



Universitatea
Politehnica
Timișoara

Universitatea Politehnica Timișoara
Facultatea de Mecanică
Departamentul: MMUT

EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ A OȚELURILOR INOXIDABILE CU TRANSFORMARE MARTENSITICĂ INDIRECTĂ

- TEZĂ DE DOCTORAT -

= REZUMAT =
(limba română)

Conducători științifici: Prof.univ.dr.ing. Ilare BORDEAȘU
Prof.univ.dr.ing. Ion MITELEA

Doctorand:
Ing. Ștefan-Eusebiu KATONA

2017

CUPRINS

INTRODUCERE	7
1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE FOLOSITE LA ECHIPAMENTELE HIDROMECHANICE	9
1.1. Baze fundamentale	9
1.2. Elementele de dificultate ale problematicii abordate. Standuri de laborator ...	11
1.3. Limitările abordărilor curente legate de tematica cercetării	15
1.4. Metode de evaluare a comportării materialelor la eroziunea cavitațională	15
1.5. Obiectivele tezei de doctorat	17
2. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND OȚELURILE INOXIDABILE FOLOSITE ÎN FABRICAREA PIESELOR SOLICITATE LA CAVITAȚIE	18
2.1. Clase structurale de oțeluri inoxidabile	18
2.2. Constituția și caracteristicile de transformare ale oțelurilor inoxidabile cu transformare controlată	21
2.2.1. Proprietăți mecanice caracteristice	25
2.2.2. Alegerea compoziției chimice de bază	27
2.2.3. Efectul elementelor de aliere asupra compoziției de bază 17%Cr - 4%Ni ...	29
2.3. Concluzii	30
3. MATERIALUL CERCETAT. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ	32
3.1. Compoziția chimică, microstructura și proprietățile mecanice ale oțelului cercetat și metoda folosită	32
3.2. Standul experimental și metoda folosită pentru testarea rezistenței la cavitație	36
3.3. Concluzii	42
4. INFLUENȚA TRATAMENTELOR TERMICE VOLUMICE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE	43
4.1. Călirea pentru punerea în soluție și rezistența la eroziune prin cavitație	43
4.2. Efectul îmbătrânirii primare și secundare asupra rezistenței la eroziune prin cavitație	50
4.2.1. Tratamente termice, microstructură, proprietăți mecanice	50
4.2.2. Curbe de cavitație	53
4.2.3. Topografia suprafețelor erodate	59
4.3. Tratamentul de refrigerare și rezistența la eroziune prin cavitație	63
4.3.1. Examinări sclerometrice	63
4.3.2. Teste de cavitație	65
4.3.3. Topografia suprafețelor testate cavitațional	80
4.3.4. Analize microstructurale	83
4.4. Concluzii	84
5. ROLUL TRATAMENTULUI TERMOCHIMIC DE NITRURARE CU LASER ÎN CREȘTEREA REZISTENȚEI LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE	86
5.1. Introducere	86
5.2. Procedura experimentală	86
5.3. Curbe de cavitație	87
5.4. Microstructură, proprietăți mecanice	95
5.5. Concluzii	102

6. REZISTENȚA LA CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE 17-4 PH ACOPERITE CU STRATURI DE PULBERI CERAMICE	103
6.1. Introducere	103
6.2. Bazele procesului de pulverizare	103
6.3. Caracteristicile stratului depus	107
6.4. Aspecte tehnologice la pulverizarea termică în jet de plasmă	111
6.5. Materiale, aparatură, parametri de proces	111
6.6. Teste de cavitație	113
6.7. Analize microstructurale	120
6.8. Concluzii	123
7. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. NOI DIRECȚII DE CERCETARE	124
BIBLIOGRAFIE	128

INTRODUCERE

Eroziunea cavitațională este prezentă aproape în toate domeniile unde fluidele sunt în mișcare. Acest fenomen ia naștere prin transmiterea unor forțe generate de implozia repetată a unor bule de vapori, formate în zonele în care presiunea fluidului scade sub o anumită valoare critică. Efectele manifestării eroziunii cavitaționale asupra echipamentelor hidraulice sunt: reducerea performanțelor, zgomote și vibrații, și eroziunea frontierelor solide ce ghidează curgerea [2], [3], [9], [28], [29], [30], [31], [35].

În laboratoare, cercetarea distrugerii prin eroziune cavitațională se face cu aparate vibratorii ultrasonice [1], [2], [7], [9], [23], [28], [94], [97], [130], tunele hidrodinamice sau aparate cu disc rotitor. Deși tunelele hidrodinamice redau cel mai bine curgerea cavitațională, datorită costurilor ridicate și timpului îndelungat de studiu, pentru cercetarea rezistenței și comportării materialului la degradarea prin cavitație se folosesc aparatele vibratorii, datorită, în primul rând, duratei foarte scurte de producere a eroziunii, chiar dacă fenomenul generat este complet diferit de cel din mașina hidraulică.

În cadrul lucrării este cercetat la cavitație oțelul inoxidabil cu transformare martensitică indirectă, din grupa 17-4 PH, supus la 3 tratamente: termice volumice (8 regimuri, din care 4 regimuri de călire și 4 regimuri de refrigerare), termochimice de nitrurare laser (3 regimuri) și acoperire cu straturi prin pulverizare și retopire cu laser (3 regimuri). Cercetările realizate au drept scop punerea în evidență a efectului produs de schimbarea morfologiei suprafeței asupra rezistenței la cavitație și a comportamentului oțelului în timpul atacului distructiv ca urmare a modificărilor microstructurale intervenite și a valorilor caracteristicilor mecanice.

1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRILOR PRIVIND EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE FOLOSITE LA ECHIPAMENTELE HIDROMECHANICE

1.1. Baze fundamentale

Cavitația este un fenomen complex de interacțiune a unor procese hidrostactice, mecanice, metalurgice și chimice [2], [3], [6], [9], [29], [105]. Ea este specifică mașinilor hidraulice de tipul turbinelor, pompelor, elicelor navale, vanelor sau schimbătoarelor, motoarelor Diesel, rulmenților, etc. [5], [6], [9], [29]. În fig. 1.1 a,b se exemplifică deteriorarea prin cavitație a unei palete de rotor de pompă. O astfel de daună conduce la diminuarea capacității de pompare și în final la avarierea rotorului pompei.

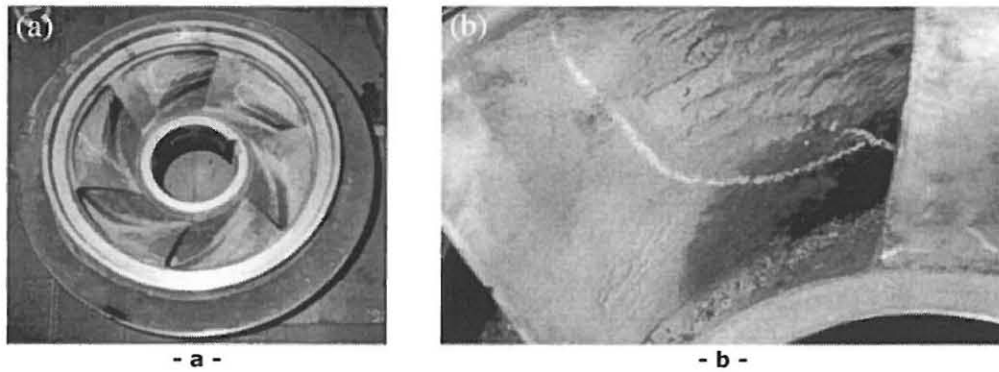


Fig. 1.1 Pompă de apă executată din oțel inoxidabil austenitic AISI 316 [6], [9]:
 a – rotorul pompei de apă;
 b – degradarea prin cavitație a paletei rotorului

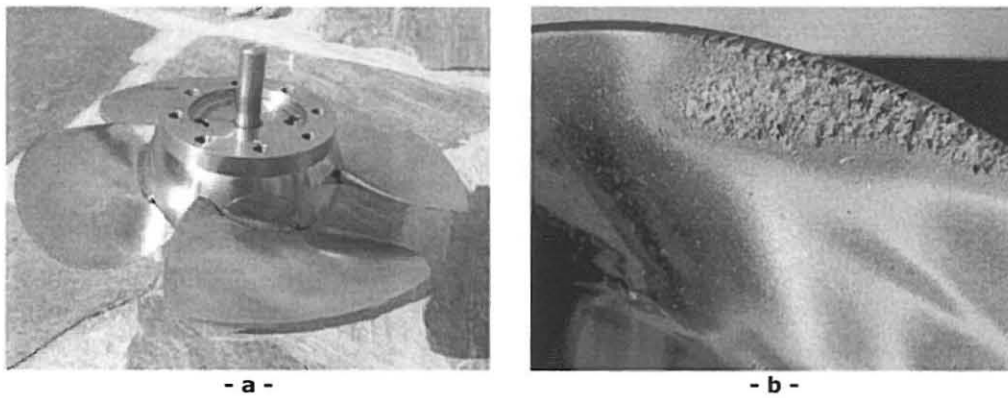


Fig. 1.2 Turbină Kaplan executată din oțel inoxidabil [6], [9]:
 a – rotorul turbinei înainte de degradarea prin eroziune cavitațională;
 b – paleta rotorului după degradarea prin eroziune cavitațională

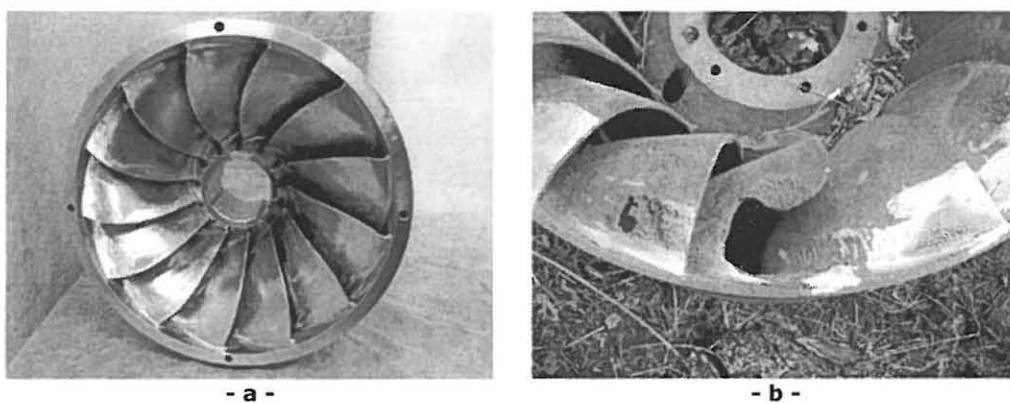


Fig. 1.3 Turbină Francis executată din oțel inoxidabil [6], [9]:
 a – rotorul turbinei înainte de degradarea prin eroziune cavitațională;
 b – paleta rotorului după degradarea prin eroziune cavitațională

1.5. Obiectivele tezei de doctorat

Principalele obiective urmărite sunt:

- rolul tratamentului de refrigerare în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor inoxidabile 17-4 PH;
- dezvoltarea unui tratament termic de îmbătrânire primară, ca soluție alternativă, pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziune prin cavitație;
- impactul unor tratamente de suprafață (nitrurare, pulverizare termică) în reducerea vitezei de eroziune prin cavitație;
- morfologia și caracterizarea microstructurii suprafețelor din oțeluri 17-4 PH solificate la eroziunea cavitației.

