fig. 4.33 se poate observa că stratul de suprafață are o bună legătură metalurgică cu materialul de bază și că nu se semnaleză defecte de continuitate metalică de tipul porozităților, fisurilor, incluziunilor de zgură sau lipsei de topire.

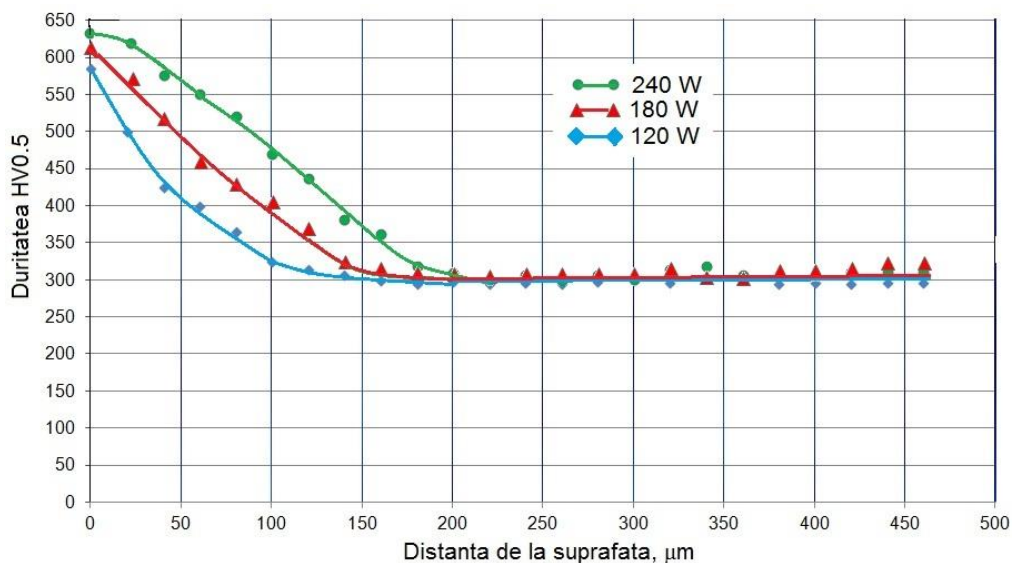
În cursul procesului de tratament are loc topirea unei porțiuni din materialul de bază. Răcirea cu viteză mare a zonei topite face ca lichidul îmbogățit în azot să atingă mai întâi temperatura de solidificare în porțiunile aflate în contact cu marginile grăunților solizi ai materialului de bază. În consecință, structura de cristalizare primară începe să se dezvolte de la acești grăunți, de o manieră columnară. În acest fel se justifică creșterea epitaxială a grăunților cristalini în zona topită (fig. 4.34).

La formarea microstructurii de cristalizare apar două fenomene contradictorii. Astfel, la temperatura punctului critic  $A_4$  probele prezintă o structură formată numai din ferită  $\delta$ . Aplicarea unei viteze mari de răcire deplasează spre valori mai coborâte temperatura de început, de transformare polimorfă  $\delta \rightarrow \gamma$ , respectiv proporția de ferită  $\delta$  rămasă netransformată până la temperatura camerei este mai mare. Pe de altă parte, cantitatea de austenită care se formează din ferită depinde de compoziția chimică a zonei topite. Se știe că dintre elementele de aliere, Cr și Mo sunt formatoare de ferită, iar Ni și N sunt formatoare de austenită. Concentrația ridicată în N ridică temperatura la care începe să se formeze austenita din ferită, adică favorizează creșterea proporției de austenită. În plus, datorită unui conținut redus în carbon și a alierii suplimentare cu N va apare o tendință scăzută la precipitarea fazelor secundare de tipul carburilor  $M_{23}C_6$ , nitrurilor  $Cr_2N$ ,  $CrN$ , fazei  $\sigma$  și fazei  $\chi$ . Prin urmare, chiar la viteze mari de răcire, o asemenea compoziție

chimică face ca echilibrul cantitativ al celor doi constituenți microstructurali (A și F) să poată fi aproape atins.

Examinarea prin microscopie electronică cu baleiaj a stratului de suprafață degradat prin eroziunea cavitației (fig. 4.35) arată că 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 (fig. 4.35 c).

Curba de repartiție a microdurității pe secțiunea probelor nitrurate la diverse valori ale puterii în impuls a laserului este arătată în fig. 4.36.



**Fig. 4.36** Variația durității cu microsarcini în funcție de distanța de la suprafață

Urmare a alierii cu azot, ambele soluții solide (F și A) sunt mai dure și implicit mai rezistente la solicitările de eroziune prin cavitație.

Microduritatea suprafeței atinge valori de 590...640 HV0.5, iar cea a miezului piesei este cea specifică tratamentului termic de călire pentru punere în soluție, respectiv de cca. 280...300 HV0.5. Varierea puterii în impuls a fasciculului laser nu provoacă schimbări ale durității maxime atinse la suprafață, ci, într-o mică măsură, doar a adâncimii stratului de difuzie (de la 0,14 mm la 0,20 mm).

#### 4.8. Evaluarea eficienței diferitelor tipuri de tratamente asupra rezistenței la cavitație

Datele prezentate în tabelul 4.2 evidențiază clar faptul că aplicarea unor tratamente termochimice acestui tip de oțel îi conferă o rezistență la cavitația vibratorie mult mai mare față de aceleași probe la care s-au aplicat diferite variante de tratamente termice volumice.

**Tabel 4.2** Pierderile masice, adâncimile de pătrundere a eroziunii și curbele de mediere MDE și MDER la diferite tratamente aplicate oțelului X2CrNiMoN22-5-3

Nr. probă	Tratamente termice volumice				Tratamente termochimice			
	SC 1	SC 2	S 1	S 2	1	2	3	4
<b>Mmax</b> [mg]	23,66	29,156	30,73	21,24	11,2	24,863	14,803	17,243
<b>Vmax</b> [mg/min]	0,17	0,2	0,216	0,146	0,077	0,174	0,105	0,119
<b>Vs</b> [mg/min]	0,162	0,179	0,198	0,13	0,069	0,16	0,093	0,107
<b>MDEmax</b> [μm]	15,451	18,442	18,934	13,871	7,314	16,237	11,261	9,667
<b>MDERmax</b> [μm/min]	0,14	0,134	0,136	0,094	0,05	0,112	0,078	0,067
<b>MDErs</b> [μm/min]	0,107	0,12	0,131	0,084	0,045	0,101	0,072	0,061

**Notă:**

SC 1 – probe călite și răcite în cuptor;

SC 2 – probe călite și răcite în apă;

S 1 – probe călite, răcite în apă și sensibilizate la 475 °C;

S 2 – probe călite, răcite în apă și sensibilizate la 850 °C;

1 – probe nitrurate în gaz;

2 – probe nitrurate cu laser la 120 W;

3 – probe nitrurate cu laser la 180 W;

4 – probe nitrurate cu laser la 240 W.

$(MDErs_{laser240} - MDErs_{gaz}) \times 100 / MDErs_{laser240} = 26,23 \%$ ;

$(MDErs_{laser180} - MDErs_{gaz}) \times 100 / MDErs_{laser180} = 37,5 \%$ ;

$(MDErs_{laser120} - MDErs_{gaz}) \times 100 / MDErs_{laser120} = 55,44 \%$ .

**4.9. Concluzii**

- ❖ Pentru regimul tehnologic folosit, nitrurarea în gaz confera 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 cca. 9%, iar adâncimea medie de pătrundere a eroziunii se reduce cu cca. 152%.
- ❖ Comparativ cu tratamentul termic de calire pentru punere în soluție la care suprafața erodată este aproximativ circulară, cu pittinguri uniform distribuite, nitrurarea în gaz provoacă un mod florar de degradare a suprafeței cauzat de o dispersie relativ mare a valorilor de duritate.
- ❖ 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 cca. 81%, dacă ne raportăm la adâncimile de eroziune, respectiv cu cca. 74%, dacă ne raportăm la vitezele de eroziune.
- ❖ Durificarea celor două soluții solide, F și A, prin difuzia interstițială a azotului în rețeaua cristalină c.v.c. a Fe α, respectiv c.f.c. a Fe γ justifică

îmbunătățirea rezistenței la eroziune prin cavitație comparativ cu starea structurală de călire pentru punere în soluție.

- ❖ Varianta tehnologică de nitrurare cu fascicul laser deși nu modifică semnificativ adâncimea medie și viteza de pătrundere a eroziunii față de nitrurarea în gaz, oferă avantajul reducerii semnificative a duratei procesului de tratament și al posibilității de înlocuire facilă a stratului uzat.

Urmare a topirii unei părți din materialul de bază se asigură o bună legătură metalurgică și implicit o mare adeziune a stratului la substrat.

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

### **5.1. Introducere**

La momentul actual, în foarte multe ramuri industriale (industria aerospațială, 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]. Motivul îl reprezintă caracteristicile mecanice superioare pe care le dobândește stratul depus, ca urmare a utilizării tehnologiilor sofisticate de acoperire [89], [98], [149]. Deficiențele generate de temperaturile diferite ale metalului de bază și microstratului depus (aparitia fisurilor, exfolierea microstratului), în cazul depunerii prin pulverizare termică, care sunt inacceptabile pentru piesele exploatate în regim de cavitație sunt eliminate prin retopirea stratului cu fascicul laser.

Problema straturilor din cermeturi depuse prin pulverizare termică, și eventual urmate de retopire cu laser, o constituie forma striată/velurată care, pentru piesele ce funcționează în curenți cavitaționali (rotoare de turbine și pompe hidraulice, elici navale), reduce eficiența transferului energetic de la curent la piesă.

O altă problemă, o reprezintă compoziția chimică a stratului și carburile precipitate, care în timpul cavitației sunt ușor expulzate lăsând goluri, ce pot constitui amorse de fisuri care, cu timpul, se extind și pot adânci degradarea suprafeței piesei. Însă, dacă grosimea stratului permite o operație de prelucrare mecanică (rectificare, șlefuire, lepuire, honuire, etc.) aceste denivelări pot fi eliminate, garantându-se astfel calitatea necesară pentru un transfer energetic optim. Din acest motiv, pentru ca stratul depus și retopit cu fascicul laser să se comporte bine la atacul cavitației, este necesar ca parametrii de proces ai razei laser (puterea, frecvența de repetiție și durata pulsului, viteza de deplasare a razei pe suprafața stratului în timpul retopirii) să fie aleși și corelați riguros, astfel încât stratul să aibă neuniformitate redusă și repartizare omogenă a durtății pe toată suprafața atacată. Prin urmare, de acești parametrii de proces ai fasciculului laser depind microstraturile care fac legătura între metalul de bază și materialul depus, cu realizarea unor durtăți, respectiv rezistențe mari la rupere fragilă și la solicitări de eroziune prin cavitație [82], [98], [126].

Rezultatele cercetării, prezentate în acest capitol arată diferențele de comportare la cavitația vibratoare dintre straturile de compozit metal-ceramică depuse pe suprafața unor probe din oțel inoxidabil duplex, X2CrNiMoN22-5-3, prin următoarele două tehnici: pulverizare termică HVOF și pulverizare termică urmată de retopire cu fascicul laser în două regimuri diferite.

## 5.2. Pulberea utilizată și procedura experimentală

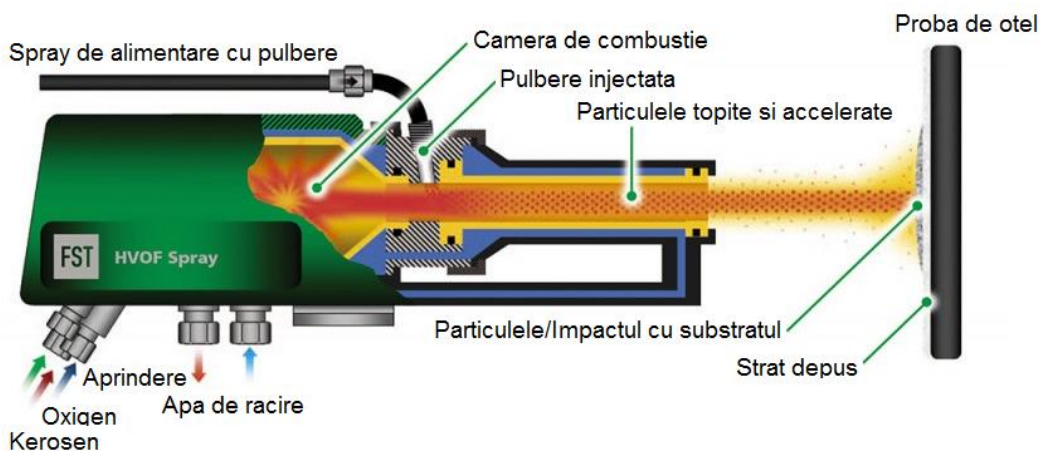
Cermetul pulverulent folosit pentru formarea straturilor supuse cavitației este Thermico WC-9Co-5Cr-1Ni, având granulație de  $-106...+45\ \mu\text{m}$ . Depunerea stratului de pulberi s-a făcut prin pulverizare termică HVOF.

La cavitație au fost testate trei tipuri de straturi. Unul a fost obținut prin pulverizare termică, iar altele două au rezultat în urma retopirii stratului pulverizat cu fascicule laser, diferențiate prin durata pulsului (de 6 și 10 ms) dar având aceleași puteri ale acestuia (150 W), aceleași frecvențe de repetiție a pulsului (10 Hz) și aceleași viteze de deplasare a razei laser (2,85 mm/s). Straturile de pulberi au fost obținute dintr-un compozit cu particule bazat pe carburi de wolfram și de crom într-un liant de cobalt și nichel.

Procedeu de pulverizare termică folosit este HVOF, (fig. 5.1 și fig. 5.2) și este potrivit pentru depunerea straturilor din pulberi ceramice rezistente la uzură și coroziune [98], [126].

În fapt, tehnica se bazează pe combinarea unor gaze de combustie care sunt injectate în camera de combustie a arzătorului la presiuni ridicate și aprinse.

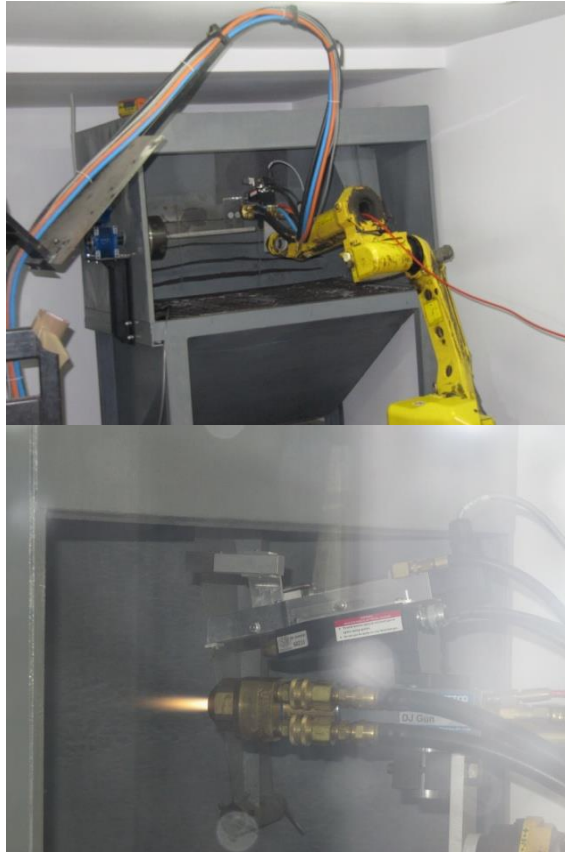
Pulberea ceramică Thermico WC-9Co-5Cr-1Ni a fost injectată în flacăra, care fiind accelerată cu viteze supersonice către substrat a condus la straturi dense, cu o porozitate mai mică de 2 %, foarte puțin oxidate și cu aspect fin.



**Fig. 5.1** Principiul procedurii HVOF de pulverizare termică [124]

Principalele caracteristici ale acestui proces sunt:

- temperatura la suprafața piesei, nu a depășit  $150\ \text{°C}$ ;
- distanța de pulverizare, 220 mm;
- debit pulbere, 63 grame/minut;
- densitatea obținută este cu porozități mai mici de 2%;
- microduritatea obținută de: 1100-1350 HV0.3;
- grosimea stratului depus, de cca. 0,3 mm.



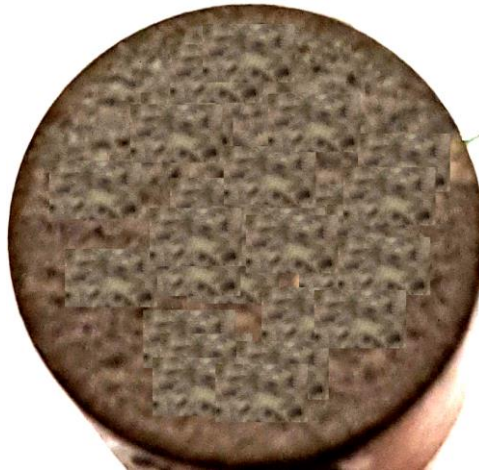
**Fig. 5.2** Instalația de pulverizare termică  
(foto: Lavinia Mădălina Micu)

În tabelul 5.1 sunt precizate gazele ce formează amestecul de combustie, precum și valorile debitului și presiunii din timpul procesului de pulverizare termică.

**Tabel 5.1** Gazele de combustie și parametrii fizici ai procesului de pulverizare HVOF

GAZ	Q [%]	P [BAR]
AZOT	20	3
PROPAN	35	65
OXIGEN	25	12
AER	40	65

Retopirea stratului de pulbere s-a realizat pe o instalație Trumpf HL 124P LCU, cu fascicul laser Nd:YAG. Datorită forței de impact cu suprafața metalică a probelor de cavitație, particulele de pulbere din jetul de plasmă se transformă din forma sferică în particule filiforme/lamelare, formând fâșii alăturate și suprapuse, fig. 5.3.



**Fig. 5.3** Aspectul suprafeței acoperite prin pulverizare HVOF

Metodologia de pregătire a probelor pentru începerea experimentelor și cea de conducere a acestora este cea prezentată în capitolele anterioare.

Pentru fiecare din cele trei regimuri tehnologice de realizare a straturilor de material compozit, au fost testate câte trei probe, în apa dublu distilată la o temperatură de 21-22 °C.