În cadrul tezei, cercetările au fost efectuate pe oțelul inoxidabil cu transformare martensitică indirectă, din grupa 17-4 PH, deoarece acest material este utilizat pe scară largă la execuția unor componente pentru echipamente hidraulice [3], [34], [109].

Noutatea tezei de doctorat constă în oportunitatea aplicării unor tehnici speciale de tratamente volumice (refrigerare, îmbătrânire primară) și a unor tehnici moderne de ingineria suprafețelor (nitrurare laser, pulverizare HVOF) pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziunea cavitațională a unui oțel inoxidabil cu transformare martensitică indirectă, din grupa 17-4 PH.

2. CONSIDERAȚII GENERALE PRIVIND OȚELURILE INOXIDABILE FOLOSITE ÎN FABRICAREA PIESELOR SOLICITATE LA CAVITAȚIE

2.1. Clase structurale de oțeluri inoxidabile

Oțelurile inoxidabile prezintă în compoziția lor chimică o concentrație în Cr de peste 10,5% și prin aplicarea unor tratamente termice sau mecanice se obține un spectru larg al proprietăților chimice, fizice și mecanice.

2.3. Concluzii

- s-a arătat că prin tratamente volumice, cu parametri de proces bine corelați (temperatura și durata de încălzire, mediul de răcire) se poate obține o structură stabilă (de tip martensită), care să confere oțelului o comportare superioară la eroziunea cavitației;
- s-a evidențiat modalitatea de realizare a tratamentului de refrigerare, prin care se poate realiza un raport între limita de curgere și rezistența la rupere, satisfăcător pentru o rezistență sporită la eroziunea cavitației;
- s-a făcut o sinteză a rezultatelor cercetărilor realizate până în prezent, cu privire la proporția corectă de elemente chimice Ni, Cu, Mn, Co, C și N, în compoziția oțelului inoxidabil, astfel încât să se reducă domeniul de ferită (componenta structurală cu cea mai redusă rezistență la eroziunea cavitației) și să crească cel de martensită (componenta structurală cu cea mai ridicată rezistență la distrugerea prin cavitație).

3. MATERIALUL CERCETAT. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

3.1. Compoziția chimică, microstructura și proprietățile mecanice ale oțelului cercetat și metoda folosită

Oțelurile inoxidabile cu transformare controlată din grupa 17-4 PH numite și oțeluri inoxidabile semiaustenitice combină cele mai atractive proprietăți specifice oțelurilor austenitice (sudabilitate și deformabilitate) și martensitice (rezistența mecanică ridicată), modificarea acestora fiind posibilă printr-un tratament termic aplicat în urma prelucrărilor tehnologice.

3.2. Standul experimental și metoda folosită pentru testarea rezistenței la cavitație

Testele de eroziune cavitațională au fost efectuate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, pe un aparat vibrator cu cristale piezoceramice (fig. 3.5), construit după cerințele normelor ASTM G32-2010 [130], similar aparatului model de la Universitatea din Michigan.

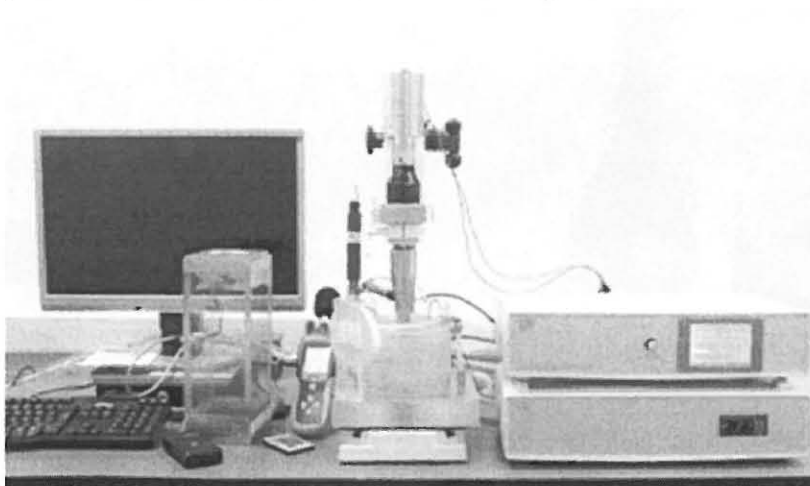


Fig. 3.5 Aparatul vibrator cu cristale piezoceramice [94], construit după cerințele normelor ASTM G32-2010

Parametrii funcționali ai aparatului sunt:

- Puterea dezvoltată de generatorul electric: 500 W;
- Frecvența vibrațiilor: 20.000 ± 200 Hz;
- Amplitudinea vibrațiilor: 50 μ m;
- Diametrul probei: 15,8 mm;
- Tensiunea de alimentare: 220 V / 50 Hz;
- Temperatura lichidului de lucru: 22 ± 1 °C;
- Tipul probei de testare: vibratoare.

Ca mediu lichid s-a folosit apă potabilă de la rețeaua publică, în locul apei distilate, așa cum recomandă normele ASTM G32-2010, deoarece duratele testate (ale perioadelor intermediare) sunt scurte și pierderile de masă prin eroziunea

cavitației nu sunt afectate de coroziunea chimică. Pe parcursul cercetărilor temperatura apei a fost menținută la valoarea de 22 ± 1 °C.

3.3. Concluzii

- Oțelul ales pentru studiu este unul folosit în România și alte țări la turnarea paletelor și rotoarelor de turbine hidraulice.
- Compoziția chimică și structura sa, stabilită pe baza diagramei Schäßler, sunt elemente care, prin tratamente termice de călire volumică cu punere în soluție asigură modificări de structură și creșteri ale proprietăților mecanice, ce-i conferă foarte bune comportări și rezistențe la diverse intensități ale atacului cavitației.
- Aparatura folosită în producerea cavitației și pentru investigație microscopică este modernă, performantă, de ultimă generație, care oferă certitudine în derularea experimentului, analiza și evaluarea rezultatelor la cel mai înalt nivel științific.

4. INFLUENȚA TRATAMENTELOR VOLUMICE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE

4.1. Călirea pentru punerea în soluție și rezistența la eroziune prin cavitație

Ca probe etalon au fost utilizate cele provenite din oțelul OH12NDL utilizat la execuția paletelor turbinelor hidraulice de la Centrala Hidroelectrică Porțile de Fier I și II.

Imaginile din fig. 4.2 arată că prin călire volumică cu punere în soluție la 1050 °C/aer suprafața are o rezistență superioară celei realizate prin călire la 950 °C/aer.

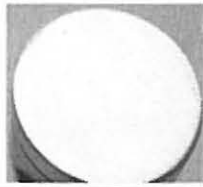

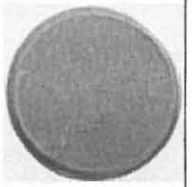



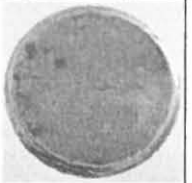

Stare de tratament termic	Durata de atac cavitațional, în minute			
	0	60	90	165
Călire de la 950 °C/aer				
Călire de la 1050 °C/aer				

Fig. 4.2 Aspectul suprafeței probelor de cavitație

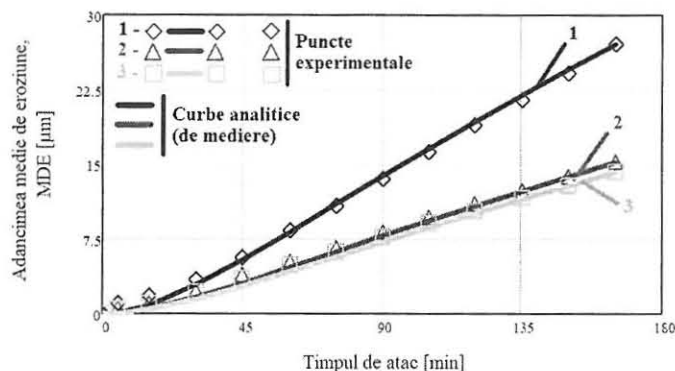


Fig. 4.8 Compararea curbelor specifice ale adâncimilor medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației: 1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH călit de la 950 °C/aer; 3 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer

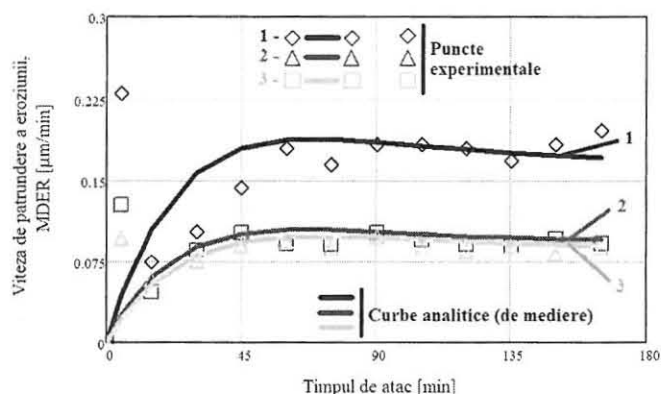


Fig. 4.9 Compararea curbelor specifice vitezelor medii de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației: 1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH călit de la 950 °C/aer; 3 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer

Așadar, datele obținute demonstrează că temperatura de călire pentru punere în soluție de 1050 °C asigură cea mai înaltă rezistență la eroziune prin cavitație și că ambele stări de tratament termic de călire conduc la rezultate mai bune comparativ cu oțelul etalon.

4.2. Efectul îmbătrânirii primare și secundare asupra rezistenței la eroziune prin cavitație

4.2.1. Tratamente termice, microstructură, proprietăți mecanice

Aplicarea tratamentului de îmbătrânire primară la 700 °C (fig. 4.10), favorizează creșterea durității Vickers (328 – 338 HV) doar la probele austenitizate la 1050 °C (fig. 4.11); acest lucru se datorește transformării unei părți din austenita metastabilă în martensită; în schimb, probele călite de la 950 °C și supuse ulterior îmbătrânirii primare la 700 °C, posedă practic valori de duritate (318 – 323 HV) similare cu cele specifice călirii pentru punere în soluție (fig. 4.12); acest fapt este o

urmare a conținutului relativ scăzut în carbon al oțelului, implicit a unei proporții limitate de carburi precipitate și a unei concentrații similare în carbon și în crom a austenitei atât după tratamentul de punere în soluție cât și după tratamentul de îmbătrânire primară.

Fig. 4.13 și 4.14 exemplifică microstructurile specifice oțelului revenit la temperaturi de 450 °C.

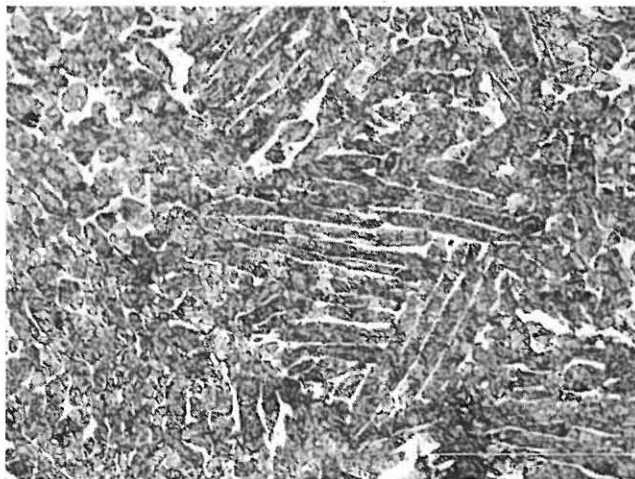


Fig. 4.13 x 200. Imaginile micrografice ale probelor supuse călirii pentru punere în soluție, 950 °C/aer, urmată de îmbătrânire primară 700 °C/aer și de revenire 450 °C/aer

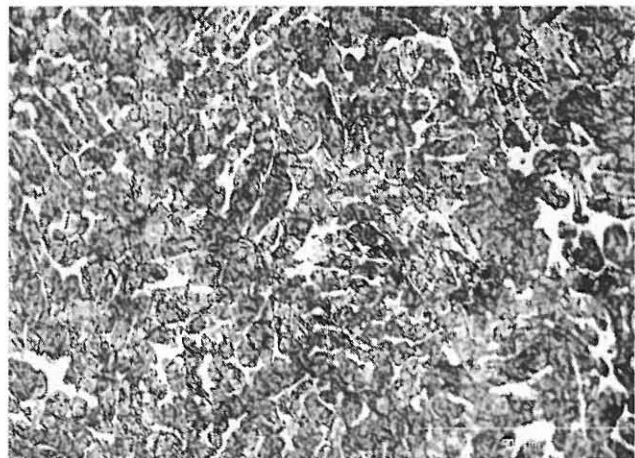


Fig. 4.14 x 200. Imaginile micrografice ale probelor supuse călirii pentru punere în soluție, 1050 °C/aer, urmată de îmbătrânire primară 700 °C/aer și de revenire 450 °C/aer

4.2.2. Curbe de cavitație

Fig. 4.15 exemplifică imaginile suprafeței probelor înainte și după testele de cavitație la momente diferite de timp pentru cele două tipuri de tratamente termice aplicate.

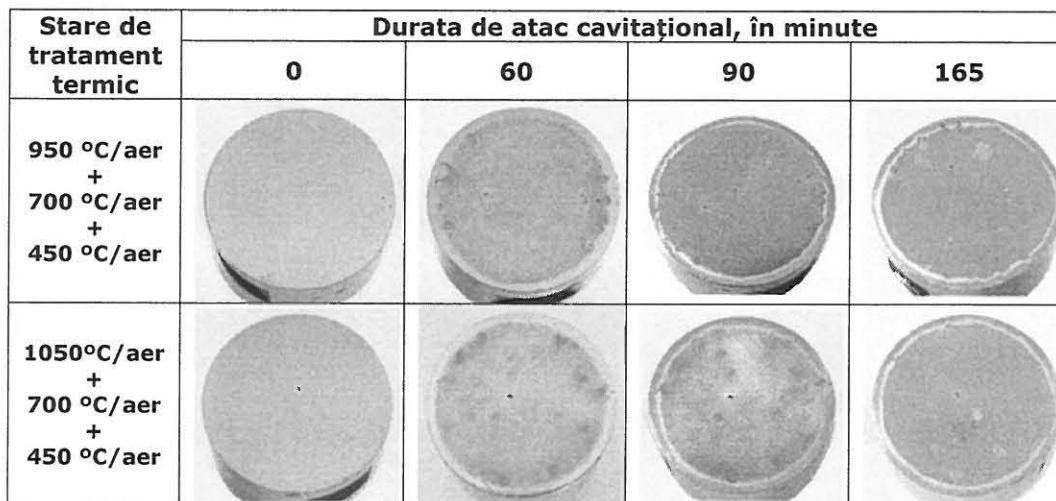


Fig. 4.15 Aspectul suprafeței probelor de cavitație

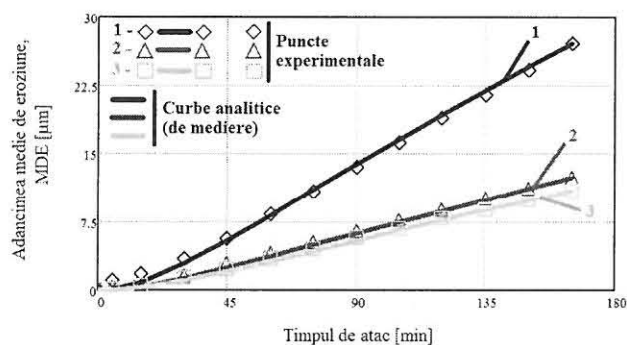


Fig. 4.21 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitației:

1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH călit de la 950 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 3 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer

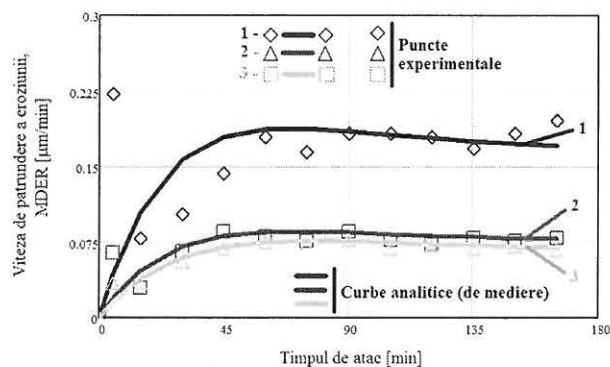


Fig. 4.22 Evoluția vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației:

1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 950 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 3 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer

Datele obținute demonstrează că ambele regimuri de tratament termic asigură o rezistență la eroziune prin cavitație superioară celei a oțelului etalon și că realizarea austenitizării pentru călire la 1050 °C reprezintă soluția optimă de tratament termic.

4.2.3. Topografia suprafețelor erodate

În fig. 4.23 și 4.24 se exemplifică imagini cu topografia suprafeței probelor tratate termic diferit.

Tratamentul termic bazat pe o austenitizare la 1050 °C, călire în aer și îmbătrânire conduce la o microstructură cu duritate mai ridicată și implicit la o degradare mai uniformă a suprafeței prin cavitație (fig. 4.24).

Microstructura secțiunilor transversale prin suprafețele erodate (fig. 4.25) vine să confirme faptul că inițierea cavitațiilor la ambele regimuri de tratament termic se produce în insulele de ferită și pe limitele de separație dintre acestea și matricea de martensită. La sfârșitul perioadei de atac cavitațional în fostele zone de ferită apar forme de râuri mai mult sau mai puțin extinse.