### 5.3. Evaluarea rezultatelor experimentale

Pe baza pierderilor de masă, înregistrate după fiecare perioadă intermediară de atac, s-au determinat vitezele pierderilor de masă aferente fiecărei perioade, precum și pierderile de masă cumulată, conform relațiilor:

$$v = \frac{\Delta M_i}{\Delta t_i} \quad (1)$$

$$M = \sum \Delta M_i \quad (2)$$

unde:

$i$  - este perioada intermediară de testare;

$\Delta t_i$  - durata perioadei intermediare de testare (5, 10 sau 15 minute);

$\Delta M_i$  - masa de material pierdută de stratul de pulbere prin eroziunea cavitației (în mg);

$v$  - este viteza de eroziune, respectiv viteza pierderilor de masă, corespunzătoare perioadei  $i$  (în mg/min);

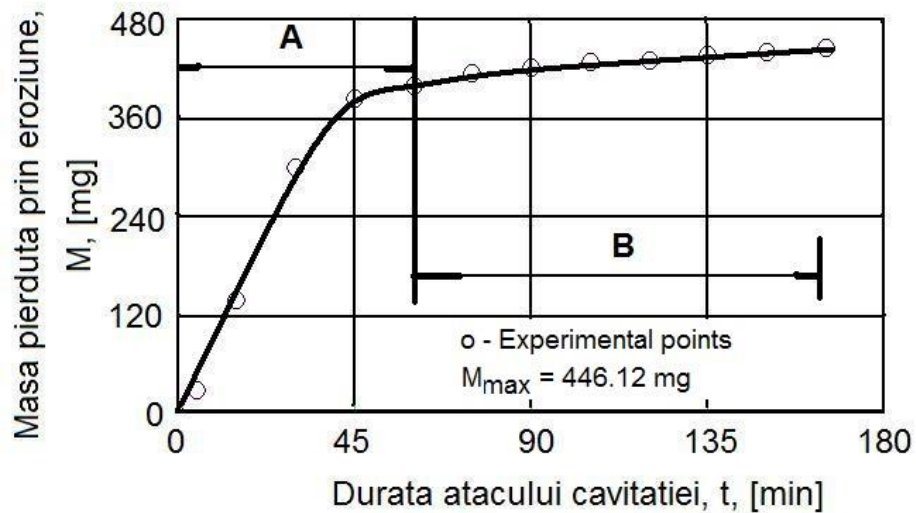
$M$  - este pierderea de masă cumulată, realizată în timpul atacului cavitației (în mg).

În diagramele din fig. 5.4, 5.5 și 5.6 sunt date evoluțiile pierderilor de masă și vitezele de eroziune, care arată comportarea și rezistența pe care le-au avut straturile depuse, prin cele trei variante tehnologice. Punctele experimentale din cele

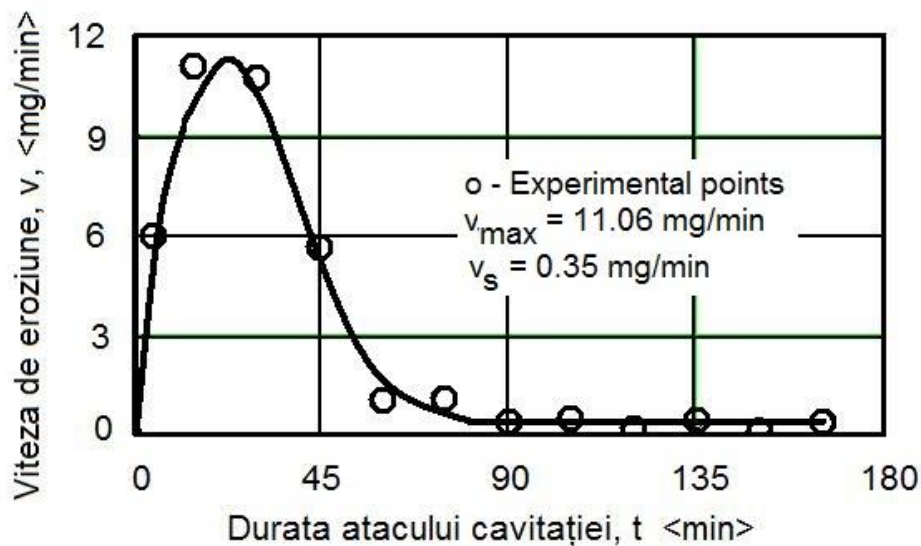


6 diagrame sunt valorile medii ale celor obținute pe setul de trei probe al fiecărei variante de proces.

Pentru a putea face o analiză a evoluției comportării straturilor la impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate la implozia bulelor de cavitație, în diagramele din fig. 5.4, 5.5 și 5.6, sunt construite și curbele de mediere a punctelor experimentale.

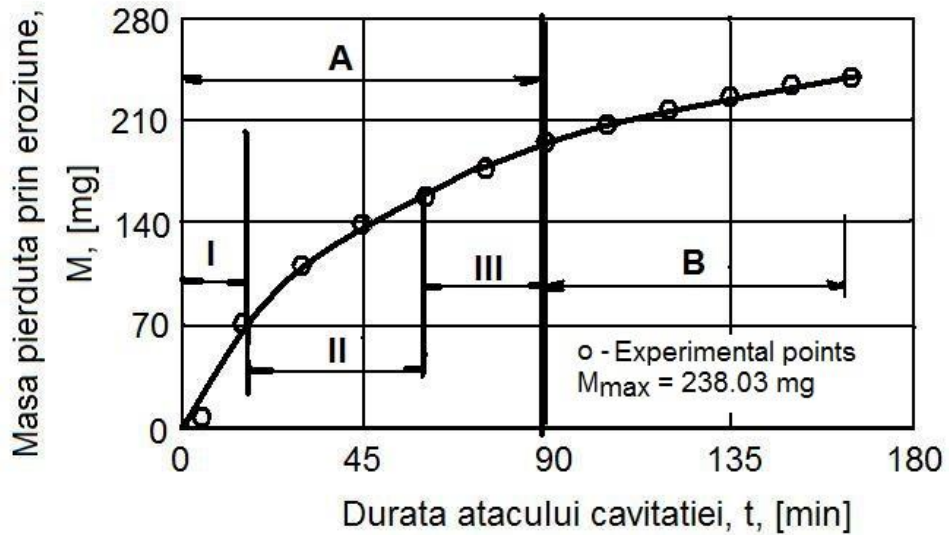


- a -

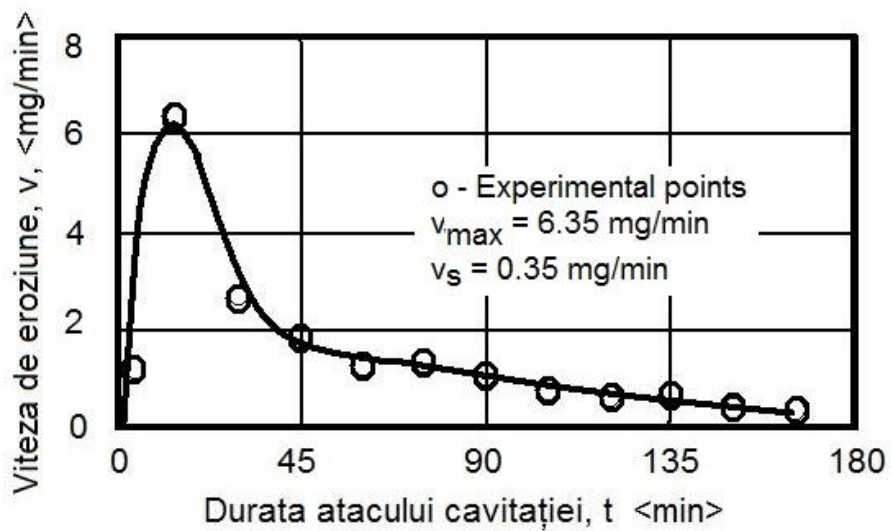


- b -

**Fig. 5.4** Evoluția pierderii de masă și a vitezei de eroziune (strat realizat prin pulverizare termică):  
a - pierderea de masă; b - viteza de eroziune

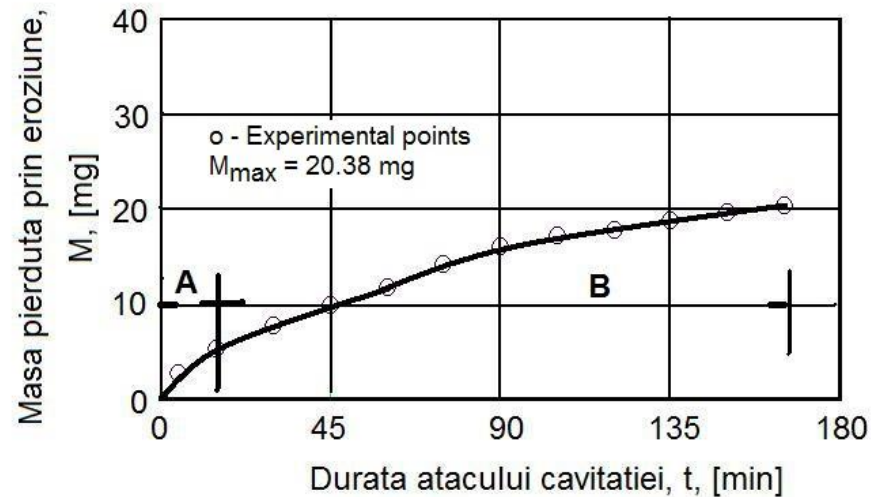


- a -

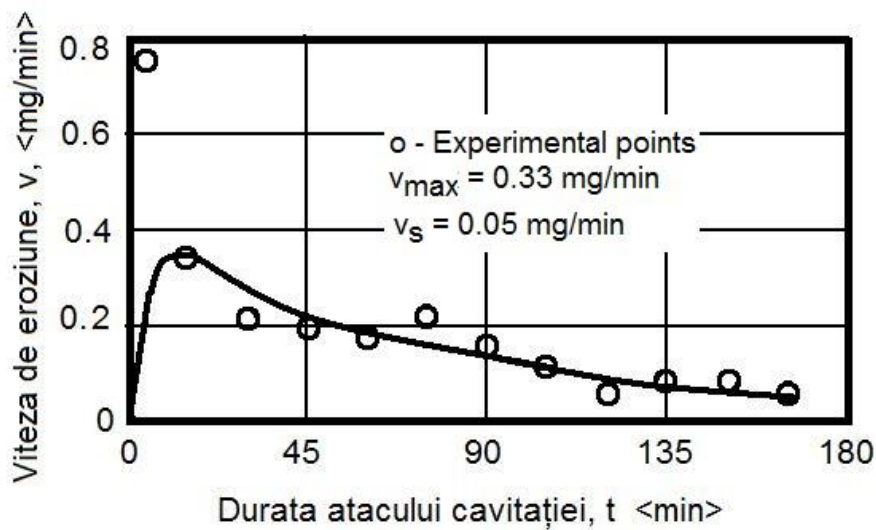


- b -

**Fig. 5.5** Evoluția pierderii de masă și a vitezei de eroziune (strat realizat prin pulverizare termică și retopire cu fascicul laser cu durata pulsului de 6 ms): a - pierderea de masă; b - viteza de eroziune



- a -



- a -












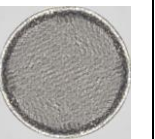






**Fig. 5.6** Evoluția pierderii de masă și a vitezei de eroziune (strat realizat prin pulverizare termică și retopire cu fascicul laser cu durata pulsului 10 ms):  
a - pierderea de masă; b - viteza de eroziune

La finalul fiecărei perioade intermediare a testului de cavitație, suprafețele cavitate au fost fotografiate, examinate cu ochiul liber și la microscopul optic. În tabelul 5.2 sunt prezentate evoluțiile degradării straturilor de acoperire la cei mai semnificativi timpi. În fig. 5.7, 5.8 și 5.9 sunt date imagini ale degradării suprafețelor atacate, în zonele periferice și centrale. Aceste imagini, corelate cu pierderile masice și vitezele de eroziune, din fig. 5.4...5.6, asigură înțelegerea comportării și rezistenței superioare a stratului pulverizat termic și retopit cu

fasciculul laser, a cărui durată în puls a fost 10 ms, în raport cu regimul de retopire la care durată în puls a fost de 6 ms. De asemenea, se remarcă necesitatea retopirii cu fascicul laser a stratului depus HVOF.

Imaginile din tabelul 5.1 și fig. 5.7 arată clar că stratul depus prin pulverizare termică fără retopire este cu ușurință distrus de microjeturile, rezultate în timpul cavitației prin implozia bulelor. Aderența la metalul de bază, dar și legătura dintre lamelele particulelor de carburi este ușor distrusă de cavitație, degradarea începând încă din momentul atacului, dezvoltându-se cu rapiditate în toată suprafața expusă, îndepărtând, în scurt timp, întregul strat de acoperire.

**Tabel 5.2** Evoluția în timp a degradării stratului din compozit metal-ceramică

0 min	5 min	45 min	60 min	105 min	165 min
Probe acoperite HVOF cu pulberi ceramice					
					
Strat pulverizat termic și retopit cu fascicul laser, cu durata de impuls de 6 ms					
					
Strat pulverizat termic și retopit cu fascicul laser, cu durata de impuls de 10 ms					
					



**Fig. 5.7** Imagini ale degradării prin cavitația vibratoare a stratului din compozitul WC-9Co-5Cr-1Ni, depus HVOF

### Fasiile lamelare de pulbere ceramica retopita



Goluri

a) Zona periferica

b) Zona centrala

Minutul 0

Pulbere ceramica

Metal de baza



a) Zona periferica

b) Zona centrala

Minutul 90



a) Zona periferica

b) Zona centrala

Minutul 165

**Fig. 5.8** Imagini ale degradării prin cavitația vibratoare a stratului din compozitul WC-9Co-5Cr-1Ni, depus HVOF și retopit cu fascicul laser cu durata pulsului de 6 ms

Fasiile lamelare de pulbere ceramica retopita



a) Zona periferica      b) Zona centrala  
Minutul 0

Pittinguri



a) Zona periferica      b) Zona centrala  
Minutul 90



a) Zona periferica      b) Zona centrala  
Minutul 165

**Fig. 5.9** Imagini ale degradării prin cavitația vibratoare a stratului din compozitul WC-9Co-5Cr-1Ni, depus HVOF și retopit cu fascicul laser cu durata pulsului de 10 ms

**Constatări:****a. Probele cu strat depus prin pulverizare termică HVOF (vezi și diagramele din fig. 5.3)**

Imaginile din tabelul 5.2, dar și cele din fig. 5.6, arată că eroziunea cavitațională se manifestă intens încă din primele minute de atac. După primele 5 minute de atac stratul expus cavitației prezintă caverne puternice. După min.75 distrugerea este doar în materialul de bază. După cum se poate vedea în fotografia (tabelul 5.2 și fig. 5.6) încă din primele minute stratul depus este îndepărtat, dovedind slaba legătură cu metalul de bază.

➤ Constatări din examinarea suprafeței cu ochiul liber:

- după primele 5 minute de cavitație apar zone puternic decopertate de strat de pulbere (cca. 10 % din suprafață);
- după 30 minute de expunere la cavitație pe mai mult de jumătate din suprafața atacată stratul de suprafață este expulzat;
- după 60 minute de atac acesta este eliminat complet din zona în care se formează norul de bule cavitaționale, eroziunea evoluând în metalul de bază, așa cum arată și evoluția pierderilor de masă, respectiv curbele  $M(t)$  și  $v(t)$  după minutul 60, fig. 5.3. Inelul periferic, este specific acestui mod de cavitație, ca urmare a norului de bule ce aderă la suprafață pe parcursul vibrațiilor probei.

Așadar, acoperirea suprafețelor cu straturi din compozitul metal-ceramică analizat, prin pulverizare termică HVOF, fără a fi urmată de un alt procedeu, care să asigure o legătură puternică între strat și substrat, nu este o soluție viabilă de creștere a rezistenței la eroziunea cavitației. Motivul este presiunea puternică care se dezvoltă la impactul cu microjeturile rezultate din implozie când, practic, toată energia cinetică (micojeturile având viteze de sute de m/s) se transformă în energie potențială de presiune de contact ce duce la expulzarea materialului din zona de contact.

**b. Probele cu strat depus prin pulverizare termică HVOF și retopit cu fascicul laser cu durata pulsului de 6 ms (vezi și diagramele din fig. 5.4)**

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 (vezi fig. 5.7a) și multe goluri între ele. Din acest motiv, corelat cu evoluțiile pierderilor de masă și ale vitezei de eroziune din fig. 5.4, precum și cu imaginile din tabelul 5.2, se constată că: până la minutul 15 (zona I) distrugerea este doar în strat; în intervalul 15-60 (zona II) distrugerea continuă în stratul de compozit și metalul de bază, mai puternic în stratul de compozit; în intervalul 75-90 (zona III) distrugerea este mai puternică în metalul de bază, stratul depus fiind doar la periferia suprafeței atacate, sub o formă inelară, de mică dimensiune, el fiind practic complet eliminat.

În zona B (după minutul 90) eroziunea se dezvoltă doar în metalul de bază. Imaginile din fig. 5.7 arată că datorită duratei scurte a pulsului laser, fâșiile de pulbere topită au forme pronunțate, cu goluri vizibile între ele, dând impresia că stratul depus este mai mult suflat decât topit. De asemenea, se remarcă existența unor vârfuri foarte ascuțite de carburi, care sub impactul cu microjeturile de mare viteză, sunt rupte încă din primele minute ale atacului.



➤ Constatări din examinarea suprafeței cu ochiul liber:

- după 5 minute de atac al cavitației toată suprafața este marcată de pittinguri puternice, pe cca. 30% din suprafața, fără a se observa metalul de bază; acestea pot fi asociate cu ruperea vârfurilor de carburi;
- după 30 minute de cavitație cca. 90% din suprafața stratului este marcată de pittinguri;
- după 60 minute de atac al cavitației se observă materialul de bază care, după forma ondulată, confirmă că nu s-a format o interfață care să facă legătura dintre strat și substrat. O parte importantă din strat (cca. 50%) este deja expulzat;
- după 120 minute de cavitație, practic tot stratul expus norului de bule, specific cavitației vibratoare, este îndepărtat, eroziunea dezvoltându-se în materialul de bază, ceea ce explică evoluția liniară a curbei  $M(t)$  - fig. 5.4 a, după această perioadă și scăderea liniară a vitezei de eroziune, curba  $v(t)$  - fig. 5.4 b, spre valoarea de stabilizare.

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

**c. Probele cu strat depus prin pulverizare termică HVOF și retopit cu fascicul laser cu durata pulsului de 10 ms (vezi și diagramele din fig. 5.5)**

Forma stratului obținut prin retopire cu fascicul laser, cu durata în puls de 10 ms, este una formată din fâșii fine, cu goluri mici și vârfuri mici de carburi, (vezi fig. 5.8a). Urmare a duratei mai mari a pulsului razei (10 ms) striatiunile și forma fâșiilor sunt mai fine decât în cazul anterior. În consecință, comportarea și rezistența la cavitație a stratului de suprafață retopit cu acest regim al fasciculului laser este una foarte bună. Analiza comportării stratului, pe baza diagramelor experimentale din fig.6 și a imaginilor fotografice, din tabelul 5.2 și fig. 5.8, arată că: vârfurile de rugozitate sunt spulberate în primele minute ale atacului; pierderea din zona A (fig. 5.5 a) este una determinată de eliminarea prafului abraziv prins între fâșiile create de fluxul laser în timpul topirii precum și a bavurilor rezultate prin topire, ușor îndepărtate de forța de impact a microjetului cu suprafața acoperită; în zona A (după 15 minute de expunere la cavitație, așa cum se poate observa și în fotografiile realizate la diverși timpi de atac, atacul eroziv este dezvoltat doar în stratul depus care opune o rezistență sporită, fiind greu de distrus.