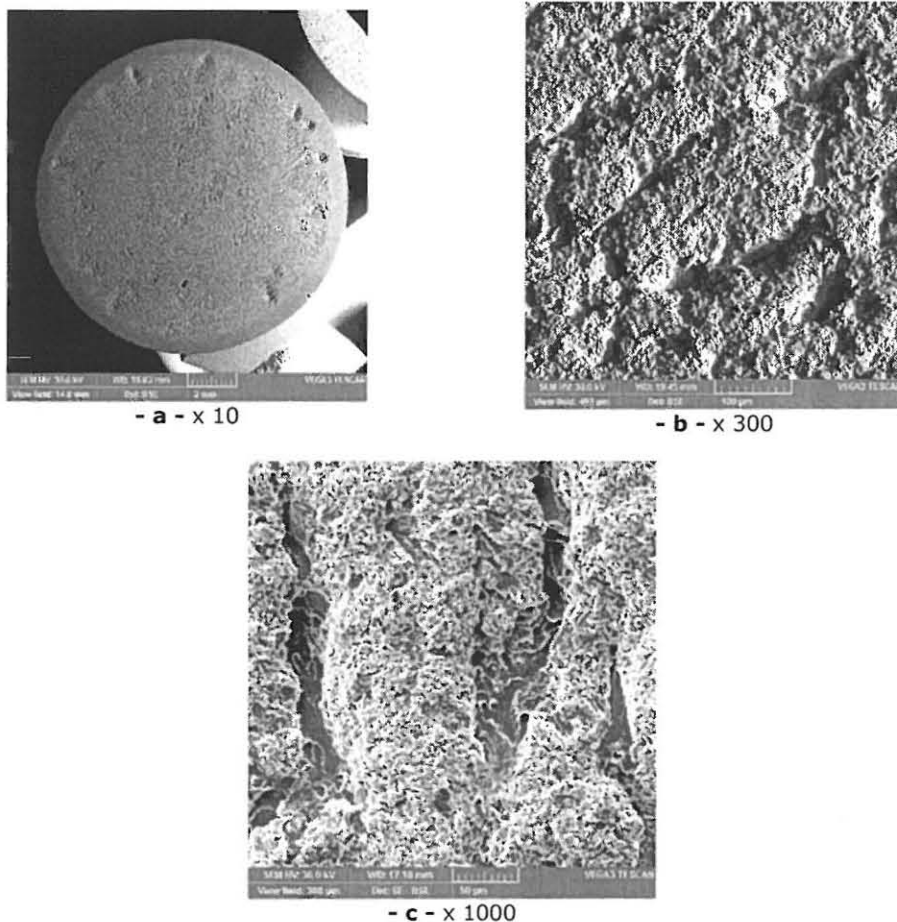


Fig. 4.23 Imaginea macrografică (a) și micrografică (b,c) a suprafeței probelor tratate termic 950 °C/aer + 700 °C/aer + 450 °C/aer și testate la cavitație timp de 165 min

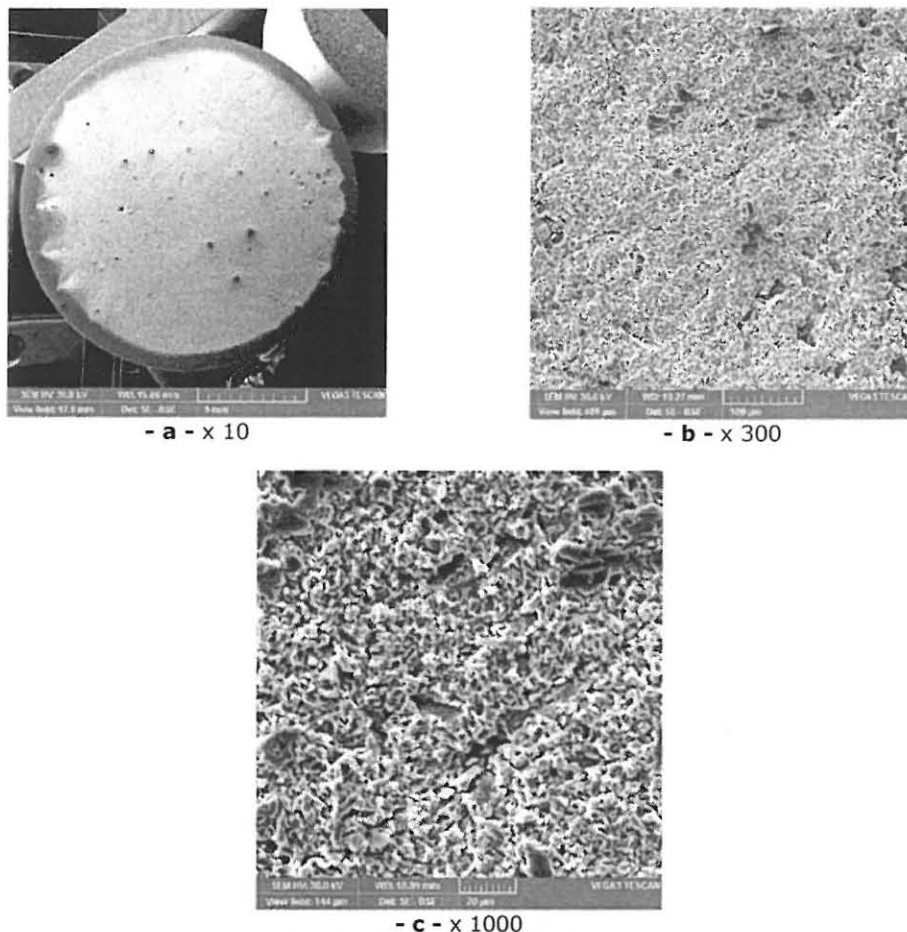


Fig. 4.24 Imaginea macrografică (a) și micrografică (b,c) a suprafeței probelor tratate termic 1050 °C/aer + 700 °C/aer + 450 °C/aer și testate la cavitație timp de 165 min

4.3. Tratamente de refrigerare și rezistența la eroziune prin cavitație

4.3.1. Examinări sclerometrice

Din analiza acestora se desprind următoarele observații:

- cele mai mici valori de duritate (225 – 235 HV), se obțin în urma călirii pentru punere în soluție de la 1050 °C, urmare a unei microstructuri predominant austenitice la temperatura camerei;
- o temperatură mai mică de încălzire pentru punere în soluție (950 °C), provoacă ridicarea punctului critic Ms, deci transformarea unei părți apreciabile de austenită metastabilă în martensită și implicit o creștere semnificativă a durității (315 – 325 HV);
- tratamentul de refrigerare se manifestă printr-o creștere importantă a durității în special la probele austenitizate la 1050 °C, ca efect al unei

transformări martensitice mai intense în acestea comparativ cu cele la care încălzirea pentru punere soluție s-a realizat la 950 °C;

- indiferent de temperatura de călire pentru punere în soluție, efectuarea revenirii la 450 °C conduce la o durificare semnificativă a materialului (410 – 420 HV).

4.3.2. Teste de cavitație

În fig. 4.30 se prezintă imaginile macrografice ale suprafeței probelor înainte de atac și la momente semnificative ale cavitației, în fig. 4.35...4.42 sunt redată curbele ce caracterizează comportarea materialului la acest tip de degradare, după diverse variante de tratament compus (termic + refrigerare). Ca material etalon a fost considerat tot oțelul OH12NDL.

Stare de tratament termic	Durata de atac cavitațional, în minute			
	0	60	90	165
950 °C/20 min/aer + REFRIGR. 60 min/aer				
950 °C/20 min/aer + REFRIGR. 60 min/aer + Revenire 450 °C/aer				
1050°C/20 min/aer + REFRIGR. 60 min/aer				
1050°C/20 min/aer + REFRIGR. 60 min/aer + Revenire 450 °C/aer				

Fig. 4.30 Aspectul suprafeței probelor de cavitație

Fig. 4.45...4.48 analizează comparativ curbele de cavitație specifice oțelului 17-4 PH aflat în cele 4 stări de tratament aplicat și cele ale oțelului etalon.

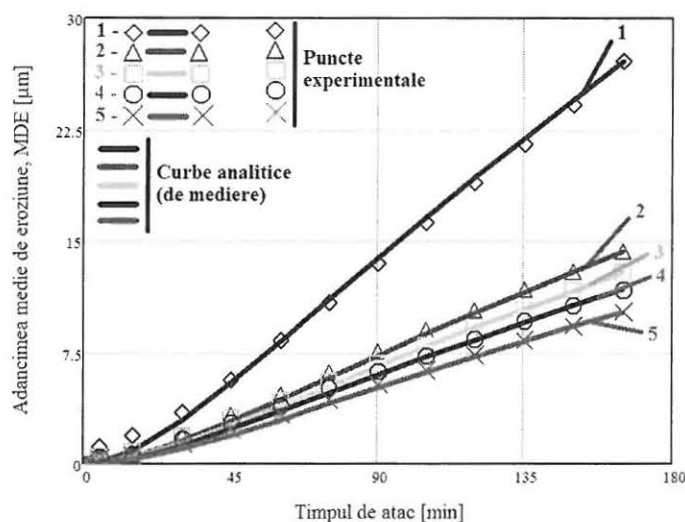


Fig. 4.47 Comparații ale evoluției adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitației: 1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer; 3 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer; 4 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire la 450°C/60 min/aer; 5 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire la 450 °C/60 min/aer

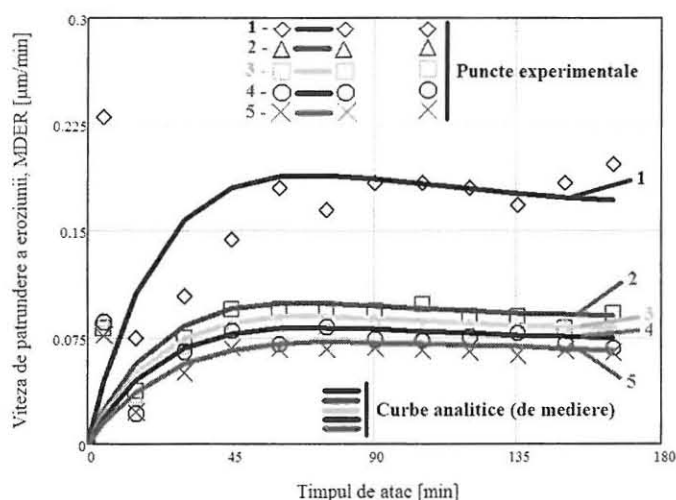


Fig. 4.48 Comparații ale evoluției vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitației: 1 – Oțel etalon OH12NDL; 2 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer; 3 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer; 4 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire la 450 °C/60 min/aer; 5 – Oțel 17-4 PH tratat prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire la 450 °C/60 min/aer

Comparațiile din fig. 4.45...4.48 arată că cea mai mare rezistență se obține prin tratamentul termic de călire la 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire la 450 °C/60 min/aer.

4.3.3. Topografia suprafețelor testate cavitațional

Așa cum era de așteptat, mecanismul de degradare prin eroziunea cavitației la acest oțel are la bază deformarea plastică a suprafeței, ruperea având un caracter ductil. Imaginile SEM redată în fig. 4.49 și 4.50 atestă că inițierea și propagarea fisurilor de cavitație se produce în principal în microzonele cu ferită δ , constituent structural cu o rezistență redusă la cavitație.

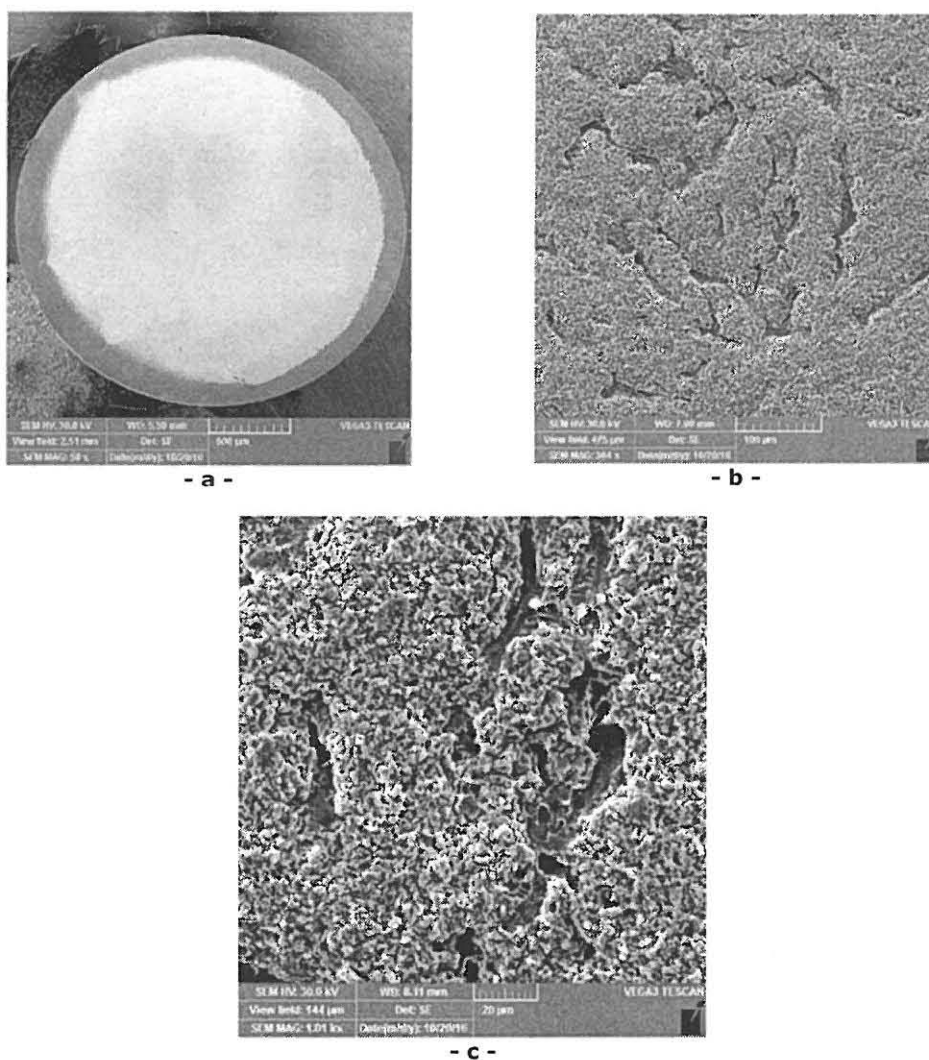


Fig. 4.49 Topografia suprafeței probelor tratate prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire 450 °C/60 min/aer și testate la cavitație timp de 165 min:
a - x 58; b - x 304; c - x 1000

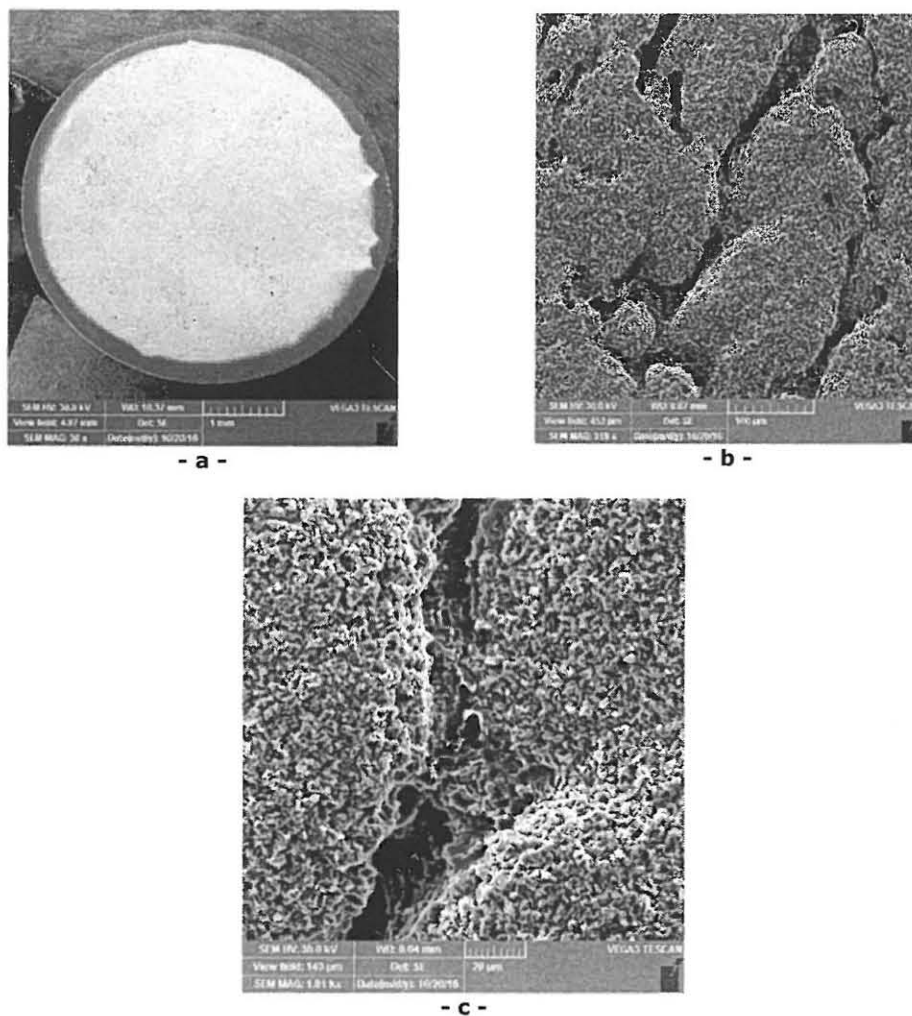


Fig. 4.50 Topografia suprafeței probelor tratate prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire 450 °C/60 min/aer și testate la cavitație timp de 165 min:
a - x 30; b - x 319; c - x 1000

4.3.4. Analize microstructurale

Rezultatele obținute în urma examinărilor micrografice ale secțiunilor longitudinale prin probele testate la cavitație timp de 165 min (fig. 4.51 și 4.52) sunt în concordanță deplină cu măsurătorile de duritate și cu încercările cavitaționale. Ele demonstrează că rezistența la uzare prin eroziune a probelor austenitizate la 1050 °C, refrigerate și revenite la 450 °C este superioară celei a probelor refrigerate sau a celor refrigerate și revenite după austenitizare la 950 °C.

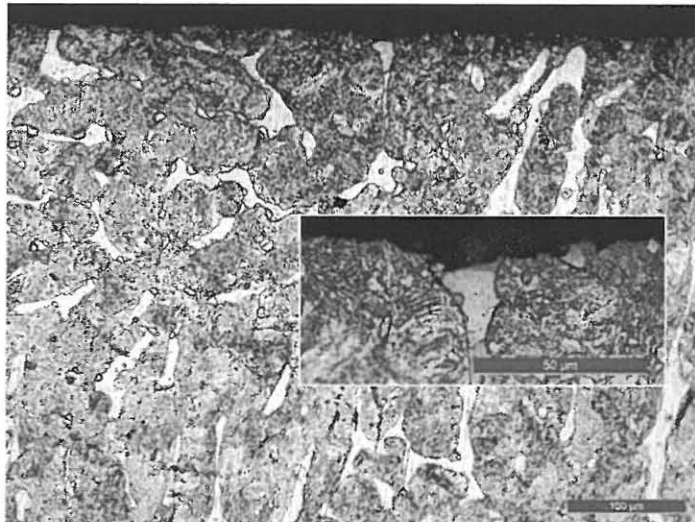


Fig. 4.51 Imaginea micrografică a probelor tratate prin călire 950 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire 450 °C/60 min/aer

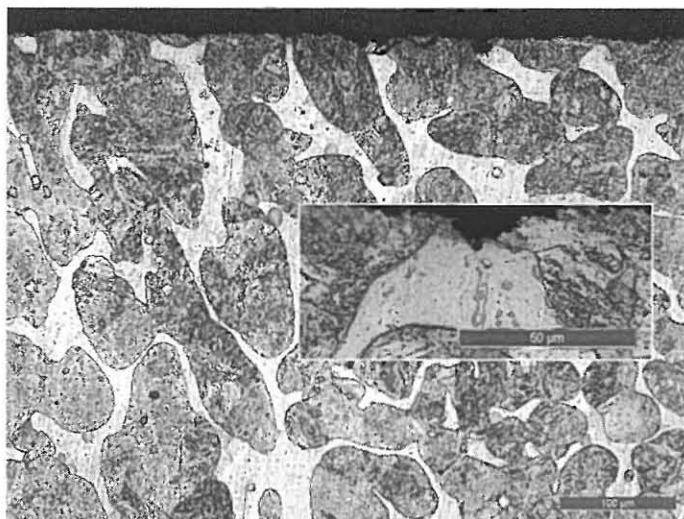


Fig. 4.52 Imaginea micrografică a probelor tratate prin călire 1050 °C/20 min/aer + refrigerare 60 min/aer + revenire 450 °C/60 min/aer

4.4. Concluzii

- Regimurile tratamentelor termice de călire urmată de îmbătrânire primară și secundară aplicate oțelului 17-4 PH favorizează o micșorare a adâncimii medii de eroziune după 165 min de testare, și respectiv a vitezei de uzare, de cca. 2,2 - 2,5 ori, comparativ cu oțelul etalon, OH12NDL.
- Intercalarea unei refrigerări între călirea pentru punere în soluție și revenire provoacă o creștere a rezistenței la eroziunea cavității de 2,3 - 2,8 ori comparativ cu cea a oțelului etalon și cu cca. 11% comparativ cu starea de îmbătrânire primară la 700 °C.