➤ Constatări din examinarea suprafeței cu ochiul liber:

- după 15 minute de expunere la cavitație, vârfurile de carburi sunt expulzate, suprafața începe să se netezească, iar pittingurile, generate de microjeturi și unde de șoc, sunt foarte mici, datorate în primul rând expulzării de carburi precipitate în urma solidificării băii topite cu laser;
- după 30 minute și până la finalul atacului cavitației încep să se vadă ușoare expulzări;

Evoluția curbelor  $M(t)$  și  $v(t)$ , precum și aspectul fotografic al stratului la diverși timpi de atac (tabelul 5.2 și fig. 5.8) arată că prin utilizarea acestui regim de retopire, se formează o interfață care creează o puternică legătură între metalul de bază și stratul de suprafață și contribuie la creșterea rezistenței la eroziunea cavitației.

#### **5.4. Concluzii**

- ❖ 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.
- ❖ Creșterea rezistenței la cavitație a straturilor WC-9Co-5Cr-1Ni depuse prin pulverizare termică HVOF se poate realiza prin aplicarea unor retopiri cu fascicul laser care, prin parametrii de procesare corect aleși, conduc la crearea unor interfețe strat-substrat ce asigură o legătură metalurgică între aceste două componente ale sistemului.
- ❖ Selecția riguroasă 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.
- ❖ Varianta tehnologică bazată pe retopirea stratului pulverizat cu fascicul laser având o durată a impulsului de 10 ms, asigură cea mai mare rezistență la cavitația ultrasonică generată de aparatul vibrator utilizat în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

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

### 6.1. Introducere

După cum s-a remarcat pe parcursul analizelor și evaluărilor din capitolele anterioare, eroziunea prin cavitație este efectul cumulat a două fenomene distincte: unul hidrodinamic, caracteristic formării și surpării bulelor de cavitație cu producerea microjeturilor de mare viteză și undelor de șoc, iar altul mecanic, dat de comportarea și rezistența materialului la impacturile repetate cu microjeturile și undele de șoc. Ca urmare a acțiunii comune a celor două fenomene toți specialiștii în domeniu sunt de acord că rezistența și comportarea oricărui material, la atacurile cavitației, sunt măsuri ale mecanismului energetic, dezvoltat în timpul atacului. Intrucât evaluarea energetică a eroziunii produsă de cavitație este dificilă să se facă și azi, toate laboratoarele analizează comportarea în timp și evaluează rezistența la cavitație prin comparația curbelor specifice care exprimă evoluțiile pierderilor cumulate de masă ( $m(t)$ ), volum ( $V(t)$ ), gravimetrice ( $G(t)$ ) sau adâncimilor medii de eroziune ( $MDE(t)$ ), respectiv ale vitezelor acestora ( $v(t) = \frac{\Delta m(t)}{\Delta t}$  sau

$v(t) = \frac{\Delta V(t)}{\Delta t}$ , sau  $v(t) = \frac{\Delta G(t)}{\Delta t}$ , respectiv  $MDER(t) = \frac{\Delta MDE(t)}{\Delta t}$ ). Astfel de metode,

obișnuit, folosesc materiale etalon, ale căror rezistențe sunt certificate de comportarea/durata în exploatare, așa cum, pentru Laboratorul de Cavitație, al Universității Politehnica Timișoara, este oțelul inoxidabil OH12NDL, folosit la turnarea paletelor rotoarelor de turbină Kaplan (de la CHE Porțile de Fier I) și bulb (de la CHE Porțile de Fier II). La început aceste curbe s-au construit grafic, prin curbe care să aproximeze valorile experimentale. Cu timpul, s-a pus problema construirii de relații matematice, care să permită construirea acestor curbe caracteristice de aproximare a valorilor experimentale. Preocupări în acest domeniu, există în toate laboratoarele din lume (SUA, Marea Britanie, Polonia, Italia, India, China, Japonia). Evident că, în pas cu aceste preocupări și specialiștii ce activează în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, cu activități permanente de cercetare sau prin programele de studii, sunt implicați în construirea unor astfel de ecuații/relații matematice. Ca rezultat al acestei preocupări în acest capitol se va dezvolta noul model matematic pe care îl propun pentru descrierea curbei ce aproximează valorile experimentale ale vitezei de eroziune.

## 6.2. Modele pentru curbele caracteristice ale eroziunii cavitației

În cele ce urmează se prezintă modelele considerate semnificative pentru curbele caracteristice de cavitație, folosite pe parcursul cercetărilor realizate în domeniul eroziunii produse de cavitație.

### 6.2.1. Modelul Thiruvengadam

Deși, Thiruvengadam [158] a aprofundat mecanismul energetic al eroziunii prin cavitație, oferind relații de legătură între intensitatea de distrugere a cavitației și energia necesară a se realiza degradarea materialului până la rupere (deformări elasto-plastice, fisurări și respectiv ruperi cu expulzări de material), rămâne reper prin curba model a vitezei de eroziune, oferită pentru oțelul inoxidabil 304 L, fig. 6.1, [158] - prelucrată și prezentată calitativ.

Cercetările realizate pe aparatele cu disc rotitor și vibratoare, ale căror intensități de distrugere prin cavitație sunt superioare celei produsă de tunelul hidrodinamic [17], [49], [51], [66], [150], recomandă această curbă, care suferă modificări de formă funcție de rezistența pe care materialul o are față de tensiunile induse prin impactul cu microjeturile și undele de șoc, rezultate din implozia bulelor cavitaționale.

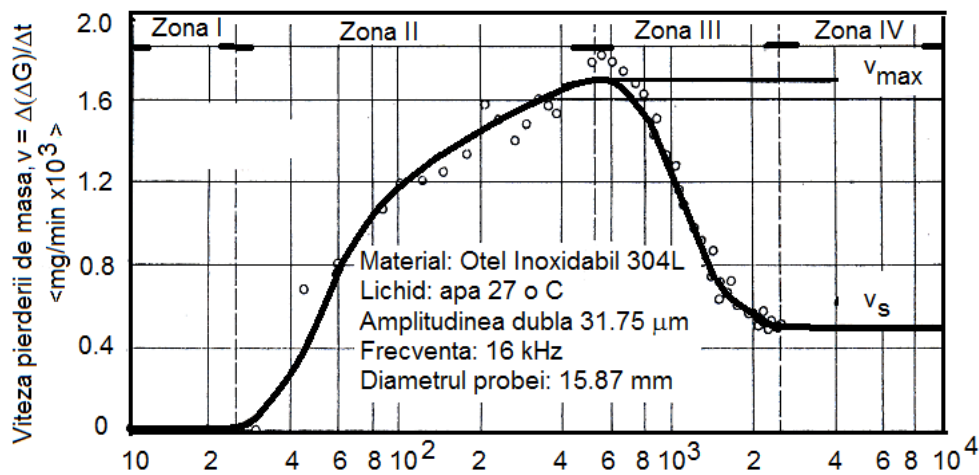


Fig. 6.1 Curba tip a vitezei de eroziune cavitațională stabilită de Thiruvengadam – prelucrare după [158]

Cercetările efectuate în aparatele vibratoare, așa cum sunt cele efectuate în cadrul acestei teze, și după cum s-a observat în diagramele prezentate, specific acestei curbe caracteristice sunt legate de absența perioadei de incipientă, datorită intensității ridicate de distrugere, încă din primele momente [5], [17], [49], [154] și forma aplatizată, cauzată de rezistența ridicată pe care materialul a dobândit-o prin tratamentele aplicate.

### 6.2.2. Modelul Noskievici

O ecuație pentru viteza de eroziune, care dă variația acesteia cu durata atacului cavității, este oferită de Noskievic [49], [123], plecând de la o ecuație diferențială de ordinul doi:

$$\frac{d^2v}{dt^2} + a_1 \frac{dv}{dt} + a_2 v = I \quad (6.1)$$

unde:

$v$ - este viteza de eroziune care poate fi a pierderilor de masă ( $v = \frac{dm}{dt}$ ) sau a

pierderilor de volum ( $v = \frac{dv}{dt}$ )

$a_1$  – este coeficientul ce caracterizează ecrisarea, respectiv frecarea internă din timpul deformării produse prin impactul microjeturi/unde de șoc cu materialul din suprafața atacată de cavitație

$a_2$  – reprezintă un coeficient invers proporțional cu rezistența materialului

Soluțiile ecuației (6.1) sunt:

**I – Dacă:**

$$\frac{a_1^2}{4} - a_2 = a_0 > 0 \quad (6.2)$$

atunci viteza de eroziune are forma:

$$v_1 = v_s(1 + v_a e^{-\alpha t} - v_\beta e^{-\beta t}) \quad (6.3)$$

unde  $\alpha = \frac{a_1}{2} + a_0$ ,  $\beta = \frac{a_1}{2} - a_0$

Masa erodată va avea forma

$$m = \int_0^t v_1 dt \quad (6.4)$$

**II – Dacă:**

$$a_2 - \frac{a_1^2}{4} = \omega^2 > 0 \quad (6.5)$$

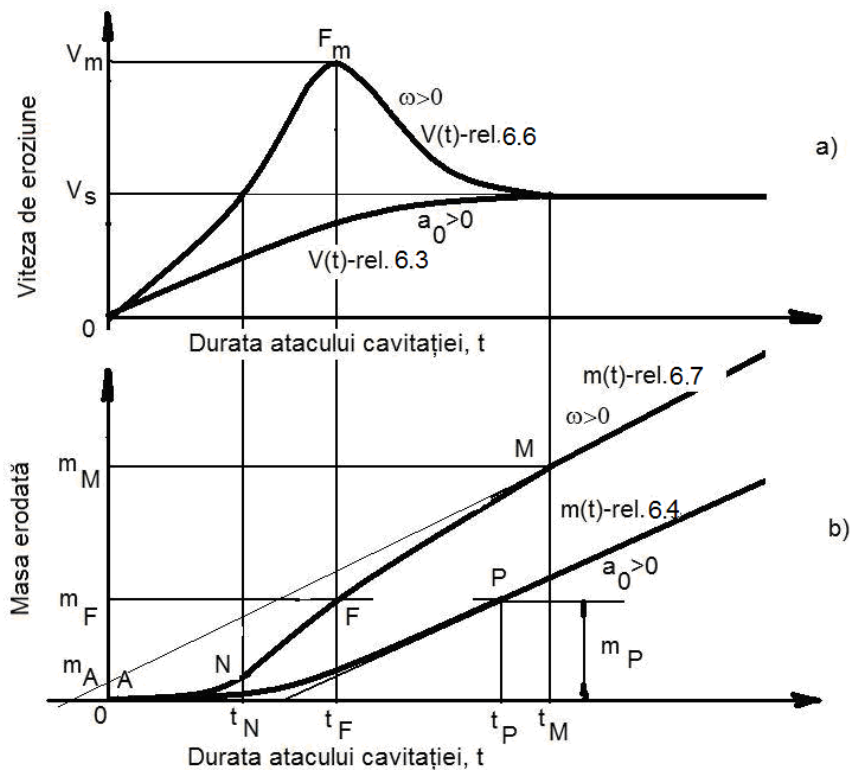
$$v_2 = v_s \left[ 1 - e^{-\alpha t} \left( \cos \omega \cdot t + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega \cdot t \right) \right] \quad (6.6)$$

unde  $\alpha = \frac{a_1}{2 \cdot 0}$ ,  $\beta = \sqrt{a_2}$

Masa erodată va avea forma:

$$m = \int_0^t v_2 dt \quad (6.7)$$

Formele grafice, caracteristice evoluțiilor date de relațiile (6.3), (6.4), (6.6) și (6.7), calitativ sunt prezentate în fig. 6.2.



**Fig. 6.2** Curbele caracteristice eroziunii prin cavitație:  
a - variația vitezei de eroziune cu durata atacului cavitației;  
b - variația pierderii de masă cu durata atacului cavitației

Pentru aplicare practică, relațiile stabilite de Noskievic pentru viteza de eroziune, indiferent de formă (6.3) sau (6.6) necesită cunoașterea rezultatelor experimentale, o prelucrare statistică, care să arate tendința de evoluție a vitezei de eroziune, plus cunoașterea caracteristicilor de material.

Dacă cunoașterea proprietăților materialului este posibilă, forma curbelor  $v(t)$  este foarte diferită, depinzând de parametrii funcționali ai aparatului vibrator, de natura materialului și de tehnologia aplicată suprafeței, în vederea modificării structurii sau valorilor proprietăților mecanice. Din acest motiv, relațiile lui Noskievic nu au găsit o largă aplicare și literatura nici nu oferă date legate de folosirea lor în evaluarea comportării și ierarhizarea după rezistența la eroziunea cavitației.

### 6.2.3. Modelul Heymann F.J.

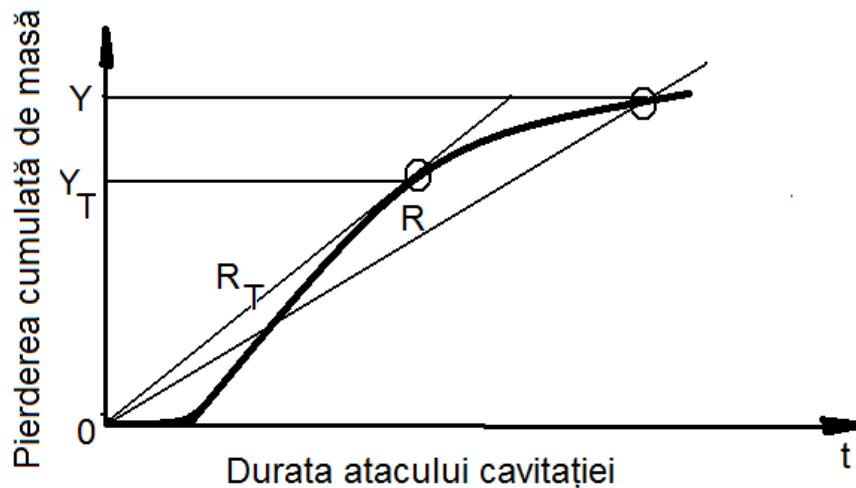
Heymann [49], [69] plecând de la forma curbei vitezei de pătrundere a eroziunii  $MDER(t)$ , de aproximare a punctelor experimentale, fig. 6.3, stabilește următoarea relație:

$$\frac{R}{R_T} = 1,63 \cdot e^{-0.405 \frac{Y}{Y_T}} \quad (6.8)$$

unde:

$R$ -este viteza medie de eroziune pentru o pierdere de masă totală  $Y$ ;

$R_T$ - este viteza de eroziune tangentă la curba cumulată de pierdere de masă, în punctul  $Y_T$ , trecând prin origine (vezi fig. 6.3).



**Fig. 6.3** Schema de determinare a vitezelor de eroziune  $R$  și  $R_T$  (prelucrare după [49])

Urmărind formele curbelor  $MDE(t)$  și ale vitezelor de pătrundere a eroziunii, de la capitolele 4 și 5, se poate afirma că metoda și relația (6.8) propuse de Heymann, pentru  $R_T$  (care este similara vitezei  $MDER$  din zona de stabilizare, folosită în prezenta teză) oferă o eroare importantă de calcul a vitezelor de eroziune, indiferent ce mărime folosim (pierdere de masă, volum erodat sau adâncime medie cumulată). De asemenea, curbele  $MDE(t)$ , din cadrul prezentei teze, sunt obținute prin integrare din curba  $MDE(t)$ , motiv pentru care zona liniară a curbelor  $MDE(t)$  corespunde valorii spre care tinde să se stabilizeze viteza  $MDER$  care, așa cum s-a arătat, servește, cu foarte bună precizie, la compararea și ierarhizarea după rezistența la cavitația generată de aparatul vibrator al Universității Politehnica din Timișoara.

## 6.3. Modelul propus

### 6.3.1. Introducere

Modelele prezentate mai sus arată preocuparea oamenilor de știință în a găsi relații matematice care să permită o aproximare cât mai fidelă a valorilor obținute în urma testului de cavitație. După cum s-a putut constata, la baza acestor relații stau datele statistice, care sunt folosite în determinarea valorilor constantelor. Pe principii similare, mai jos este prezentată o nouă relație matematică pentru viteza de eroziune care, prin integrare, permite calculul curbei de aproximare a pierderilor cumulate, așa cum au fost definite și utilizate în diagramele caracteristice din capitolele de experiment.

### 6.3.2. Stabilirea formelor matematice pentru curbele caracteristice de aproximare

În capitolele anterioare, curbele caracteristice procesului de eroziune, dezvoltat în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice standard, după cum s-a menționat, sunt construite cu relațiile stabilite de Bordeășu și colaboratorii [16], [17], care pentru viteza de eroziune are următoarea formă:

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

Deși relația propusă de Bordeășu și colaboratorii este cea mai potrivită și utilizată [76], [80], [85], [106], [124], corelat cu modelul grafic al lui Thiruvengadam, fig. 6.1, se observă că pe ultima perioadă a atacului cavitației, începând de la minutul 90-105, evoluția nu este una de scădere liniar-asimptotic spre valoarea de stabilizare, așa cum sunt și precizările din normele ASTM G32-2010, ci una ușor exponențială, datorită formei compuse din termeni exponențiali. Din acest motiv, în fig. 6.4 este detaliat modul în care relația matematică (de forma (6.9)) trebuie să satisfacă forma curbei analitice.

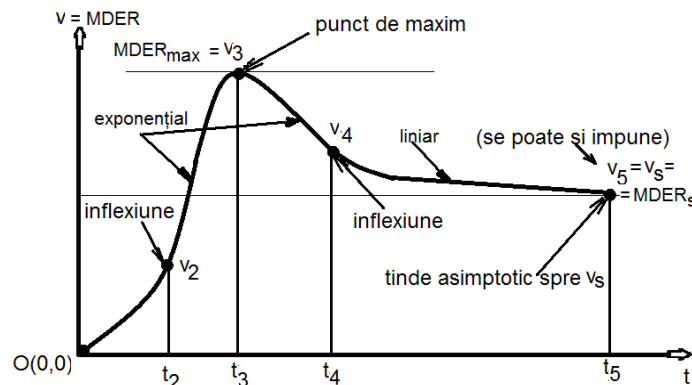


Fig. 6.4 Curba model



Pe baza considerentului precizat mai sus, pentru ca pe ultima parte să avem evoluția spre valoarea de stabilizare a vitezei de eroziune  $v_5 = v_s$  am completat relația (6.9) cu ecuația unei drepte, prin forma:

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

În origine **O(0,0)** valoarea vitezei va fi zero, în conformitate cu intensitatea ridicată a procesului eroziv, specific aparatului vibrator (vezi curbele specifice de la capitolele 2, 3 și 4).