5. ROLUL TRATAMENTULUI TERMOCHIMIC DE NITRURARE CU LASER ÎN CREȘTEREA REZISTENȚEI LA EROZIUNE PRIN CAVITAȚIE

5.1. Introducere

Una din variantele tehnologice moderne de aliere a suprafeței cu azot este nitrurarea cu fascicul laser. Ea 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.

5.2. Procedura experimentală

Tratarea suprafețelor cu fascicul laser s-a realizat pe standul experimental, marca Trumpf HL 124 P LCU, constituit dintr-o instalație de sudare – tăiere cu laser Nd-YAG (fig. 5.1), aflat în dotarea Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale din Timișoara.

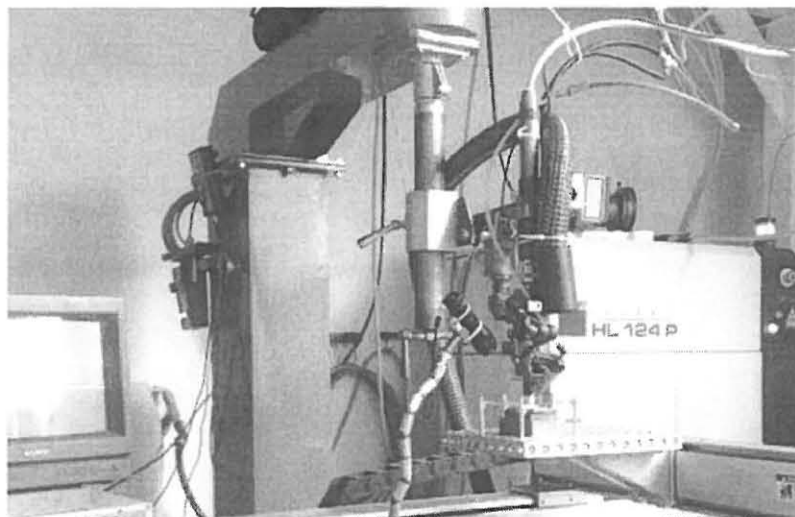


Fig. 5.1 Microunitate laser, marca Trumpf HL 124 P LCU

Parametrii procesului de nitrurare au fost:

- Putere instalație: 800 W;
- Durata impulsului: 10 ms (notat setul 4 de probe); 8 ms (notat setul 3 de probe); 6 ms (notat setul 2 de probe);
- Frecvența de repetiție a impulsului: 10 Hz;
- Atmosfera: azot pur, al cărui debit a fost de 33 l/min.

5.3. Curbe de cavitație

Testele de comportare și rezistență la eroziunea cavitației vibratoare, pentru toate cele trei seturi de probe, au fost realizate în condițiile descrise la capitolul 3, cu respectarea prevederilor standard și cutumei laboratorului.

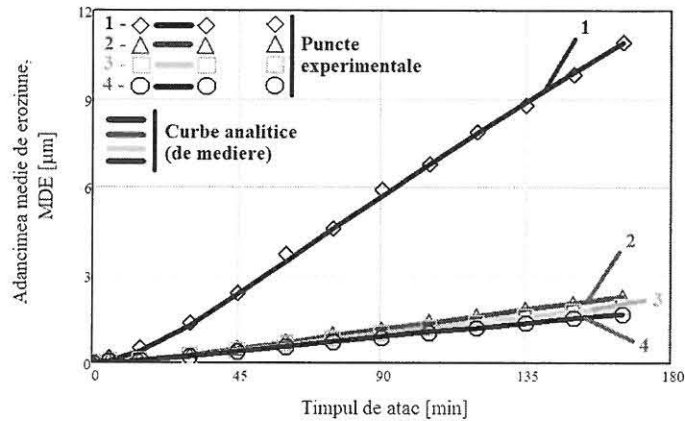


Fig. 5.8 Comparații ale evoluției adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitațional: 1 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 2 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 6 ms; 3 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 8 ms; 4 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 10 ms

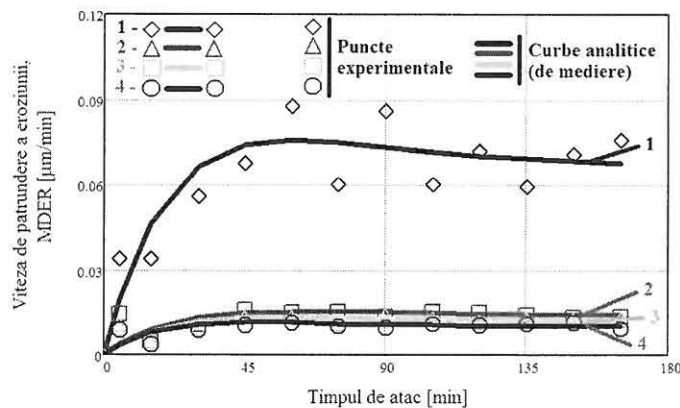


Fig. 5.9 Comparații ale evoluției vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitațional: 1 – Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 2 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 6 ms; 3 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 8 ms; 4 – Oțel 17-4 PH nitrurat laser, durată impuls, 10 ms

Creșterile de rezistență a suprafețelor nitrurate, funcție de durata impulsului laser, comparativ cu tratamentul termic de călire pentru punere în soluție menționat, sunt:

- de cca. 4 ori pentru regimul cu durata impulsului de 6 ms;
- de cca. 4,5 ori pentru regimul cu durata impulsului de 8 ms;
- de cca. 6 ori pentru regimul cu durata impulsului de 10 ms.

5.4. Microstructură, proprietăți 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. 5.10 și evidențiază maniera în care se extind fenomenele de degradare a suprafeței.


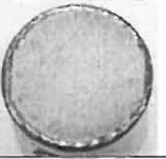


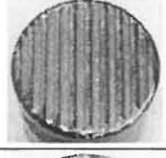
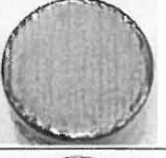






Timpul de puls	Durata de atac cavitațional, în minute			
	0	60	90	165
6 ms				
8 ms				
10 ms				

Fig. 5.10 Imaginile macrografice ale suprafețelor testate la diverse perioade de timp

5.5. Concluzii

- La o putere a fascicului laser de 800 W, prin modificarea duratei impulsului de la 6 la 10 ms, se obține o mărire a adâncimii stratului nitrurat de la 0,22 la 0,28 mm.
- Cele trei regimuri de nitrurare cu fascicul laser, prin duritatea creată stratului suprafeței expuse cavitației, comparativ cu starea structurală de călire pentru punere în soluție urmată de îmbătrânire primară și secundară, duc la o creștere a rezistenței la cavitația vibratoare de 4 – 6 ori, funcție de durata impulsului.
- Urmare a topirii unei părți din materialul de bază se asigură o bună legătură metalurgică și implicit o bună adeziune a stratului la substrat.

6. REZISTENȚA LA CAVITAȚIE A OȚELURILOR INOXIDABILE 17-4 PH ACOPERITE CU STRATURI DE PULBERI CERAMICE

6.1. Introducere

Una din modalitățile tehnologice de reducere sau de evitare a pierderilor prin cavitație presupune utilizarea de învelișuri performante de oxizi, carburi și nitruri care pot fi aplicate pe materialul substratului [5], [6], [12], [13], [14], [16], [22], [23], [29], [32], [37], [38], [40], [41], [42], [43].

6.2. Bazele procesului de pulverizare

Acest proces de acoperire a suprafeței permite obținerea de microstraturi rezistente la uzare, la șocuri termice, la coroziune, izolante din punct de vedere

termic sau electric, microstraturi și straturi artificiale, supraconductoare, biocompatibile, etc.

6.5. Materiale, aparatură, parametrii de proces

Dintr-o șarjă de oțel inoxidabil 17-4 PH au fost executate probe de cavitație care au fost supuse tratamentului termic de călire pentru punere în soluție de la temperatura de 1050 °C cu răcire în aer, iar ulterior o parte din acestea au fost acoperite la suprafață cu pulberi din grupa cermeturilor, de tipul Al_2O_3 30(Ni 20Al), prin pulverizare termică folosind instalația METCO SULZER, aflată în dotarea Institutului Național de Cercetare - Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale din Timisoara (fig. 6.3).

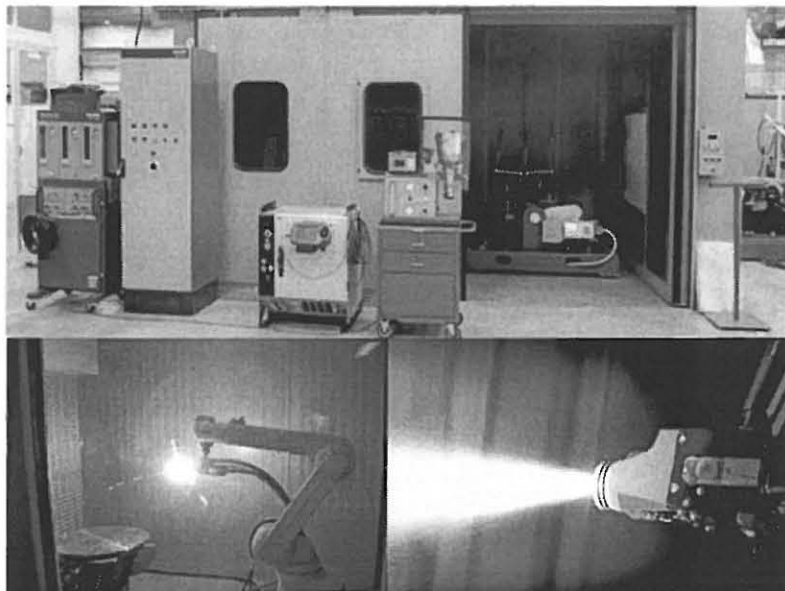


Fig. 6.3 Instalație robotizată de pulverizare termică, METCO SULZER

Parametrii optimi ai procesului de pulverizare termică, stabiliți pe cale experimentală, prin încercări preliminare, sunt:

- Gaz plasmagen, Ar+6%H, presiune: 9 bari;
- Gaz transport, Ar, presiune: 4 bari;
- Aer comprimat, presiune: 2 bari;
- Debit pulbere METCO 410 NS: 63 g/min;
- Tensiune curent: 80 – 85 V;
- Intensitate curent: 550 – 600 A.

6.6. Teste de cavitație

Procedura de cercetare, privind etapele, modul de derulare și manipulare a probelor, analize macroscopice și microscopice ale suprafeței erodate, precum și înregistrarea rezultatelor experimentale, sunt cele prezentate în capitolul 3.

În fig. 6.4 sunt prezentate câteva imagini reprezentative ale suprafeței probelor din timpul derulării cavitației.

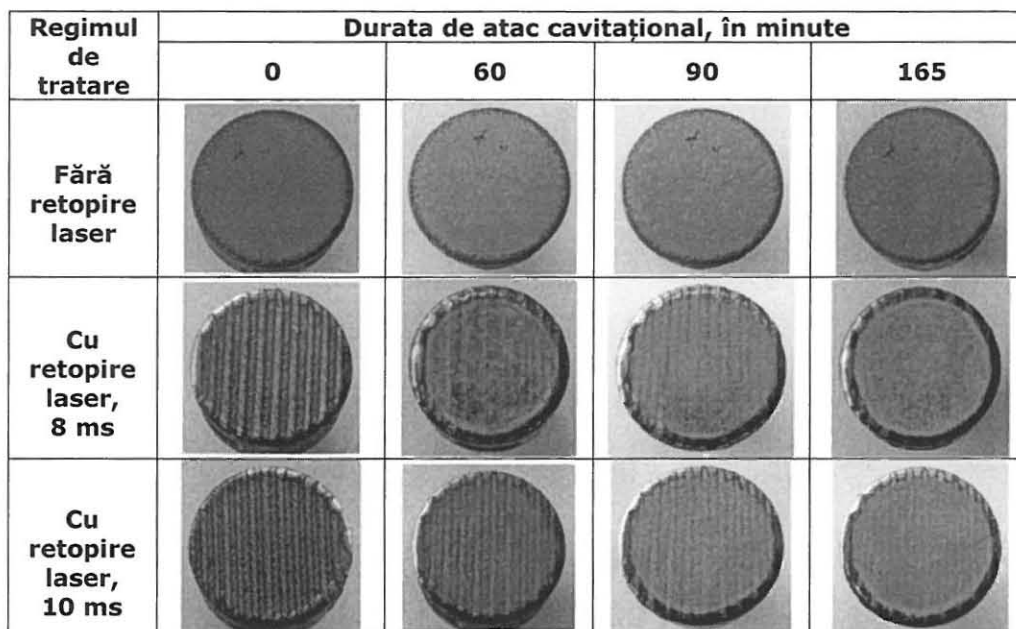


Fig. 6.4 Macrografia suprafețelor inițiale și după testele de cavitație la 3 durate de atac

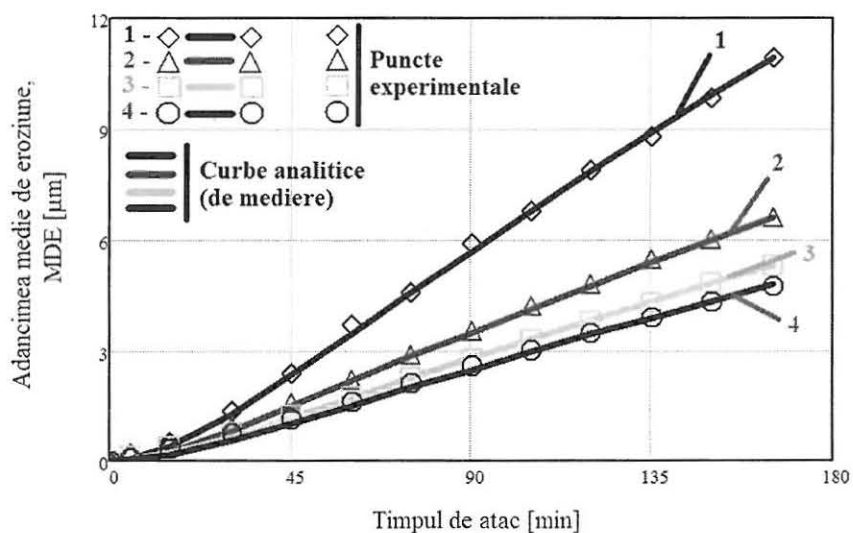


Fig. 6.11 Evoluția adâncimii medii de eroziune cu durata atacului cavitațional:
 1 - Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 2 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică fără retopire cu laser; 3 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică și retopire cu laser, durată impuls,8ms; 4 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică și retopire cu laser, durată impuls,10 ms

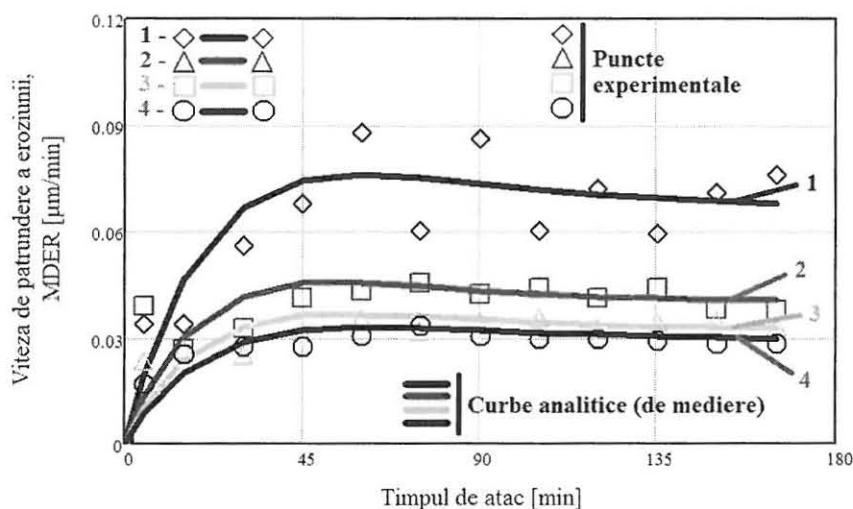


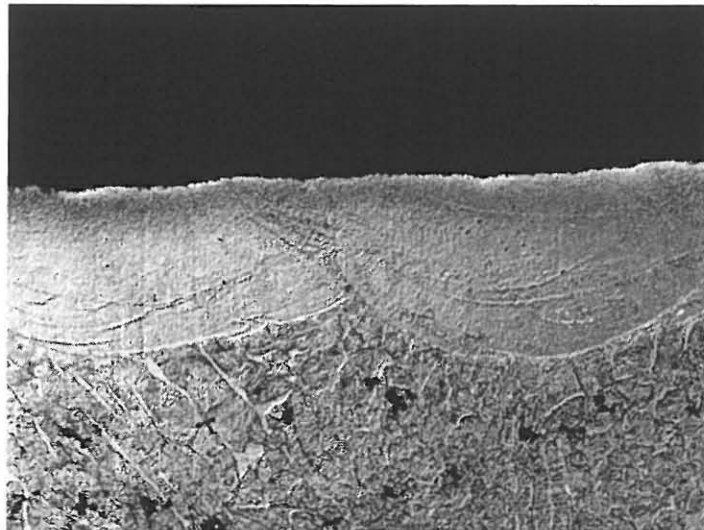
Fig. 6.12 Evoluția vitezei de pătrundere a eroziunii cu durata atacului cavitațional:
 1 - Oțel 17-4 PH călit de la 1050 °C/aer + îmbătrânire primară 700 °C/aer + îmbătrânire secundară 450 °C/aer; 2 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică fără retopire cu laser; 3 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică și retopire cu laser, durată impuls,8ms; 4 - Oțel 17-4 PH acoperit prin pulverizare termică și retopire cu laser, durată impuls,10 ms

Din analiza datelor redată în fig. 6.9...6.12 se constată:

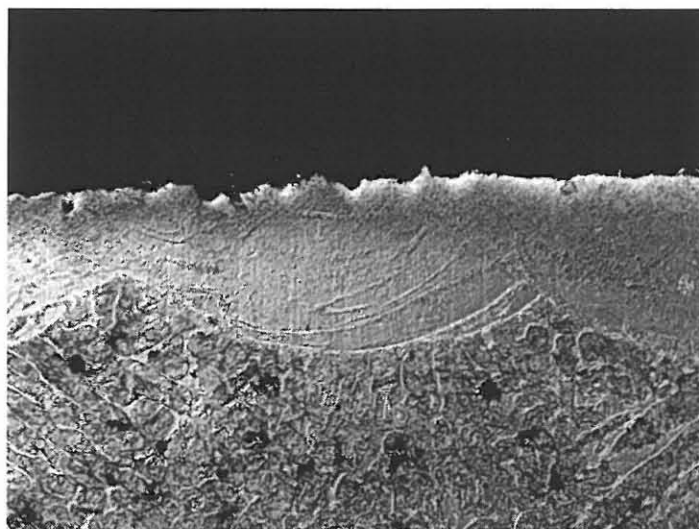
- învelișurile realizate prin pulverizare în plasmă prezintă o adâncime medie de eroziune după 165 minute de atac cavitațional, diminuată cu cca. 85% (fig. 6.11) comparativ cu starea structurală obținută prin călire + îmbătrânire și o viteză medie de pătrundere a eroziunii (în zona de stabilizare) cu 66% mai redusă (fig. 6.12);
- retopirea cu fascicul laser a stratului pulverizat, asigură o creștere importantă a rezistenței la cavitație, cu atât mai mare cu cât durata pulsului laser a fost mai lungă; astfel, valorile MDE se micșorează cu (106 – 134)% față de cele specifice tratamentului termic volumic (fig. 6.11) și cu (24 – 44)% față de cele obținute la acoperirea suprafeței prin pulverizare (fig. 6.12).