Necunoscutele **A, B, C** se determină conform procedurii descrise mai jos. Din prelucrarea datelor obținute pe o serie de oțeluri inoxidabile,, în conceptul propus pentru estimarea rezistenței la cavitația vibratoare [143], se arată că, indiferent de structura și proprietățile oțelului, parametrul de formă B se situează în intervalul:

$$B \in (0.012 \dots 003) \quad (6.11)$$

admițându-se o valoare în acest interval, care se ajustează în sus, sau în jos, fără a se ieși din acest interval, până când curba vitezei de eroziune, dă cea mai bună aproximare a punctelor experimentale.

Din datele obținute prin testul de cavitație se pot impune valorile pentru: timpul  $t_3$  și viteza corespunzătoare:

$$v_3 = v_{\max} = MDER_{\max} \quad (6.12)$$

și valoarea la care tinde să se stabilizeze viteza de eroziune,  $v_s = MDER_s$ , la finalul atacului cavitației (165 minute pentru testele derulate în cadrul laboratorului nostru de cavitație, pe aparatul vibrator standard). Această viteză, se ia ca medie a ultimelor patru valori obținute prin testul de cavitație. Matematic cele spuse mai sus se pot scrie:

*durata totală a atacului cavitație:*  $t_5 = 165$  minute ,

*valoarea vitezei de stabilizare:*

$$v_s = MDER_s = \frac{\sum_{i=1}^3 MDER_i}{5} \quad (6.13)$$

Cu aceste date se pot determina constantele:

$$A = A(B, MDER_{\max}, t_3, MDER_s, 165) \quad (6.14)$$

respectiv constanta

$$C = C(B, MDER_{\max}, t_3, MDER_s, 165) \quad (6.15)$$

Adâncimea medie cumulată de pătrundere a eroziunii este:

$$MDE(t) = \int MDER(t) dt = A \left( 1 - e^{-Bt} \right) - \frac{Ct^2}{2} \quad (6.16)$$

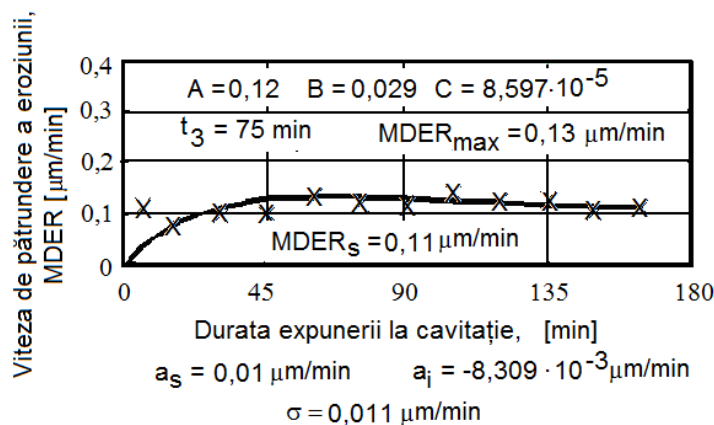
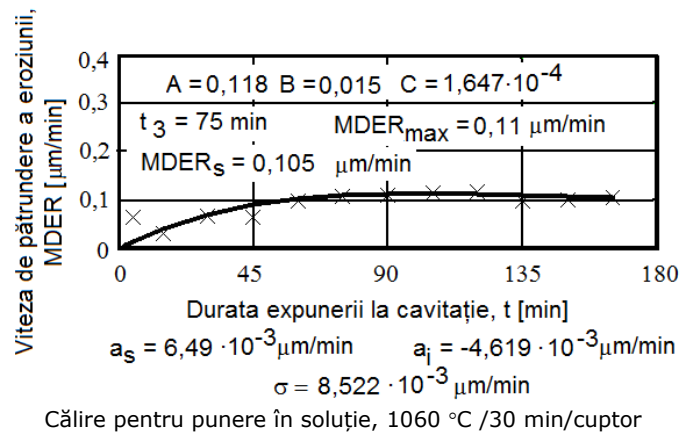
### 6.3.3. Verificarea gradului de încredere

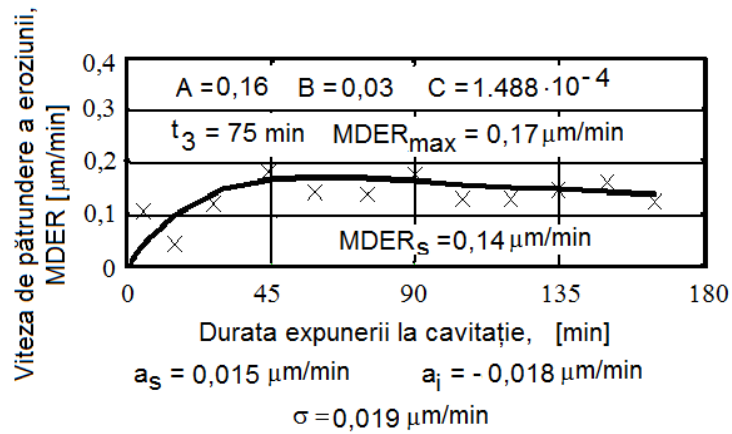
Gradul de încredere al relației propuse (6.10) este arătat prin diagramele din fig. 6.5 în care se arată modul de aproximare a valorilor experimentale pentru seturile de probe studiate în capitolele 3 și 4, cu prezentarea valorilor pentru abaterea maximă/superioară ( $a_s$ ), minimă/inferioară ( $a_i$ ) și pentru abaterea standard ( $\sigma$ ), pentru zona de stabilizare a vitezei de eroziune 90 (105)-165 minute, pentru care s-a introdus ultimul termen ( $Ct$ ).

Relația de calcul a acestor erori de aproximare (pe intervalul 120-165 minute) este:

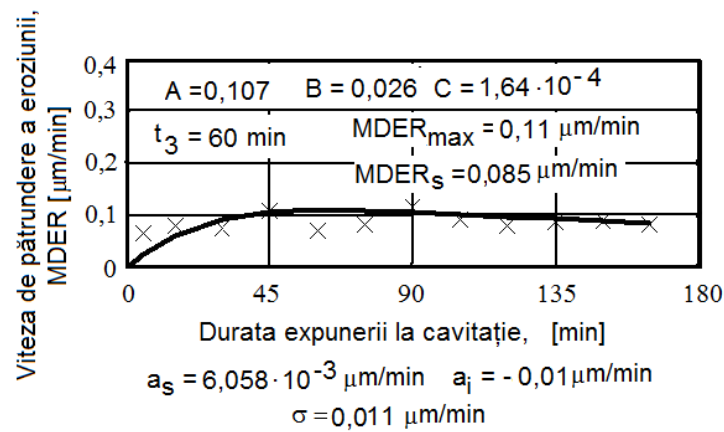
$$a_s \text{ sau } a_i = \text{MDER}_j - \text{MDER} \text{ respectiv } a_i = \text{MDER}_j - \text{MDER} \quad (6.17)$$

unde:  $j$  – este 9, 10, 11, 12 numărul perioadei intermediare de testare pentru care, prin măsurători, s-a determinat viteza medie de pătrundere a eroziunii. MDER este valoarea dată de relația (6.10).

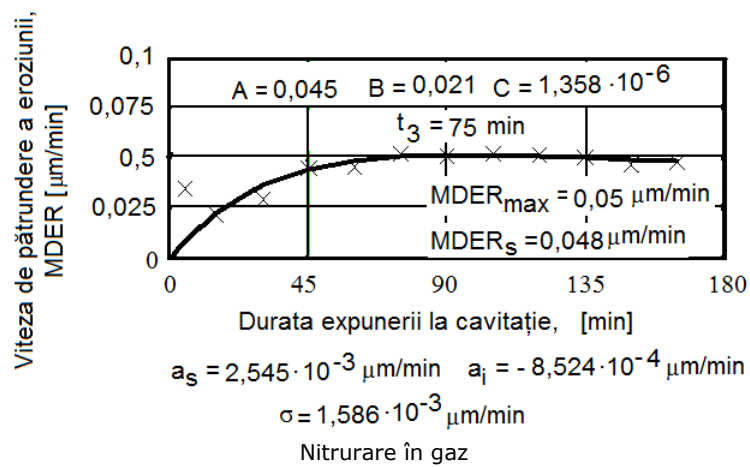


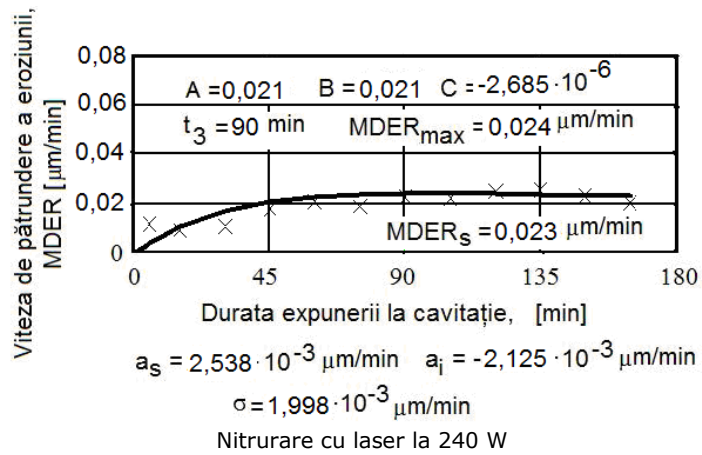
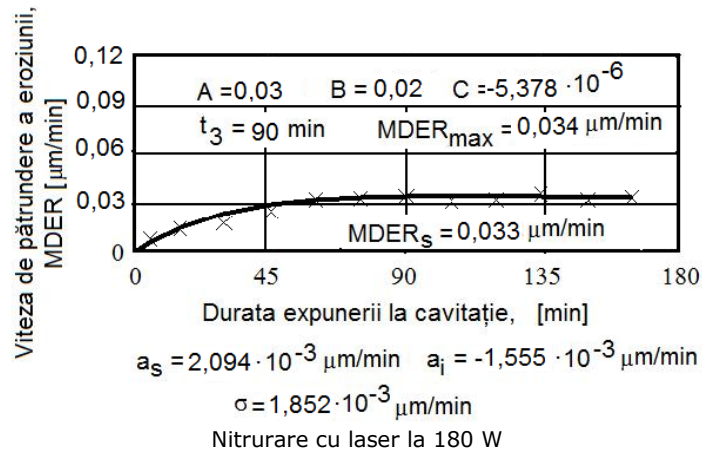
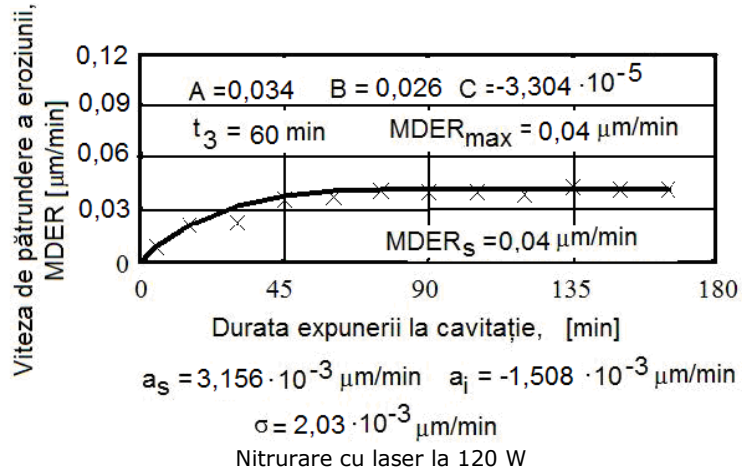


Călire pentru punere în soluție, 1060 °C/30 min/apă+sensibilizare 475 °C/4 h/aer



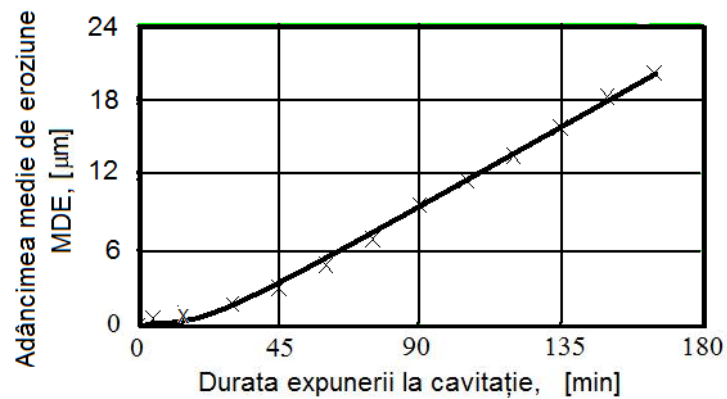
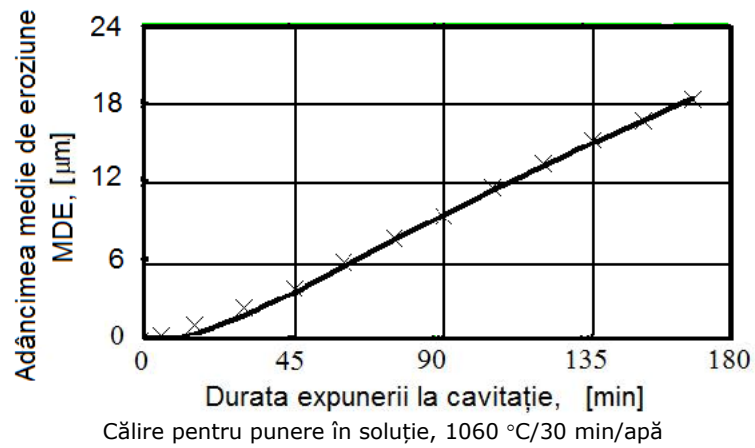
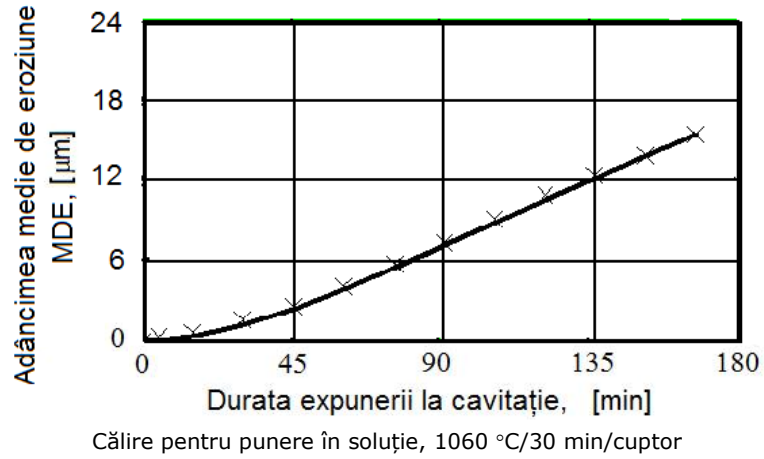
Călire pentru punere în soluție, 1060 °C/30 min/apă+sensibilizare 850 °C/2h/aer

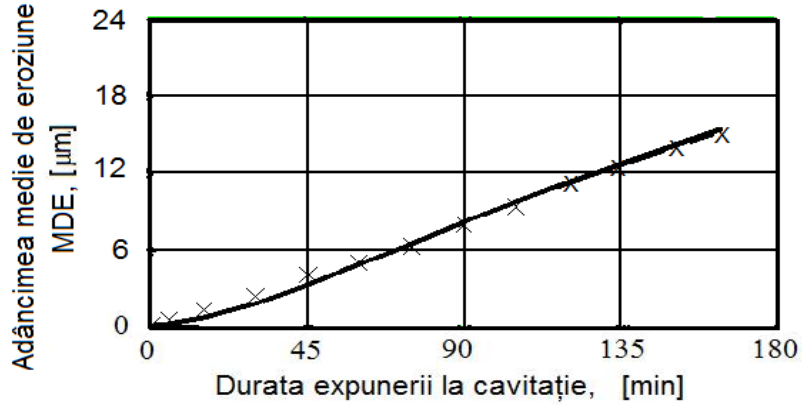




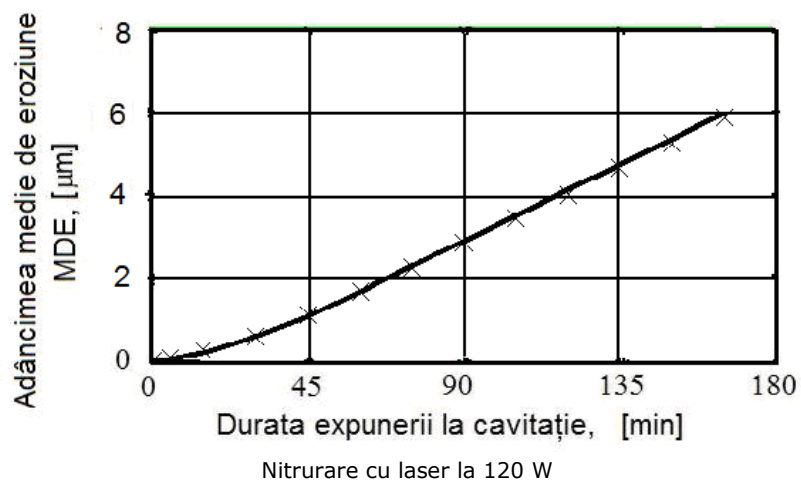
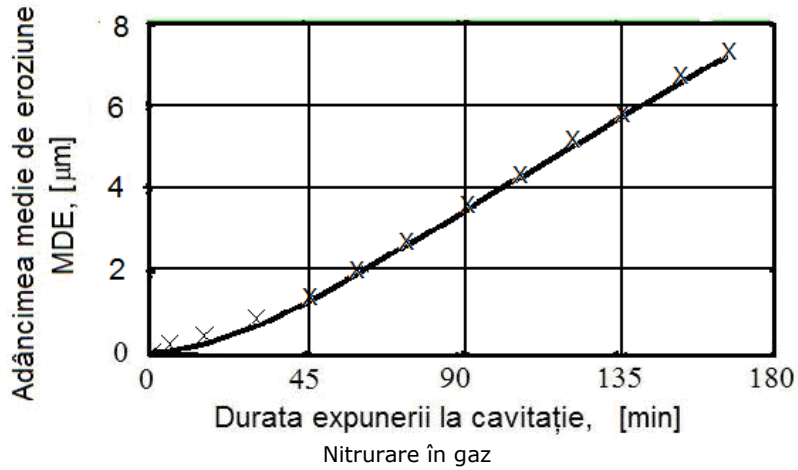
**Fig. 6.5** Aproximarea punctelor experimentale cu relația (6.10) – viteza de pătrundere a eroziunii MDER(t)

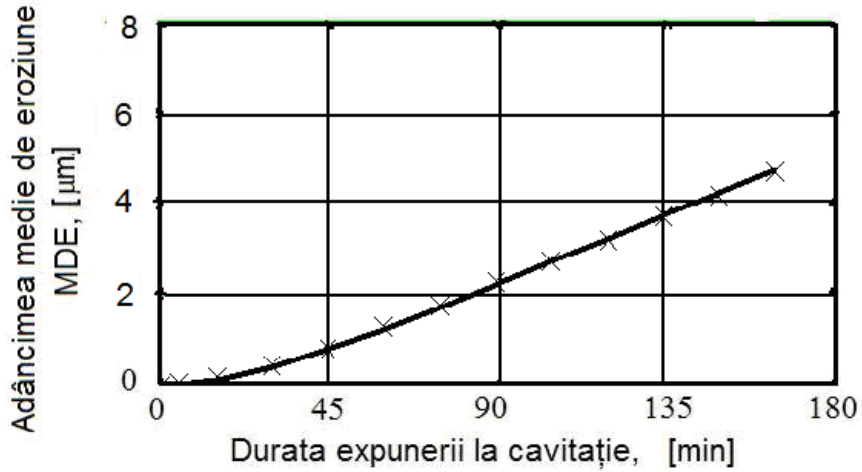
În diagramele din fig. 6.6 sunt redată curbele ce aproximează valorile experimentale ale adâncimilor medii cumulate ale eroziunii, definite de relația (6.16).



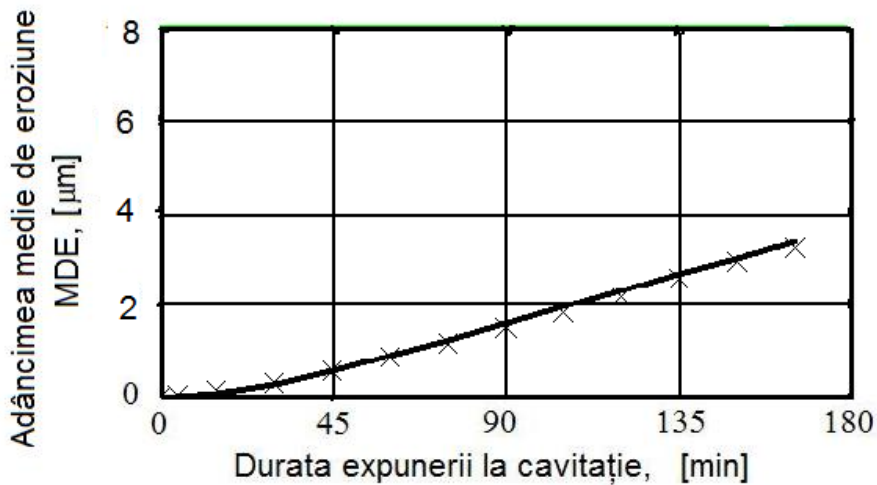


Călire pentru punere în soluție, 1060 °C/30 min/apă+sensibilizare 850°C/2h/aer





Nitruare cu laser la 180 W



Nitruare cu laser la 240 W

**Fig. 6.6** Aproximarea punctelor experimentale cu relația (6.16) – adâncimea medie de eroziune  $MDE(t)$

În tabelul 6.1, pentru cele 8 stări prezentate mai sus, sunt comparate valorile parametrilor statistici  $a_s$ ,  $a_i$  și  $\sigma$  date de aproximările obținute cu noua relație (6.10) și cu relația stabilită de Bordeasu (6.9). Valorile inferioare, obținute cu relația (6.10) pentru zona de stabilizare, de la 120 minute până la finalul testului, justifică corectitudinea completării relației inițiale (6.9) cu ecuația unei drepte.

**Tabel 6.1** Comparații ale parametrilor statistici

Starea otelului	$a_s$ [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	$a_i$ [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]	$\sigma$ [ $\mu\text{m}/\text{min}$ ]
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)	$6,49 \cdot 10^{-3}$	- $4,619 \cdot 10^{-3}$	$8,522 \cdot 10^{-3}$
Călire 1060°C /30 min/apă - rel.(5.9)	$2,154 \cdot 10^{-3}$	- 0,025	0,016
Călire 1060°C /30 min/apă - rel.(5.10)	0,002	- $8,309 \cdot 10^{-3}$	0,011
Călire 1060°C /30 min/apă + sensibilizare 475°C/4 h/aer - rel.(5.9)	0,032	- $2,488 \cdot 10^{-3}$	0,022
Călire 1060°C /30 min/apă + sensibilizare 475°C/4 h/aer - rel.(5.10)	0,015	- 0,018	0,019
Călire 1060°C /30 min/apă+sensibilizare 850°C/2h/aer - rel.(5.9)	$3,466 \cdot 10^{-3}$	-0,033	0,02
Călire 1060°C /30 min/apă+sensibilizare 850°C/2h/aer - rel.(5.10)	$6,058 \cdot 10^{-3}$	- 0,01	0,011
Nitrurare în gaz - rel.(5.9)	$8,497 \cdot 10^{-3}$	- $5,8412 \cdot 10^{-3}$	$7,247 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare în gaz - rel.(5.10)	$2,545 \cdot 10^{-3}$	- $8,524 \cdot 10^{-3}$	$1,586 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 120 W - rel.(5.9)	$1,422 \cdot 10^{-3}$	- $3,611 \cdot 10^{-3}$	$2,384 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 120 W - rel.(5.10)	$3,156 \cdot 10^{-3}$	- $1,508 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 180 W - rel.(5.9)	$1,631 \cdot 10^{-3}$	- $2,029 \cdot 10^{-3}$	$1,872 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 180 W - rel.(5.10)	$2,094 \cdot 10^{-3}$	- $1,555 \cdot 10^{-3}$	$1,852 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 240 W - rel.(5.9)	$1,939 \cdot 10^{-3}$	- $2,847 \cdot 10^{-3}$	$2,085 \cdot 10^{-3}$
Nitrurare cu laser la 240 W - rel.(5.10)	$2,538 \cdot 10^{-3}$	- $2,125 \cdot 10^{-3}$	$1,988 \cdot 10^{-3}$

#### 6.4. Concluzii

Datorită dificultăților de caracterizare energetică a comportării unui material la eroziunea cavitației, respectiv de evaluare a rezistenței sale la atacul cavitației, folosirea curbelor caracteristice și a parametrilor definiți de acestea, conform normelor ASTM G32-2010, continuă să fie cea mai bună soluție pentru descrierea comportării și rezistenței la cavitație, indiferent de aparatul folosit (tunel hidrodinamic, disc rotitor, aparat vibrator).

Introducerea unui termen suplimentar în modelul matematic propus de Bordeasu și colaboratorii pentru viteza 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, așa cum rezultă din datele prezentate în tabelul 6.1. Integrarea noii relații (6.10) asigură o aproximare foarte bună a valorilor obținute pentru pierderile cumulate (fig. 6.6).



## **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. De asemenea, se recomandă utilizarea unor tehnici de tratament termic volumic sau de suprafață, ca variante de creștere a rezistenței, respectiv duratei de viață, a pieselor componente ale echipamentelor hidraulice, obligate să funcționeze în condiții de cavitație.
- 2.** Predicția microstructurii oțelurilor inoxidabile Duplex, în funcție de compoziția lor chimică, poate fi realizată, cu suficientă aproximație, după modelul Schäffler, iar cinetica transformărilor de fază în stare solidă este dată de diagramele T.T.P. (temperatură – timp – precipitare). Întrucât operațiile de prelucrare prin sudare, deformare plastică la cald, tratament termic, sau exploatarea la temperaturi ridicate modifică semnificativ microstructura oțelurilor inoxidabile Duplex, comportarea la eroziune prin cavitație este influențată puternic de aceste schimbări structurale.
- 3.** 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 (ferita, F și austenita, A), iar pe de altă parte, evitarea formării de compuși intermetalici duri și fragili (Sigma  $\sigma$ , Chi  $\chi$ , nitruți  $Cr_2N$ , carburi,  $M_{23}C_6$ , etc.) care afectează tenacitatea și rezistența la coroziune.
- 4.** Reacțiile de transformare și de precipitare în stare solidă specifice oțelului inoxidabil Duplex analizat sunt responsabile de comportarea sa la eroziune prin cavitație.
- 5.** 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 durtății 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  $\alpha'$  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.

- 6.** 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.
- 7.** Pentru toate cele trei variante de tratament termic volumic aplicat, atacul cavitațional se propagă cu preponderență în faza de ferită și pe limitele grăunților de ferită – austenită, după care se declanșează și în grăunții de austenită.
- 8.** Ecrusarea mecanică a stratului marginal din suprafața cavitată, după un timp relativ scurt de atac, asigură un spor suplimentar de rezistență la cavitație.
- 9.** 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.
- 10.** Rezistența suprafeței nitrurate în gaz la eroziunea cavitației crește cu cca. 9%, iar adâncimea medie de pătrundere a eroziunii se reduce cu cca. 152%.
- 11.** Comparativ cu tratamentul termic de călire pentru punere în soluție la care suprafața erodată este aproximativ circulară, cu pitinguri uniform distribuite, nitrurarea în gaz provoacă un mod florar de degradare a suprafeței, cauzat de o dispersie relativ mare a valorilor de duritate.
- 12.** 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 cca. 81%, dacă ne raportăm la adâncimile de eroziune, respectiv cu cca. 74 %, dacă ne raportăm la vitezele de eroziune.
- 13.** Durificarea celor două soluții solide, F și A, prin difuzia interstițială a azotului în rețeaua cristalină c.v.c. a Fe  $\alpha$ , respectiv c.f.c. a Fe  $\gamma$  justifică îmbunătățirea rezistenței la eroziune prin cavitație comparativ cu starea structurală de călire pentru punere în soluție.
- 14.** Varianta tehnologică de nitrurare cu fascicul laser deși nu modifică semnificativ adâncimea medie și viteza de pătrundere a eroziunii față de nitrurarea în gaz, oferă avantajul reducerii semnificative a duratei procesului de tratament și al posibilității de înlocuire facilă a stratului uzat.
- 15.** Urmare a topirii unei părți din materialul de bază, nitrurarea cu fascicul laser asigură o bună legătură metalurgică și implicit o mare adeziune a stratului îmbogățit în azot la substrat.

- 16.** 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.
- 17.** Creșterea rezistenței la cavitație a straturilor WC-9Co-5Cr-1Ni depuse prin pulverizare termică HVOF se poate realiza prin aplicarea unor retopiri cu fascicul laser care, prin parametrii de procesare corect aleși, conduc la crearea unor interfețe strat-substrat ce asigură o legătură metalurgică între aceste două componente ale sistemului.
- 18.** 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.
- 19.** Varianta tehnologică bazată pe retopirea stratului pulverizat cu fascicul laser având o durată a impulsului de 10 ms, asigură cea mai mare rezistență la cavitația ultrasonică generată de aparatul vibrator utilizat în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara.
- 20.** 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, se subliniază faptul că abordarea și rezolvarea în limitele propuse a temei de cercetare ce face obiectul tezei de doctorat, prin urmărirea sistematică, punerea în evidență și fundamentarea științifică a transformărilor fazice și structurale care să permită obținerea unei rezistențe mari la eroziunea prin cavitație, reprezintă o contribuție originală.

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;
- 3.** Cercetarea degradării structurale a oțelurilor inoxidabile Duplex în perioada de incipiență a cavitației.

# VALORIFICAREA PARȚIALĂ A REZULTATELOR CERCETĂRII

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

- [1] BORDEAȘU I., MICU L., MITELEA I., UȚU D., PIRVULESCU D., SIRBU A.: Cavitation erosion of HVOF metal-ceramic composite coatings deposited onto Duplex stainless steel substrate, *Revista de Materiale Plastice*, vol. 53, no. 4, București, ISSN: 0025/5289, pp.781-786, factor impact 0,903, 2016, (ISI)
- [2] MITELEA I., MICU L., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.: Cavitation erosion of sensitized UNS S31803 Duplex Stainless Steels, *Journal of Materials engineering and performance*, vol. 25 (5), pp.1939 – 1944, factor impact 1,20, 2016, (ISI)

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

- [1] SĂCLIANU L.C., BORDEAȘU I., MITELEA I., MICU L.M.: Mechanical hardening and resistance to cavitation erosion of the austenitic stainless steels with varying proportions of delta ferrite, *METAL 2014, Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, EU, May 21-23, 2014, (Conference ISI), (<http://www.metal2014.com/en/view-list-of-papers/>)
- [2] SĂCLIANU L., BORDEAȘU I., MITELEA I., MICU L.: Cold work hardening and resistance to cavitation erosion of the austenitic stainless steels with varying proportions of delta ferrite, *METAL 2014, Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, EU, May 21-23 2014, (Conference ISI), (<http://www.metal2014.com/en/view-list-of-papers/>)
- [3] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., MICU L.M., OANCĂ O.V., BORDEAȘU D., PUGNA A., BORDEAȘU C.: Laser beam treatment effect on AMPCO M4 bronze cavitation erosion resistance, *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, ISSN 1757-8981, vol. 85, 2015, (Conference ISI)
- [4] MICU L.M., MITELEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., OANCĂ O.V.: The transformations morphology by cavitation erosion of gas nitrited X2CrNiMoN 22-5-3 Duplex stainless steel, *METAL 2015, 24<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, 3-5 june 2015, (Conference ISI), (<http://www.metal2015.com/en/view-list-of-papers/>)
- [5] MICU L.M., BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., POPESCU M., BORDEAȘU D., SĂCLIANU L.C.: Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN22-5-3 stainless steels, *IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, ISSN 1757-8981, vol. 85, 2015, (Conference ISI)
- [6] MICU L.M., MITELEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., OANCĂ O.V.: Improvement in cavitation erosion resistance of X2CrNiMoN22-5-3 Duplex stainless steel by laser beam nitration, *METAL 2016, 25<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, 25-27 May,

2016, (Conference ISI), (<http://www.metal2016.com/en/view-list-of-papers/>)

- [7] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., SĂLCIANU L., GHERA C., **MICU L.M.**, BĂDĂRĂU R., IOSIF A., PIRVULESCU L.D., PODOLEANU C.E.: A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 163, 2017, Conference ISI, (în curs de indexare WoS; conferința 2016 indexată WoS)

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

- [1] BORDEAȘU I., POPOVICIU M., **MICU L.M.**, SĂLCIANU L.C., BORDEAȘU C.: Cavitation Erosion Researches upon Two Ampco Bronzes, *Machine Design*, Vol. 6, No. 3, ISSN 1821-1259, pp. 97-102, 2014, (BDI), (<http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/pdf/2014/no3/097-102.pdf>)
- [2] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., MITELEA I., **MICU L.M.**, OANCĂ O., BORDEAȘU C., SĂLCIANU L., GHERA C.: Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze with heat treatments, "HIDRAULICA", No. 2/2014, *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 1453 - 7303, pp. 53-61, 2014, (BDI), (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-2-2014/>)
- [3] CRISTESCU C., **MICU L.M.**, DUMITRESCU C., KREVEY P.: Using load sensing control systems to increase energy efficiency of hydrostatic transmissions, *HIDRAULICA*, *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics* ISSN 1453-7303, nr. 4/2015, (BDI), (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-4-2015/>)
- [4] GHERA C., BORDEAȘU I., SĂLCIANU L., DUMA S.T., KATONA S.-E., A.Pugna, **MICU L.M.**, PASCU L.F: Considerations regarding the behaviour to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution, "HIDRAULICA" (No. 1/2015), *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 1453 - 7303, pp. 25-31, 2015, (BDI), (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-1-2015/>)
- [5] **MICU L.M.**, BORDEAȘU D., BORDEAȘU I., POPESCU M., OANCĂ O., DUMA S.: Studii privind influența tratamentului termochimic de nitrurare asupra rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil duplex X2CrNiMoN22-5-3, "HIDRAULICA" (No.4/2014), *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 1453 - 7303, 2014, (BDI), (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-4-2014/>)
- [6] **MICU L.M.**, MITLEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., POPESCU M.: The influence of cooling rate from high temperature upon the cavitation erosion resistance of the Duplex stainless steel X2CrNiMoN22-5-3, *Rev. Advanced Materials Research*, Vol.1111, ISSN 1662 - 8985, pp. 145-150, 2015, (BDI)

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

- [1] **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., MITELEA I., GHERA C., SĂLCIANU L.: Cercetarea eroziunii cavitaționale asupra oțelului inoxidabil X2CrNiMn22-5-3 tratat termic, Coferinta Dorin Pavel, vol. *Știință și Inginerie*, nr. XIV, vol. 26/2014, Sebeș - Alba, ISSN: 2067-7138, Editura AGIR, București, pp. 425-430, 2014, (BDI)

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

- [1] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., GHERA C., SĂLCIANU L.C., MICU L.M., PODOLEANU C.E.: Cavitation erosion behavior of the steel 17 CrNiMo6, *The 9th International Symposium KOD*, Hotel Marina, Balatonfüred, Hungary, pp. 163-169, 9-12 June, 2016, (International Conference)

## 6. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice

- [1] MICU L.M., BORDEAȘU I., POPOVICIU O., BORDEAȘU C., BORDEAȘU D., SĂLCIANU L., OANCĂ O.: Influence of volume heat treatment on bronze resistance AMPCO M4 cavitation erosion, *Pneumatics, Tools, Sealing elements, Fine Mechanics, Specific electronic equipment and Mechatronics – HERVEX*, Călimănești-Căciulata, Romania, ISSN 1454-8003, pp. 136-141, 5-7 noiembrie 2014, (National Conference), ([www.hervex.ro](http://www.hervex.ro))

## Dovezi ale lucrărilor ISI (paginile web) în domeniul temei de doctorat

The screenshot displays the Web of Science search results for the author MICU L.M. The search criteria are: AUTHOR: (Mic u LM) ...More. The results are sorted by Publication Date (newest to oldest) and are displayed on page 1 of 2. The first four results are:

- Profitability calculation concerning a *Salix viminalis* plantation in the Jimbolia-Cenei area**  
By: Murg, Oana Maria Sicoe; Strain, Laura Mariana; Micu, Lavinia Madalina; et al.  
Conference: European Biotechnology Conference Location: LATVIA Date: MAY 05-07, 2016  
JOURNAL OF BIOTECHNOLOGY Volume: 231 Supplement: S Pages: S93-S93 Published: AUG 10 2016  
Full Text from Publisher
- Cavitation Erosion of Sensitized UNS S31803 Duplex Stainless Steels**  
By: Mittelea, Ion; Micu, Lavinia Madalina; Bordeasu, Ilare; et al.  
JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE Volume: 25 Issue: 5 Pages: 1939-1944  
Published: MAY 2016  
View Abstract
- Researches upon cavitation erosion behavior of some duplex steels**  
By: Bordeasu, I.; Popoviciu, M. O.; Mittelea, I.; et al.  
Edited by: Lemle, LD; Jiang, Y  
Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS) Location: Military Econ Acad Wuhan, Wuhan, PEOPLES R. CHINA Date: JUN 03-05, 2015  
Sponsor(s): Politehnica Univ Timisoara; Wuhan Univ; Huazhong Univ Sci & Technol; Naval Univ Engr; Zhongnan Univ Econ & Law; Henti Coanda Air Force Acad Brasov  
INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2015 (ICAS2015) Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering Volume: 106 Article Number: 012032 Published: 2016  
Full Text from Publisher View Abstract
- The Heavy Metals Content in Leaves of the Forest Fruits (*Hippophae rhamnoides* and *Rubus fruticosus*) from the Tailings Dumps Mining**  
By: Micu, Lavinia Madalina; Petanec, Doru I.; Iosub-Ciur, Maria Dumitrela; et al.  
REVISTA DE CHIMIE Volume: 67 Issue: 1 Pages: 64-68 Published: JAN 2016  
View Abstract

The interface also includes a 'Refine Results' section with filters for 'Web of Science Categories' (Materials Science, Engineering, Agronomy, Food Science, Engineering Chemical) and 'Document Types' (Proceedings Paper, Article, Meeting Abstract).

Web of Science [v.5.23.2] - Web of Science [v.5.23.2] - [https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEw&search\\_mode=GeneralSearch&prID=123a8ce9-ce5b-46d2-99](https://apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEw&search_mode=GeneralSearch&prID=123a8ce9-ce5b-46d2-99)

more options / values... **Refine**

Research Areas

Authors

Group Authors

Editors

Source Titles

Book Series Titles

Conference Titles

Publication Years

Organizations-Enhanced

Funding Agencies

Languages

Countries/Territories

ESI Top Papers

Open Access

*For advanced refine options, use*

Analyze Results

5. **THE TRANSFORMATIONS MORPHOLOGY BY CAVITATION EROSION OF GAS NITRATED X2CRNiMON22-5-3 DUPLEX STAINLESS STEEL**

By: Micu, Lavinia Madalina, 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; Engr 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: 785-791 Published: 2015

View Abstract

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

Usage Count

---

6. **Laser beam treatment effect on AMPCO M4 bronze cavitation erosion resistance**

By: Bordeasu, I.; Popoviciu, M. O.; Micu, L. M.; et al.  
 Book Group Author(s): IOP  
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS) Location: Engr Fac Hunedoara, Hunedoara, ROMANIA Date: OCT 02-04, 2014  
 Sponsor(s): Mil Econ Acad Wuhan; Politehnica Univ Timisoara; Wuhan Uni; Huazhong Univ Sci & Technol; Naval Univ Engr; Zhongnan Univ Econ & Law; AF Early Warning Acad; Henni Coanda AF Acad Brasov; Univ Med & Pharm Victor Babeș Timisoara; Soc Interdisciplinary Values Educ & Res Soc; Gen Assoc Romanian Engineers, Hunedoara Branch; Natl Soc Environ Sci & Engr; S C Micro Mega HD S A; ArcelorMittal S A; S C Eurospart DHS S A; BeeSpeed Automatizari S R L; S C Opac Design Syst S R L; S C Ducodan S R L  
 INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2014 (ICASS2014) Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering Volume: 95 Article Number: 012005 Published: 2015

Full Text from Publisher View Abstract

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

Usage Count

---

7. **Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CRNiMON 22-5-3 stainless steels**

By: Micu, L. M.; Bordeasu, I.; Popoviciu, M. O.; et al.  
 Book Group Author(s): IOP  
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS) Location: Engr Fac Hunedoara, Hunedoara, ROMANIA Date: OCT 02-04, 2014  
 Sponsor(s): Mil Econ Acad Wuhan; Politehnica Univ Timisoara; Wuhan Uni; Huazhong Univ Sci & Technol; Naval Univ Engr; Zhongnan Univ Econ & Law; AF Early Warning Acad; Henni Coanda AF Acad Brasov; Univ Med & Pharm Victor Babeș Timisoara; Soc Interdisciplinary Values Educ & Res Soc; Gen Assoc Romanian Engineers, Hunedoara Branch; Natl Soc Environ Sci & Engr; S C Micro Mega HD S A; ArcelorMittal S A; S C Eurospart DHS S A; BeeSpeed Automatizari S R L; S C Opac Design Syst S R L; S C Ducodan S R L  
 INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2014 (ICASS2014) Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering Volume: 95 Article Number: 012019 Published: 2015

Full Text from Publisher View Abstract

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

Usage Count

---

8. **AUTOMATION POSSIBILITIES OF THIN SHEETS WELDING OF GREENHOUSES, LININGS TANKS AND WASTE DELINEATION COMPONENTS**

By: Popescu, Mihaela; Rosu, Radu Alexandru; Micu, Lavinia Madalina; et al.  
 Book Group Author(s): SGEM  
 Conference: 13th International Multidisciplinary Scientific Geoconference, SGEM 2013 Location: Albena, BULGARIA Date: JUN 16-22, 2013  
 GEOCONFERENCE ON NANO, BIO AND GREEN - TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE Book Series: International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM Pages: 368-374 Published: 2013

View Abstract

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

Usage Count

Web of Science [v.5.23.2] - Web of Science [v.5.23.2] - [https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEw&page=1&doc=2](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEw&page=1&doc=2)

Web of Science™ Incites™ 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

Add to Marked List 2 of 11

**Cavitation Erosion of Sensitized UNS S31803 Duplex Stainless Steels**

By: Mitelea, I (Mitelea, Ion)<sup>1</sup>; **Micu, LM** (Micu, Lavinia Madalina)<sup>1</sup>; Bordeasu, I (Bordeasu, Ilare)<sup>2</sup>; Craciunescu, CM (Craciunescu, Corneliu Marius)<sup>1</sup>

JOURNAL OF MATERIALS ENGINEERING AND PERFORMANCE  
 Volume: 25 Issue: 5 Pages: 1939-1944  
 DOI: 10.1007/s11665-016-2045-0  
 Published: MAY 2016

View Journal Information

**Abstract**

During processing or use, duplex steels can be subjected to heating at high temperatures that can affect their behavior. This work aims to correlate the influence of the sensitization treatment on the ultrasonic cavitation erosion behavior of a UNS S31803 (X2CRNiMoN22-5-3) duplex stainless steel. Duplex stainless steels, formed as a result of rapid cooling after solution annealing, are sensitized at temperatures of 475 and 850 A degrees C, respectively, leading to hardening and embrittlement due to the spinodal decomposition of the ferrite and the precipitation of secondary phases. The ultrasonic cavitation erosion experiments showed that the sensitization at 850 A degrees C reduced the mean depth of erosion by about 11% and the mean depth of erosion rate by 26%. By contrast, the sensitization at 475 A degrees C deteriorates the cavitation erosion resistance, increasing the erosion parameters by up to 22%, compared to the solution annealed state.

**Keywords**  
 Author Keywords: duplex stainless steels; microstructure; sensitization; ultrasonic cavitation erosion  
 KeyWords Plus: RESISTANCE; CORROSION; TEMPERATURE; SEAWATER; BEHAVIOR

**Author Information**  
 Reprint Address: Craciunescu, CM (reprint author)  
 1. Politehn Univ Timisoara, Dept Mat & Mfg Engr, Fac Mech Engr, Bd Mihai Viteazul 1, Timisoara 300006, Romania.  
 Addresses:  
 [ 1 ] Politehn Univ Timisoara, Dept Mat & Mfg Engr, Fac Mech Engr, Bd Mihai Viteazul 1, Timisoara 300006, Romania  
 [ 2 ] Politehn Univ Timisoara, Dept Mech Machines Equipments & Transportat, Timisoara, Romania

**Citation Network**

0 Times Cited  
 20 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 SciELO Citation Index

**Usage Count**

Last 180 Days: 7  
 Since 2013: 8  
 Learn more

This record is from:  
**Web of Science™ Core Collection**

## 128 Valorificare parțială a rezultatelor cercetării

Web of Science [v.5.23.2] - x Web of Science [v.5.23.2] - x  
[https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig)

Web of Science™ InCites™ 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

Full Text from Publisher Save to EndNote online Add to Marked List 3 of 11

### Researches upon cavitation erosion behavior of some duplex steels

By: [Bordeasau, I](#) (Bordeasau, I)<sup>1</sup>; [Popoviciu, MO](#) (Popoviciu, M. O.)<sup>2,1</sup>; [Mitelea, I](#) (Mitelea, I)<sup>1</sup>; [Micu, LM](#) (Micu, L. M.)<sup>1</sup>; [Bordeasau, C](#) (Bordeasau, C.)<sup>1</sup>; [Ghera, C](#) (Ghera, C.)<sup>1</sup>; [Iosif, A](#) (Iosif, A.)<sup>1</sup>

Edited by: [Lemie, LD](#), [Jiang, Y](#)

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2015 (ICAS2015)**  
 Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering  
 Volume: 106  
 Article Number: 012032  
 DOI: 10.1088/1757-899X/106/1/012032  
 Published: 2016

**Conference**  
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS)  
 Location: Military Econ Acad Wuhan, Wuhan, PEOPLES R CHINA  
 Date: JUN 03-05, 2015  
 Sponsor(s): Politehnica Univ Timisoara, Wuhan Univ, Huazhong Univ Sci & Technol; Naval Univ Engr; Zhongnan Univ Econ & Law; Henri Coanda Air Force Acad Brasov

**Abstract**  
 This paper presents the cavitation erosion behavior of two stainless steels having a duplex structure formed by austenite and ferrite. The conclusions were obtained by using both the cavitation erosion characteristic curves and the pictures of the eroded surfaces obtained with performing optic microscopes. The researches were focused upon the optimal correlation between the cavitation erosion resistance and the rate of the two structural constituents. The tests were done with T2 facility, with ceramic crystals, which integrally respects the ASTM G32-2010 Standard. The obtained results present the cumulative effect upon cavitation erosion of the chemical composition, mechanical properties and the structural constituents. The results of the researches are of importance for the specialists which establishes the composition of the stainless steels used for manufacturing hydraulic machineries or other devices subjected to cavitation erosion.

**Author Information**  
 Reprint Address: [Bordeasau, I](#) (reprint author)

### Citation Network

0 Times Cited  
 11 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 SciELO Citation Index

**Usage Count**  
 Last 180 Days: 2  
 Since 2013: 2  
[Learn more](#)

This record is from:  
**Web of Science™ Core Collection**

Web of Science [v.5.23.2] - x Web of Science [v.5.23.2] - x  
[https://apps.webofknowledge.com/full\\_record.do?product=WOS&search\\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig](https://apps.webofknowledge.com/full_record.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AEIR1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig)

Web of Science™ InCites™ 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 4 of 11

### THE TRANSFORMATIONS MORPHOLOGY BY CAVITATION EROSION OF GAS NITRIDED X2CRNIMON22-5-3 DUPLEX STAINLESS STEEL

By: [Micu, LM](#) (Micu, Lavinia Madalina)<sup>1</sup>; [Mitelea, I](#) (Mitelea, Ion)<sup>1</sup>; [Bordeasau, I](#) (Bordeasau, Ilare)<sup>1</sup>; [Craciunescu, CM](#) (Craciunescu, Cornelia Marius)<sup>1</sup>; [Danca, OV](#) (Danca, Octavian Victor)<sup>1</sup>

Book Group Author(s): TANGER Ltd

**METAL 2015: 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS**  
 Pages: 785-791  
 Published: 2015

**Conference**  
 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

**Abstract**  
 In this paper is analyzed, through comparison, the cavitation erosion resistance of Duplex stainless steel, with a microstructure of approx. 50% austenite and 50% ferrite, solution annealed from 1060 degrees C with water cooling and finally nitrided at 520 degrees C for 40 hours in an ammonia environment. The cavitation test results were expressed by variation of mean depth erosion with the attack time and through the correlation between the attacked surface roughness and the erosion resistance. The microstructure investigations, with an optical microscope and electronic scanning microscope, explains the erosion mechanism of the surface layer, by starting and propagation of microcracks.

**Keywords**  
 Author Keywords: Cavitation erosion; stainless steel; gas nitriding

**Author Information**  
 Reprint Address: [Micu, LM](#) (reprint author)

### Citation Network

0 Times Cited  
 7 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 SciELO Citation Index

**Usage Count**  
 Last 180 Days: 0  
 Since 2013: 0  
[Learn more](#)

This record is from:  
**Web of Science™ Core Collection**



Web of Science [v.5.23.2] - x Web of Science [v.5.23.2] - x

https://apps.webofknowledge.com/full\_record.do?product=WOS&search\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AE1R1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig

Web of Science™ Incites™ 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

Full Text from Publisher Save to EndNote online Add to Marked List 6 of 11

**Laser beam treatment effect on AMPCO M4 bronze cavitation erosion resistance**

By: [Bordeasu, I](#) (Bordeasu, I)<sup>1</sup>; [Popoviciu, MO](#) (Popoviciu, M. O.)<sup>2,1</sup>; [Micu, LM](#) (Micu, L. M.)<sup>1</sup>; [Danca, OV](#) (Danca, O. V.)<sup>1</sup>; [Bordeasu, D](#) (Bordeasu, D.)<sup>1</sup>; [Pugna, A](#) (Pugna, A.)<sup>1</sup>; [Bordeasu, C](#) (Bordeasu, C.)<sup>1</sup>

Book Group Author(s): IOP

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2014 (ICAS2014)**  
 Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering  
 Volume: 85  
 Article Number: 012005  
 DOI: 10.1088/1757-8998/85/1/012005  
 Published: 2015

**Conference**  
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS)  
 Location: Engrn Fac Hunedoara, Hunedoara, ROMANIA  
 Date: OCT 02-04, 2014  
 Sponsor(s): Mil Econ Acad Wuhan, Politehnica Univ Timisoara, Wuhan Uni, Huazhong Univ Sci & Technol, Naval Univ Engrg, Zhongnan Univ Econ & Law, AF Early Warning Acad, Henri Coanda AF Acad Brasov, Univ Med & Pharm Victor Babes Timisoara, Scic Interdisciplinary Values Educ & Res Soc, Gen Assoc Romanian Engineers, Hunedoara Branch, Natl Soc Environm Sci & Engrg, S C Micro Mega HD S A, ArcelorMittal S A, S C Eurosport DHS S A, BeeSpeed Automatizari S R L, S C Opac Design Syst S R L, S C Ducodan S R L

**Abstract**  
 Ship propellers must resist simultaneously to ocean water corrosion and cavitation erosion. Until now, the best material used is the bronze with great copper content. These materials are expensive and there is the tendency to reduce the copper content while maintaining good properties. Such a material is AMPCO M4 used for manufacturing details for aircraft retractable landing assemblies. As a consequence we undertake cavitation erosion tests upon this bronze. In natural state (cast or even extruded) the cavitation resistance is not acceptable so, we improved the specimens by treating them with laser beams at three different impulse powers (160, 180 and 220 W). The cavitation erosion resistance was tested in the Cavitation Laboratory of Timisoara "Politehnica" University using a vibratory device respecting the conditions imposed by ASTM G32-2010 Standard. The comparisons with the genuine material (without any treatments) show that the applied procedure increased the hardness of the melted layer as well as the cavitation erosion behavior.

**Citation Network**  
 2 Times Cited  
 12 Cited References  
 View Related Records  
 View Citation Map  
 Create Citation Alert  
(data from Web of Science™ Core Collection)

**All Times Cited Counts**  
 2 in All Databases  
 2 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 SciELO Citation Index

**Usage Count**  
 Last 180 Days: 3  
 Since 2013: 7  
 Learn more

**Most Recent Citation**  
 Bordeasu, I. Researches upon

Web of Science [v.5.23.2] - x Web of Science [v.5.23.2] - x

https://apps.webofknowledge.com/full\_record.do?product=WOS&search\_mode=GeneralSearch&qid=1&SID=4AE1R1BJAqGfUgSmEwr&excludeEventConfig

Web of Science™ Incites™ 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

Full Text from Publisher Save to EndNote online Add to Marked List 7 of 11

**Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN 22-5-3 stainless steels**

By: [Micu, LM](#) (Micu, L. M.)<sup>1</sup>; [Bordeasu, I](#) (Bordeasu, I.)<sup>1</sup>; [Popoviciu, MO](#) (Popoviciu, M. O.)<sup>2,1</sup>; [Popescu, M](#) (Popescu, M.)<sup>1</sup>; [Bordeasu, D](#) (Bordeasu, D.)<sup>1</sup>; [Salcianu, LC](#) (Salcianu, L. C.)<sup>1</sup>

Book Group Author(s): IOP

**INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2014 (ICAS2014)**  
 Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering  
 Volume: 85  
 Article Number: 012019  
 DOI: 10.1088/1757-8998/85/1/012019  
 Published: 2015

**Conference**  
 Conference: International Conference on Applied Sciences (ICAS)  
 Location: Engrn Fac Hunedoara, Hunedoara, ROMANIA  
 Date: OCT 02-04, 2014  
 Sponsor(s): Mil Econ Acad Wuhan, Politehnica Univ Timisoara, Wuhan Uni, Huazhong Univ Sci & Technol, Naval Univ Engrg, Zhongnan Univ Econ & Law, AF Early Warning Acad, Henri Coanda AF Acad Brasov, Univ Med & Pharm Victor Babes Timisoara, Scic Interdisciplinary Values Educ & Res Soc, Gen Assoc Romanian Engineers, Hunedoara Branch, Natl Soc Environm Sci & Engrg, S C Micro Mega HD S A, ArcelorMittal S A, S C Eurosport DHS S A, BeeSpeed Automatizari S R L, S C Opac Design Syst S R L, S C Ducodan S R L

**Abstract**  
 The stainless steels Duplex 2205 with austenite and ferrite structure have mechanical characteristics close to those of martensite stainless steels but a better corrosion resistance; these steels are very sensitive on the heat treatments. Present work studies the cavitation erosion for those steels for three different heat treatments: simply quenched, annealed at 475 degrees C post quenching and annealed at 875 degrees C. The researches were undertaken at Timisoara "Politehnica" University in the Laboratory of Material Science and the Laboratory of Cavitation, using the T2 facility which integrally respects the recommendation of ASTM G32-10 Standard. The best results were obtained with the specimens annealed at 875 degrees C. In comparison with the stainless steel 41Cr4, with very good cavitation erosion qualities, all tested steels presented also good erosion resistance. So, Duplex 2205 steels can be used for details subjected to cavitation. The best results are obtained by increasing both the hardness and the quantity of the

**Citation Network**  
 0 Times Cited  
 14 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 SciELO Citation Index

**Usage Count**  
 Last 180 Days: 9  
 Since 2013: 14  
 Learn more

**This record is from:**  
 Web of Science™ Core Collection

## 130 Valorificare parțială a rezultatelor cercetării

The screenshot shows a Web of Science record for a conference paper. The title is "AUTOMATION POSSIBILITIES OF THIN SHEETS WELDING OF GREENHOUSES, LININGS TANKS AND WASTE DELINEATION COMPONENTS". The authors listed are Popescu, M (Popescu, Mihaela)<sup>1</sup>, Rosu, RA (Rosu, Radu Alexandru)<sup>1</sup>, Micu, LM (Micu, Lavinia Madalina)<sup>2</sup>, Ciurdariu, L (Ciurdariu, Loredana)<sup>1</sup>, and Ciurdariu, L (Ciurdariu, Loredana)<sup>1</sup>. The paper is part of the "GEOCONFERENCE ON NANO, BIO AND GREEN - TECHNOLOGIES FOR A SUSTAINABLE FUTURE" book series. The abstract discusses the welding of thin sheets in agriculture and the use of automation and robotics. The keywords include "thermoplastic sheets welding, geomembranes, welding by heating, process automation, quality factor". The author information indicates the reprint address is Popescu, M (reprint author) at Politehn Univ Timisoara, Timisoara, Romania.

The screenshot shows a Gmail inbox with an email from Cornel Hatiegan. The email subject is "volum ICAS2016" and it is dated 6 Jan. The email content includes a greeting "Dear colleagues," and a message stating that the recipient's papers presented at the "International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) 25-27 May 2016, Hunedoara, Romania" have been published in the "JOP Conference Series: Materials Science and Engineering, volume 163/2017". A link is provided: <http://jopscience.iop.org/issue/1757-898X/163/1>. The email concludes with "Thank you for attending the conference and for the quality of the papers." and "Best regards, L D Lemia, editor of the Proceedings ICAS2016". The sender's name is "Cornel Hatiegan" and the recipient is "Bordeasu Ilare".

Web of Science [v.5.23.2] - Web of Science [v.5.23.2] - volum ICAS2016 - Iarica59 - IOP Conference Series: Mat...

iopscience.iop.org/issue/1757-899X/163/1

IOPscience Journals Books Login

Search all IOPscience content Search Article lookup

IOP Conference Series: Materials Science and Engineering

Table of contents

Volume 163  
2017  
• Previous issue Next issue •

International Conference on Applied Sciences (ICAS2016)  
25–27 May 2016, Hunedoara, Romania

View all abstracts

Accepted papers received: 30 November 2016  
Published online: 6 January 2017

Preface

OPEN ACCESS International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) 011001  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS Peer review statement 011002  
+ View abstract View article PDF

Papers

OPEN ACCESS FEM modelling of soil behaviour under compressive loads 012001  
N Ungureanu, V Viăduț and S Șt Birș  
+ View abstract View article PDF

JOURNAL LINKS  
Journal home  
Information for organizers  
Information for authors  
Search for published proceedings  
Contact us  
Reprint services from Curran Associates

Web of Science [v.5.23.2] - Web of Science [v.5.23.2] - volum ICAS2016 - Iarica59 - IOP Conference Series: Mat...

iopscience.iop.org/issue/1757-899X/163/1

Published online: 6 January 2017

Preface

OPEN ACCESS International Conference on Applied Sciences (ICAS2016) 011001  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS Peer review statement 011002  
+ View abstract View article PDF

Papers

OPEN ACCESS FEM modelling of soil behaviour under compressive loads 012001  
N Ungureanu, V Viăduț and S Șt Birș  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion 012002  
I Bordașu, M O Popoviciu, L C Sălcăianu, C Ghera, L M Micu, R Badarau, A Iosif, L D Pirvulescu and C E Podoleanu  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS Experiments on composites meant for making brake pads for the rolling stock 012003  
A Socăliș, L Pasou, E Ardelean and V Puțan  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS EAF optimal managing elements 012004  
A Ioana, N Constantin and E C Dragna  
+ View abstract View article PDF

OPEN ACCESS Elements of EAF automation processes 012005  
A Ioana, N Constantin and E C Dragna  
+ View abstract View article PDF

iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/163/1/011002

## BIBLIOGRAFIE

- [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., OANĂ, 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, pp. 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] ARIBO S., BARKER R., HU X., NEVILLE A.: Erosion-corrosion behaviour of lean duplex stainless steels in 3,5% NaCl solution. *Wear* 302, 2013, pp. 1602-1608
- [8] AVELLAN F.: Introduction to cavitation in Hydraulic Machinery, Proceedings of the 6-th International Conference on hydraulic machinery and hydrodynamics, Timișoara, Romania, 2004
- [9] BARAN G.: Contribuții la studiul cavitației și eroziunii cavitaționale. Teză de doctorat. Facultatea Energetică, I.P.B., 1978
- [10] BEKKERS, K.: L'acier inoxydable. Evolution et tendances. *Revue de la soudure*, 1995, 3, pp. 78-81
- [11] BERCHICHE N., FRANC J.P., MICHEL J.M.: A Cavitation Erosion Model for Ductile Materials, *J.Fluids Engineering*, vol.124, 2002, pp. 601-606, 7 fig.
- [12] BILL L.: Activating flux-improving the performance of the TIG process, "Welding", vol. 68, nr. 2, 2000, pp. 7-10
- [13] BIRĂU N., KARABENCIOV A., BORDEAȘU I., JURCHELA A., DIMIAN D., BLEOANĂ E., ALEXESCU E.: Cercetări privind eroziunea cavitațională a două oțeluri inoxidabile austenitice, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, ISSN2067-7138, vol.17, Sebeș, 4-5 Iunie, 2010, pp. 431-434
- [14] BOEKHOLT, R.: Le lieu de travail des soudeurs au-delà de l'an 2000, "SOUDER", vol. 23, nr.5, 1999, pp. 33-43, 6 fig.
- [15] BOGACIOV I. N., MIUT R. I., VEKSLEV I. G.: Rezistența cavitațională a oțelurilor austenito-feritice, *Energomasinostroenie*, nr. 9, Leningrad, 1963
- [16] BORDEAȘU I., SERBAN V., VODA M., CODREAN C.: Cavitation Erosion for G-X5CrNi13.4, Martensitic Stainless Steel With Various Heat Treatments; *Scientific Buletin "Politehnica" University of Timișoara, Transaction of Mechanics*, Tom 49(63), ISSN:1224-6077, Timișoara, 2004, pp. 259-264
- [17] BORDEAȘU I.: Cavitation Erosion of Materials, Timișoara Polytechnic Publishing House, ISBN:(10) 973-625-278-7;(13) 978-973-625-278-5, 2006

- [18] BORDEAȘU I., PATRASCOIU C., BĂDĂRĂU R., SUCITU L., POPOVICIU M., BĂLĂȘOIU V.: New contributions in Cavitation Erosion Curves Modeling, FME Transactions Faculty of Mechanical Engineering, vol. 34 Nr. 1/2006, YU ISSN 1451-2092, University of Belgrade, 2006, pp. 39-44
- [19] BORDEAȘU I., ANTON L.E., BAYA A., JURCHELA A.D.: Considering cavitation erosion a mechanic phenomena, against chemical corrosion, Annals of DAAAM for 2008 Proceedings of The 19th International DAAAM Symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on New Generation of Intelligent Systems and Solutions", ISSN 1726-9679, ISBN 3-901509-58-5, Trnava, Slovakia, 2008
- [20] BORDEAȘU I., KARABENCIOV A., JURCHELA A., BĂDĂRĂU R., BĂLĂȘOIU V., MITELEA I., GHIBAN B.: Considerations on the influence of nickel on the cavitation damage to stainless steel by 0.1% carbon content and constant chrome content, *Metalurgia International*, vol. XIV, no. 12, ISSN 1582-2214, 2009, pp. 5-8
- [21] BORDEAȘU I., JURCHELA A., KARABENCIOV A., BORDEAȘU D., BODIN FI., Nickel's Influence over Cavitation Erosion Of Stainless Steels With Constant Chromium Content, *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timișoara Transactions on Mechanic, Special Iss.* ISSN 1224-6077, Tom 53 (67), Timișoara, 2008, pp. 421-424
- [22] BORDEAȘU I., POPOVICIU M., BĂLĂȘOIU V., JURCHELA A.D., KARABENCIOV A.: The Influence of the Vibratory Test Facility Type and Parameters upon the Cavitation Erosion Evolution, 25-th IAHR Symposium on Hydarulic Machinery and Systems, Timișoara, 20-24 September, 2010, pp. 282-290
- [23] BORDEAȘU I., DIMIAN E., KARABENCIOV A., JURCHELA A. D., BIRĂU N., LUSTYAN A., CÂMPIAN V.: Considerații privind comportarea la eroziune a unor oțeluri destinate creșterii rezistenței suprafețelor atacate prin cavitație, A X-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, Vol. 17, ISSN2067-7138, Sebeș, 4-5 Iunie, 2010, pp. 425-430
- [24] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.: Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening, *Machine Design*, ISSN 1821-1259, 2012
- [25] BORDEAȘU I., MITELEA I.: Cavitation erosion behavior for some stainless steels with constant nickel and variable chromium content, *MP Material Testing*, Iss. 01, ISSN: 0025-530, 2012, pp. 53-58
- [26] BORDEAȘU I., OANCĂ O., MITELEA I., CRĂCIUNESCU C.: Phenomenology of degradation by cavitation for heat treated Cu-Al-Ni-Fe bronzes. International Conference on Metallurgy and Materials, METAL, Brno, 2013, pp. 1561-1566
- [27] BORDEAȘU I., POPOVICIU M., **MICU L.M.**, SĂLCIANU LC, BORDEAȘU C.: Cavitation Erosion Researches upon Two Ampco Bronzes, *Machine Design*, Vol.6, No. 3, ISSN 1821-1259, 2014, pp. 97-102, **(BDI)**
- [28] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., MITELEA I., **MICU L.M.**, OANCĂ O., BORDEAȘU C., SĂLCIANU L., GHERA C.: Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze with heat treatments, "HIDRAULICA" , No. 2/2014, *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 1453-7303, 2014, pp. 53-61, **(BDI)**
- [29] BORDEAȘU I., POPOVICIU MO., **MICU L.M.**, OANCĂ O.V., BORDEAȘU D., PUGNA A., BORDEAȘU C.: Laser beam treatment effect on AMPCO M4 bronze cavitation erosion resistance, IOP Conference Series-Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, vol. 85, 2015, **(Conference ISI)**

- [30] BORDEAȘU I., **MICU Lavinia**, MITELEA I., UTU D., PIRVULESCU D., SIRBU A.: Cavitation erosion of HVOF metal-ceramic composite coatings deposited onto Duplex stainless steel substrate, *Revista de Materiale Plastice*, vol.53, no.4, București, ISSN: 0025/5289, 2016, pp. 781-786, factor impact 0,903, **(ISI)**
- [31] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., GHERA C., SĂLCIANU L.C., **MICU L.M.**, PODOLEANU C.E.: Cavitation erosion behavior of the steel 17 CrNiMo6, The 9th International Symposium KOD, 9-12 June, 2016, Hotel Marina, Balatonfüred, Hungary, pp. 163-169, **(International Conference)**
- [32] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., SĂLCIANU L., 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, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 163, 2017, **(Conference ISI)**
- [33] BRESLIN, J.P., ANDERSEN P.: *Hydrodynamics of ship propellers*, 3, Editor Cambridge University Press: United Kingdom, 2003
- [34] CHIU K.Y., CHENG F.T., MAN H.C.: Cavitation erosion resistance of AISI 316L stainless steel laser surface-modified with Ni-Ti, *Materials Science and Engineering A*. 392, 2005, pp. 348-358
- [35] COJOCARU V.: Cercetări privind creșterea duratei de viață a paletelor turbinelor hidraulice supuse la eroziune cavitațională, Teză de doctorat, Universitatea Eftimie Murgu din Reșița, 2013
- [36] COUSSEMENT C.: Application industrielle de l'acier inoxydable duplex dans l'industrie pétrochimique-endommagement d'un serpentin de réacteur en duplex. *Revue de la soudure*, 2, 1994, pp. 52-55
- [37] CRISTESCU C., **MICU L.M.**, DUMITRESCU C., KREVEY P.: Using load sensing control systems to increase energy efficiency of hydrostatic transmissions, *HIDRAULICA, Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics* ISSN 1453-7303, nr. 4/2015, **(BDI)**
- [38] DEFRANCQ J.: Problèmes de corrosion-choix responsable du matériau. Un beau défi. *Revue de la soudure*, 1, 1997, pp. 46-51
- [39] DE MEESTER, B.: Développement des matériaux de base pour le soudage, *Soudage et techniques connexes*, nr.7/8, 2000, pp. 17-27
- [40] DENYS, R.: Material Selection in the pipeline and offshore industries. Properties of welded high strength steels, *Revue de la Soudure*, nr. 1, 1997, pp. 52-61
- [41] DIMIAN M. E.: Cercetări asupra rezistenței la cavitație a aliajelor de titan cu structura bifazică, Teză de doctorat, Timișoara, 2012
- [42] DHOOGHE, A. ș.a.: Duplex stainless steels. Applications, advantages and limitations. *Revue de la soudure*, 1, 1997, pp. 63-70
- [43] DUVIVIER, J, P.: Echangeur de chaleur en duplex. *Revue de la soudure*, 2, 1994, pp. 60-61
- [44] ESCALER X., EGUSQUIZA E., FARHAT M., AVELLAN F.: Vibration cavitation detection using onboard measurements, Fifth International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-6-007, Osaka, Japan, 1-4 November, 2003
- [45] ESCALER X., FARHAT M., AUSONI F., EGUSQUIZA E., AVELLAN F.: Cavitation monitoring of hidroturbines: Test in a Francis turbine model, Sixth International Symposium on Cavitation CAV 2006, Wageningen, The Netherlands, September, 2006
- [46] ESCOBAR D.J., VELÁSQUEZ E., SANTOS T.F.A., RAMIREZ A.J., LÓPEZ D.: Improvement of cavitation erosion resistance of a duplex stainless steel through friction stir processing (FSP). *Wear*, Vol. 297, iss. 1-2, 2013, pp. 998-1005

- [47] ESPITIA A.L., TORO A.: Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components. *Tribology International*, 43, 2010, pp. 2037-2045
- [48] FRANK J.P., MICHEL J.M.: *Fundamentals of cavitation*. Kluwer Academic Publishers-Dordrecht/Boston/London, 2004
- [49] FRANC J.P., ș.a.: *La Cavitation, Mecanismes phisiques et aspects industriels*, Presse Universitaires de GRENOBLE, 1995
- [50] GADONNEIX P.: *Les recherches sur le transport du gaz naturel par gazoduc, Soudage et techniques connexes*, 1999, pp. 43-48
- [51] 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
- [52] GARCIA R.: *Comprehensive Cavitation damage Data for Water and Various Liquid Metals Including Correlation with Material and Fluid Properties*, Technical Raport Nr. 6, The University of Michigan, 1966
- [53] GARCÍA-GARCÍA D.M., GARCÍA-ANTÓN J., IGUAL-MUÑOZ A.: Influence of cavitation on the passive behaviour of duplex stainless steels in aqueous LiBr solutions. *Corrosion Science*. 50, 2008, pp. 2560-2571
- [54] GARZÓN C.M., THOMAS H., DOS SANTOS J.F., TSCHIPTSCHIN P.: Cavitation erosion resistance of a high temperature gas nitrided duplex stainless steel in substitute ocean water. *Wear* 259, 2005, pp. 145-153
- [55] GHERA C., BORDEAȘU I., SĂLCIANU L., DUMA S.T., KATONA S.-E., PUGNA A., **MICU L.M.**, PASCU L.F.: Considerations regarding the behaviour to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution, "HIDRAULICA" (No. 1/2015), *Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, ISSN 1453-7303, 2015, pp. 25-31, **(BDI)**
- [56] GERU N., ș.a.: *Analiza structurii materialelor metalice*, Editura Tehnică, București, 1991
- [57] GEORGEVICI I.: *Contribuți privind dezvoltarea unor oțeluri inoxidabile cu transformare martensitică directă*, Teză de doctorat, 2003
- [58] GORBATCH V. D., ș.a.: *Experience in design and application of adaptive control systems for the technological process of welding in shipbuilding*, (IIW Doc.XII-1694-2002), *Arc Welding Processes and Production and Production Systems*, Commission XII, Copenhagen 2002, pp. 327-334, 5 fig.
- [59] GRÄF M., HILLENBRAND H.G.: *Production of large-diameter line pipe-state of the art and future development trends*, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com)-26 pagini
- [60] GRÄF M. ș.a.: *Production and girth welding of submerged arc welded grade X80 large-diameter line pipe*, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com) - 21 pagini
- [61] GRÄF M. ș.a.: *Production of longitudinally welded large-diameter line pipe for dep water applications*, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com) - 13 pagini
- [62] GRÄF M., ș.a.: *Review of the HIC tes requirements for line pipe over the years 1975 to 2000*, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com) - 7 pagini
- [63] GRÄF M., ș.a.: *Production of large-diameter line pipe for the transportation of highly corrosive crude oil and natural gas*, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com) - 8 pagini

- [64] GRUBBS C.E., REYNOLDS T.J.: A continuing project seeks to improve under water welding techniques and electrodes and to increase the depths at which high-quality wet welds can be made, "WDG.J", vol. 77, nr. 9, September, 1998, pp. 35-38, 3 tab., 4 fig.
- [65] HAMMITT F.G., BHATT N.R.: Cavitation Damage resistance of Hardened Steels, Univ. Michigan, 1970, pp. 1-36
- [66] HAMMITT F.G.: Cavitation and Multiphase Flow Phenomena, McGraw Hill International Book Company, 1980
- [67] HARWING D., ș.a.: Semi-adaptive synergic fill welding tractor for ship erection, (IIW Doc.XII-1695-2002), Arc Welding Processes and Production and Production Systems, Commission XII, Copenhagen 2002, pp. 335-346
- [68] 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
- [69] HEYMANN F. J.: Toward Quantitative Prediction of Liquid Impact Erosion, ASTM STP, Vol.474, 1970, pp. 212
- [70] HILLENBRAND, H.G. ș.a.: Manufacturability of line pipe in grade up to X100 from TM processed plate, Material preluat de pe Internet de la adresa [www.europipe.com](http://www.europipe.com) - 13 pagini
- [71] HRIVNAK I.: Duplex stainless steel and their welding, Zvaranie, nr. 3-4, 2002, pp. 49-54
- [72] HWANG H., PARK Y.: Effects of Heat Treatment on the Phase Ratio and Corrosion Resistance of Duplex Stainless Steel, Materials Transactions, 50/6, 2009, pp. 1548-1552
- [73] ITO R. ș.a.: Microstructural analysis of softening regim in weld heat affected zone of ultra fine-grainend steels, Doc. IIW IX-1968-2000;
- [74] JURCHELA A.D., BORDEAȘU I., KARABENCIOV A., OANĂ O.: Cavitation resistance of stainless steels with constant chromium and carbon content, The 15<sup>th</sup> International Conference Modern Technologies, Quality and Innovation, ModTech 2011, Vadul lui Vodă, Chișinău, Republica Moldova, vol. I, 2011, pp. 549-552
- [75] JURCHELA A.D., BORDEAȘU I., MITELEA I., KARABENCIOV A.: Considerations on the Effects of Carbon Content on the Cavitation Erosion Resistance of Stainless Steels with Controlled Content of Chromium and Carbon, 21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25<sup>th</sup>, 2012
- [76] JURCHELA A.D.: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel, Teză de doctorat, Timișoara, 2012
- [77] KANNENGIESSER T. ș.a.: Influence de la résistance du metal d'aport et des conditions de soudage sur les forces de bridage et la distribution des contraintes dans les composants bridés, Soudage et techniques connexes, 2001, nr. 9-10, pp. 3-11
- [78] KARABENCIOV A., BORDEAȘU I., JURCHELA A.D.: Study of Stainless Steels Cavitation Erosion with 0.1 % Charbon and 10 % Nickel, Machine Design 2009, Monograph University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, 2009, ISSN 1821-1259, pp. 421-426
- [79] KARABENCIOV A., BORDEAȘU I., MITELEA I., JURCHELA A.: Considerations on the Cavitation Erosion Behavior of Two Stainless Steels with Similar Ratios of Structural Constituents, 21st International Conference on Metallurgy and Materials - 25<sup>th</sup>, 2012



- [80] KARABENCIOV A.: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom, Teză de doctorat, Timișoara, 2013
- [81] KARIMI A., Martin L.J.: Cavitation erosion of materials. *International Metals Review*. 31, 1986, pp. 1-26
- [82] KARIMI A.: Cavitation erosion of a duplex stainless steel. *Materials Science and Engineering* 86,1987, pp. 191-203
- [83] KARIMI A., LEO W.R.: Phenomenological model for cavitation erosion rate *Computation Material Science and Engineering*, 95, 1987, pp. 14
- [84] KARIMI A., HEUZE J. L.: Erosion de cavitation d'alliages amortissants a base de magnese et de cuivre, *La Houille Blanche*, nr. 7/8, 1992
- [85] KATONA S.-E., BORDEAȘU I., MITELEA I.: Contribution Regarding the Behavior to Cavitation Erosion of Some Austenitic Stainless Steels; 21st International Conference on Metallurgy and Materials - 25th, 2012
- [86] KNAPP R.T.: Recent investigations of the mechanics of cavitation and cavitation damage, *Trans ASME*, 77, 1955, pp. 1045-1054
- [87] KNAPP R.: Cavitation, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, 1970
- [88] KONKOL P.J. ș.a.: Weldability of HSLA-65 steel for ship structures "WDG.J", vol. 77, nr. 9, 1998, pp. 361s-369s, 6 tab., 12 fig.,15 ref. bibl.
- [89] KRELLA A., CZYNIIEWSKI A.: Cavitation erosion resistance of nanocrystalline TiN coating deposited on stainless steel. *Wear* 265, 2008, pp. 963-970
- [90] KUZMAN A.F.: Influența unor proprietăți fizice ale lichidului asupra incipienței și eroziunii cavitaționale, Teză de doctorat, Timișoara, 1992
- [91] LACOMBE P., BAROUX B., BERANGER G.: Les aciers inoxydables, Les éditios de physique, 1990
- [92] LAMBER T.: Deformația plastică și rezistența la cavitație a oțelurilor inoxidabile austenitice, Teză de doctorat, 1998
- [93] LIȚĂ M.: Tehnici pentru investigația materialelor, Editura Politehnică Timișoara, 2009
- [94] LO H.K.: Improvement of cavitation erosion resistance of AISI 316 stainless steel by laser surface alloying using fine WC powder. *Surface and Coatings Technology*, 165, 2003, pp. 258-267
- [95] LUKKARI J.: Off to Carabbean, the largest cruise liner in the word, *Svetsaren*, nr.2-3, 2001, pp. 11-13, 5 fig.
- [96] MAEKAWA M., MIYAGAWA K., KOMURO T., FUKUDA H.: Study of cavitation erosion on hydraulic turbine runners, Fifth International Symposium on Cavitation, Cav03-OS-6-015, Osaka, Japan, November 1-4, 2003
- [97] MĂNZĂNĂ M.E.: Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice, Teză de doctorat, București, 2012
- [98] MESA H.D.: Improvement of the cavitation erosion resistance of UNS S31803 stainless steel by duplex treatment. *Surface & Coating Technology*. , Vol. 205, 2010, pp. 1552-1556
- [99] **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., MITELEA I., GHERA C., SĂLCIANU Laura: Cercetarea eroziunii cavitaționale asupra oțelului inoxidabil X2CrNiMn22-5-3 tratat termic, *Știință și Inginerie*, an XIV, vol.26/2014, Sebeș-Alba, ISSN: 2067-7138, Editura AGIR, București, 2014, pp. 425-430, **(BDI)**
- [100] **MICU L.M.**, BORDEAȘU D., BORDEAȘU I., POPESCU Mihaela, OANĂ O., DUMA S.: Studii privind influența tratamentului termochimic de nitrurare asupra rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil duplex X2CrNiMoN22-5-3,

- "HIDRAULICA" (No. 4/2014), Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, ISSN 1453-7303, 2014, **(BDI)**
- [101] **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., POPOVICI O., BORDEAȘU C., BORDEAȘU D., SĂLCIANU Laura, OANĂ O.: Influence of vol. heat treatment on bronze resistance AMPCO M4 cavitation erosion, Pneumatics, Tools, Sealing elements, Fine Mechanics, Specific electronic equipment and Mechatronics-HERVEX, Călimănești-Căciulata, Romania, ISSN 1454-8003, 5-7 Noiembrie, 2014, pp. 136-141, **(National Conference)**
- [102] **MICU L.M.**, MITELEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., OANĂ V.O.: The transformations morphology by cavitation erosion of gas nitrited X2CrNiMoN 22-5-3 Duplex stainless steel, METAL 2015, 24<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 3-5 June, 2015, **(Conference ISI)**
- [103] **MICU L.M.**, MITELEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., POPESCU Mihaela: The influence of cooling rate from high temperature upon the cavitation erosion resistance of the Duplex stainless steel X2CrNiMoN22-5-3, Rev. Advanced Materials Research, vol.1111, ISSN1662-8985, 2015, pp.145-150, **(BDI)**
- [104] **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., POPOVICI M.O., OANĂ O., SĂLCIANU L., GHERA C.: Researches upon Cavitation Erosion Behavior of some Stainless Steels with Different Structures, "HIDRAULICA"(No. 4/2015), Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, ISSN 1453-7303, 2015, **(BDI)**
- [105] **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., POPESCU M., BORDEAȘU D., SĂLCIANU L.C.: Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN22-5-3 stainless steels, IOP Conference Series- Materials Science and Engineering, ISSN 1757-8981, vol. 85, 2015, **(Conference ISI)**
- [106] **MICU L.M.**, MITELEA I., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M., OANĂ O.V.: Improvement in cavitation erosion resistance of X2CrNiMoN22-5-3 Duplex stainless steel by laser beam nitration, METAL 2016, 25<sup>th</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 25-27 May, 2016, **(Conference ISI)**
- [107] **MICU L.M.**, Ghera C: Studies on the behaviour to the erosion to cavitation of the stainless steel-39Cr13, Research Journal of Agricultural Science, 48 (1), 2016, **(BDI)**
- [108] MIHĂILESCU D. ș.a.: Aspecte privind stabilirea arcului electric la sudarea subacvatică MAG-CO2 cu uscare locală, Conferința internațională de știința și ingineria materialelor - "BRAMAT 2001", vol. III, Brașov, 2001, pp. 109-114
- [109] MILLAR, D.W.: Welding automation in Japanese shipbuilding, "Welding", vol. 68, nr. 3, 2000, pp. 8-10, 7 fig.
- [110] MITELEA I., BUDAU V.: Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate, Editura de Vest, 1992
- [111] MITELEA I., GEORGEVICI I.: Noi oțeluri inoxidabile în construcția echipamentelor pentru generarea puterii hidoelectrice, Simpozionul internațional Zilele Academice Timișene, Secția Materiale avansate, Ediția a VII-a, Timișoara, 24-25 Mai, 2001, pp. 64-69
- [112] MITELEA I., GEORGEVICI I., RADU B.: Particularities of microstructural transformation during tempering stainless steel 13/6/1 (13%Cr, 6%Ni, 1%Mo), Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 47 (61), Seria Mecanică, fascicola 2, ISSN 1224-6077, 2002, pp. 107-112
- [113] MITELEA I., GEORGEVICI I., RADU B.: The effect of quenching-tempering heat treatment on internal stresses of 13/6/1 (13%Cr, 6%Ni, 1%Mo), stainless

- steel, Buletinul Științific al Universității Politehnica Timișoara, Tom 48 (62), Seria Mecanică, fascicola 2, ISSN 1224-6077, 2003, pp. 117-120
- [114] MITELEA I., BORDEAȘU I., POPOVICIU M., HADAR A.: Corrosion of Stainless Steels with "Soft" martensitic Structure, Chem.Abs. RCBUAU 58(2), Revista de chimie, ISSN:0034-7752, vol. 58 (2) Nr. 2/2007, pp. 254-257
- [115] MITELEA I.: Știința materialelor, Vol. I, Editura Politehnica, Timișoara, 2009
- [116] MITELEA I., BORDEAȘU I., KATONA S.-E.: Influence of the solution treatment temperature upon the cavitation erosion resistance for 17-4 PH stainless steels, Metal 2013, 22<sup>nd</sup> International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, ISBN: 978-80-87294-41-3, May 15-17, 2013, pp. 208-213
- [117] MITELEA I., DIMIAN E., BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M.: Ultrasonic cavitation erosion of gas nitrated Ti-6Al-4V alloys, Journal Ultrasonics Sonochemistry, 21, 2014, pp. 1544-1548
- [118] MITELEA I., **MICU L.M.**, BORDEAȘU I., CRĂCIUNESCU C.M.: Cavitation erosion of sensitized UNS S31803 Duplex Stainless Steels, Journal of Materials engineering and performance, vol. 25 (5), 2016, pp. 1939-1944, factor impact 1,20 (**ISI**)
- [119] MOCHIZUKI H., YOKOTA M., SUGIYAMA K., KISIMOTO M., HATTORI S.: Cavitation Erosion Resistance of Austenitic-Ferritic Duplex Stainless Steel, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers A. 74/740, 2008, pp. 605-610
- [120] MURARAY R.G.: Fabricating the Main machinery raft for Astute class submarines, „WELDING”, vol. 69, nr. 8, 2001, pp. 4-6, tab.
- [121] NEDELONI M.D.: Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice, Teză de doctorat, Reșița, 2012
- [122] NIES H. ș.a.: Sudarea cu sârme tubulare în construcțiile navale, "Sudura-ASR", an 10, nr. 3, 2000, pp. 15-18, 1 fig
- [123] NOSKIEVIC J.: The extend mathematical model of cavitation and erosion wear, Proc 6th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1983
- [124] OANCA O.: Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale, Teză de doctorat, Timișoara, 2014
- [125] PARDEEP K., SAINI R.P.: Study of cavitation in hydro turbines—A review, ScienceDirect, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14,2010, pp.374-383
- [126] PARK M.C., KIM J.H., KIM S.J.: Effect of carbon on the cavitation erosion resistance of Fe-Ni-C austenitic alloys, Division of materials science and engineering, Hanyang university, Seoul, Korea, 2009, pp. 133-791
- [127] 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
- [128] PAZER G.: Squaring the circle, "GL MAGAZIN" nr. 1, 2001, pp. 4-7, 5 fig.
- [129] PĂDUREAN I.: Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile, Teză de doctorat, 2005
- [130] PÎLAEV N.I., EDELI .U.: Kavitatia v ghidroturbinah, Masinostroenie, Leningrad, 1974
- [131] POPOVICIU M., BORDEAȘU I.: A quantitative method of estimating the cavitation Buletinul Științific, Universitatea Politehnica "Timișoara", vol. 41(55), 1996

- [132] POPOVICIU M., BORDEAȘU I.: A standard material for cavitation erosion tests, Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, vol. II, Timișoara, 1994
- [133] POPOVICIU M., BORDEAȘU I.: Cavitation resistance evaluation for materials used in ship propellers and hydraulic turbine manufacturing, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, vol. 39 (53), Fascicula 1-2, 1994
- [134] POPOVICIU M., BORDEAȘU I.: Considerations upon the stating of cavitation Average service life of Nodular Cast from Castings and the Alloys utilised for naval propellers, Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice, Timișoara, Vol.40 (51), 1993
- [135] POPOVICIU M.O., BORDEAȘU I.: Contributions concernant les influences des proprietes mecaniques des materiaux sur la vitesse d'erosion cavitationnelle, Bulletin Științific și Tehnic, Universitatea Tehnică, Timișoara, vol. 40 (51), 1993
- [136] POPOVICIU M.O., BORDEAȘU I.: Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice, Editura Politehnica, Timișoara, 1998
- [137] PULINO-SAGRADI D., a.o.: Effect of temperature and strain rate on cavitation in a super plastic duplex stainless steel. Acta Materials, vol. 45, iss. 11, 1997, pp. 4663-4666
- [138] RITTER J.C. ș.a.: Experience with welding technology on HSLA steel in the Collins submarine, "AUS.WELD.", vol.44, nr. 4, 1999, pp. 38-47, 2 tab., 8 fig., 8 ref. bibl.
- [139] RUTH M.J.: A new shipyard services the offshore oil industry, "WDG.J.", vol. 78, nr. 2, 1998, pp. 39-41, 4 fig.
- [140] SAIDOV R., ș.a.: Le soudage A-TIG de l'acier inoxydable superduplex UR52N+. Soudage et techniques connexes, 7/8, 1999, pp. 3-8
- [141] SAKAI I., SHIMA A.: On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials, Report No. 385, Tokyo, 1987
- [142] SĂLCIANU Laura Cornelia, BORDEAȘU Ilare, MITELEA Ion, **MICU L.M.**: Mechanical hardening and resistance to cavitation erosion of the austenitic stainless steels with varying proportions of delta ferrite, METAL 2014, Metallurgy and Materials, May 21-23, 2014, Brno, Czech Republic, EU, 2014, (**Conference ISI**)
- [143] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O., SĂLCIANU L., GHERA C., **MICU L.M.**, BADARAU R., PIRVULESCU L.G., PODOLEANU C.E.: A new concept for stainless steel ranking upon the resistance to cavitation erosion, International Conference on Applied Sciences (ICAS 2016), IOP Conf.Series: Materials Science and Engineering 153 (2017)-012002 doi: 10.1088/1737-899X/163/1/012002), 2017 (**Conference ISI**)
- [144] SCHEFFEL M., ș.a.: Dispozitive cu ultrasunete, Partea a II a, Editura Tehnica, Bucuresti, 1989
- [145] SCOTTO V. ș.a.: Corrosion- Scientifique, vol. 19. pp 237, 1979
- [146] SHIPYARD K.D.: Tankers are a composition in duplex stainless, "Welding", vol. 68, nr. 6, 2000, pp. 15-17, 4 tab., 2 fig.
- [147] SIMONEANU R.: Cavitation pit counting and steady-state erosion rate, International Symposium on Cavitation, CAV '95, Deauville, France, 1995
- [148] 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
- [149] SOLOMON H.: A tale of two phases. Paper No.8201-089, Duplex Stainless Steels, ASM International, Metals Park, Ohio, 1983, pp. 693-756
- [150] STELLER J.K.: International cavitation erosion test-summary of results, ImechE Cavitation Conf., 1992, pp. 95-102

- [151] STANDHAMMER K. P., ș.a.: Acta Metall., vol. 31, nr. 2, 1983, pp. 267
- [152] STELLER J. K.: International Cavitation Erosion Test-Test Facilities and Experimental Results, 2-émés Journées Cavitation, Paris, March, 1992
- [153] STELLER J.K.: International cavitation erosion test-summary of results, ImechE Cavitation Conf., 1992, pp. 95-102
- [154] STELLER, J., GIREN B.G.: International Cavitation Erosion Test. Final Report, Gdansk, ISSN 0239-9091, 2015
- [155] STILL J.R., Speck, J.B.: Hull weld quality critical for offshore oil production wessels, "WDG.J", vol.79, nr.8, 2000, pp. 33-38, 5 fig., 6 tab.
- [156] SUCIU V., SUCIU M.V.: Studiul materialelor, București: Fair Partners, 2008;
- [157] TERWISGA T.J.C., WIJANGAADEN E., BASSCHERS J., KUIPER G., Cavitation research on ship propellers, Sixth International Symposium on Cavitation CAV, Wageningen, The Netherland, September, 2006
- [158] THIRUVEGADAM A., PREECE: On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233-3, 1963
- [159] TROMMER G., Metodă de sudare cu sârmă caldă, bază a unor soluții tehnice superioare, "Sudura-ASR", an 10, nr. 2, 2000, pp. 24-26, 4 fig.
- [160] TRUȘCULESCU M, IEREMIA A.: Oțeluri inoxidabile și refractare, Editura Facla, Timișoara, 1983
- [161] TURC C. A., OANĂ O. V.: Tool Holding Device with Incorporated Ultrasound Activation System for Machining by Chip Removal, Grinding And Ultrasonic Erosion, Patent Number(s): RO128369-A0, 30 May, 2013
- [162] VENNEKENS R.: Qu'est-ce que l'acier inoxydable? Revue de la soudure, 2, 1994, pp. 22-28
- [163] YURIOKA N., ș.a.: A bayesian neural network analysis on the tensile strength, FATT and hardness of large-heat-input SAW welds. Effect of Al/O on toughness, Doc. IIW-1962-2000
- [164] 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
- [165] \*\*\* ASTM Standard G 32. Cavitation erosion using vibratory apparatus. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2010
- [166] \*\*\* Längsnahtgeschweisste Rohre für die Trans-Austria-Gasleitung, Schweißen und Schneiden, nr. 9, 2001, pp. 549
- [167] \*\*\* Registrul Naval Român, Reguli pentru clasificarea și construcția navelor maritime, Partea A XIII, Materiale, Partea A XIV, Sudarea, 1990
- [168] \*\*\* Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32-85, 1985
- [169] \*\*\* Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32-10, 2010
- [170] \*\*\* <http://www.inoxservice.hu/index.php/ro/rozsdamentesacel>
- [171] \*\*\* <http://www.creeaza.com/tehnologie/tehnica-mecanica/Sudarea-otelul-inoxidabil-DUPL261.php>
- [172] \*\*\* <http://www.outokumpu.com/SiteCollectionDocuments/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-Data-Sheet.pdf>
- [173] <http://marcomen2a.blogspot.com/2009/06/cavitation.html>
- [174] <http://khia.belzona.com>
- [175] <http://jacpump.wordpress.com>