6.7. Analize microstructurale

Imaginea redată în fig. 6.13 a reliefează obținerea unei microstructuri fine a stratului retopit, lipsită de porozități și de alte defecte de continuitate, cu o bună legătură metalurgică la substrat. În urma atacului cavitațional, aceeași secțiune transversală prin stratul retopit cu fascicul laser (fig. 6.13 b) evidențiază o degradare uniformă a acestuia, cu ciupituri produse în principal pe interfața dintre matricea structurală și particulele de combinații chimice.



- a -



- b -

Fig. 6.13 Micrografia unei secțiuni transversale prin stratul pulverizat și retopit cu fascicule laser, x 300: a – înainte de cavitație; b – după testul de cavitație

6.8. Concluzii

- Acoperirea suprafeței pieselor, care funcționează în regim de cavitație, cu pulberi din grupa cermeturilor, de tipul Al_2O_3 30(Ni 20Al), urmată de retopire cu fascicul laser de puteri, frecvențe și durate bine determinate, favorizează o creștere a rezistenței la eroziune prin cavitație cu cca. 134%, comparativ cu starea structurală obținută prin călire pentru punere în soluție de la 1050 °C cu răcire în aer urmată de îmbătrânire primară la 700 °C și secundară la 450 °C.

7. CONCLUZII GENERALE ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE. NOI DIRECȚII DE CERCETARE

- Evaluarea comportării și rezistenței materialelor la eroziunea cavitației este indicat să se facă atât pe baza curbilor și parametrilor caracteristici cât și pe baza microfotografiilor suprafețelor degradate, realizate la diverși timpi intermediari și final ai atacului cavitației.
- Examinarea prin microscopie electronică cu baleiaj a suprafețelor degradate și a secțiunilor longitudinale prin probele cavitate, evidențiază faptul că inițierea cavitațiilor (la toate regimurile de tratament volumic aplicat) are loc în insulele de ferită și pe limitele de separație dintre acestea și matricea structurală, iar la sfârșitul perioadei de atac, în fostele zone de ferită apar forme de râuri mai mult sau mai puțin extinse.
- Examinarea prin microscopie electronică cu baleiaj a stratului de suprafață degradat prin eroziunea cavitației confirmă aceste afirmații și 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. Aspectul vălurit al suprafeței, generat de acțiunea fasciculului laser, se păstrează într-o oarecare măsură și în urma testului de cavitație.
- Microstructura fină, densă și lipsită de porozități, cu o duritate mare, rezultată prin aplicarea tehnicii de pulverizare în plasmă urmată de retopire cu fascicul laser, explică îmbunătățirea pronunțată a rezistenței la uzare prin cavitație.
- Examinarea la microscopul electronic cu baleiaj a topografiei suprafețelor testate la eroziune prin cavitație, pune în lumină formarea crustelor de forme similare, vălurite și uniform distribuite, la prelucrarea cu fascicul laser. Totodată, așa cum era de așteptat, apare un atac preponderent, cu ciupituri, care se dezvoltă în microcratere, la baza valurilor create de fasciculul laser.

Noi direcții de cercetare

- Lărgirea bazei de date a noilor metode și a tehnologiilor de tratamente mecanice și termomecanice care pot fi aplicate oțelurilor inoxidabile 17-4 PH, utilizate la fabricarea și repararea rotoarelor și paletelor pompelor și turbinelor hidraulice, în vederea creșterii rezistenței la eroziunea cavitațională;
- Cercetarea influenței noilor metode, tehnologii și tratamente aplicate asupra comportării oțelurilor inoxidabile la eroziunea prin cavitație;
- Cercetarea degradării structurale a acestor oțeluri inoxidabile în perioada de incipiență a cavitației.

BIBLIOGRAFIE (SELECȚIE)

- [1] ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS (2010) SECTION 3: Metals test methods and analytical procedures, vol. 03.02, Annual Book of ASTM Standards, West Conshohocken, 2010
- [2] ANTON I.: Cavitația, Vol. I, Editura Academiei RSR, București, România, 1984
- [3] ANTON I.: Cavitația, Vol. II, Editura Academiei RSR, București, România, 1985
- [6] BORDEAȘU I.: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Teză de doctorat, Timișoara, România, 1997

- [7] BORDEAȘU I., ANTON I.: Correlation between cavitation erosion rate with both the parameters of the vibrator apparatus and physico-mechanical properties of the material, Third International Symposium on Cavitation, vol. II, Grenoble, France, 1998, pp. 199-202
- [8] BORDEAȘU I., BĂLĂȘOIU V.: Considerații asupra cavităției în aparatura hidraulică, „HIDRAULICA” Magazine No. 1 - Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, București, România, 1999, pp. 16-19
- [9] BORDEAȘU I.: Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2006
- [13] BORDEAȘU I., MITELEA I., **KATONA S.-E.**: Considerations regarding the behavior of some austenitic stainless steels to cavitation erosion, METAL 2012, 21th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, May 23-25, 2012, pp. 730-736
- [14] BORDEAȘU I., POPOVICIU M.O.: Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening, Machine Design, vol. 4, no. 3, 2012, pp. 171-176
- [29] FRANC J.P., MICHEL J.M.: Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 2004
- [31] FRANC J.P., MICHEL J.M.: Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publishers, 2005
- [35] GARCIA R., HAMMITT F.G., NYSTROM R.E.: Correlation of cavitation damage with other material and fluid properties, Erosion by Cavitation or Impingement, ASTM, STP 408 Atlantic City, New Jersey, U.S.A., 1960
- [36] GHERA C., BORDEAȘU I., SĂLCIANU L., DUMA S.T., **KATONA S.-E.**, PUGNA A., MICU L.M., PASCU L.F.: Considerations regarding the behavior to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution, „HIDRAULICA” Magazine No. 1 - Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, București, România, 2015, pp. 25-31
- [37] HAMMITT F.G., BHATT N.R.: Cavitation damage resistance of hardened steels, University of Michigan, Michigan, U.S.A., 1970, pp. 1-36
- [40] HEATHCOCK C.J., PROTHEROE B.E., BALL A.: Cavitation erosion of stainless steels, Wear, vol. 81, iss. 2, October, 1982, pp. 311-327
- [49] IRVINE K.J., a.o.: Controlled-transformation stainless steels, Journal of Iron and Steel Research Institute, vol. 196, 1960, pp. 166-179
- [51] JURCHELA A.D.: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavităție vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2012
- [52] KARABENCIOV A.: Cercetări asupra eroziunii produse prin cavităție vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2013
- [53] KARIMI A., MARTIN J.L.: Cavitation erosion of materials, International Metals Review, vol. 31, iss. 1, 1986, pp. 1-26
- [55] **KATONA S.-E.**, OANCĂ O., BORDEAȘU I., MITELEA I., CRĂCIUNESCU C.M.: Investigations regarding the cavitation erosion resistance of the Al₂O₃ 30(Ni 20Al) laser depositions on the 17-4 PH stainless steels, METAL 2015, 24th International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, June 3-5, 2015, pp. 482-486
- [56] **KATONA S.-E.**, KARANCSI O., BORDEAȘU I., MITELEA I., CRĂCIUNESCU C.M.: Primary and secondary aging effect on the cavitation erosion behavior of 17-4 PH stainless steels, METAL 2016, 25th International Conference on

- Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, May 25-27, 2016 – **(lucrare științifică acceptată în volum proceedings și în curs de publicare), 2016**
- [59] KNAPP R.T., DAILY J.V., HAMMITT F.G.: Cavitation, McGraw Hill International Book Company, New York, U.S.A., 1970
- [75] MITELEA I., RADU If., RADU B.: Effect of primary and secondary aging over microstructure and properties of T06AlMnCoMoNiCr165 cast stainless steels, International Conference Issued for BEYOND 2000, vol. XXXIV, University of Sibiu, Sibiu, România, 1999, pp. 169-174
- [78] MITELEA I.: Știința materialelor, Vol. I, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2006
- [79] MITELEA I., BORDEAȘU I., HADĂR, A., Cavitation erosion characteristics of stainless steels with controlled transformation, Revista de Chimie București, Chem. Abs. RCBUAU 57 (2), (117-228), vol. 57, no. 2, București, România, February, 2006, pp. 215-220
- [81] MITELEA I.: Materiale ingineresti, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2009
- [84] MITELEA I.: Știința materialelor, Vol. II, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2010
- [85] MITELEA I., ROȘU R.A.: Sudabilitatea oțelurilor inoxidabile, Editura Politehnica, Timișoara, România, 2010
- [88] 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, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, May 15-17, 2013, pp. 208-213
- [96] PĂDUREAN I.: Researches upon cavitation erosion resistance of stainless steel used for moulding Kaplan and Francis hydraulic turbines runner blades, Metalurgia Internațională, Romanian Metallurgical Foundation Scientific Publishing House (F.M.R), vol. XIV, no. 1, România, 2009, pp. 27-30
- [97] POPOVICIU M.O., BORDEAȘU I.: Considerations regarding the total duration of vibratory cavitation erosion test, Third International Symposium on Cavitation, Grenoble, France, April, 1998, pp. 221-226
- [109] STELLER J.K.: International cavitation erosion test. Test facilities and experimental results, 2emes Journées Cavitation, Société Hydrotechnique de France, Paris, France, March, 1992
- [110] STELLER J.K.: International Cavitation Erosion test and quantitative assement of material resistance to cavitation, Wear, vol. 233-235, 1999, pp. 51-64
- [111] THIRUVENGADAM A., PREECE, PREISER H. S.: On testing materials for cavitation damage resistance, HYDRONAUTICS, Incorporated Technical Report. 233-3, December, 1963
- [113] TRUȘCULESCU M., IEREMIA A.: Oțeluri inoxidabile și refractare, Editura Facla, Timișoara, România, 1983
- [115] VERDIAN M.M., RAEISSI M., SALEHI K.: Corrosion performance of HVOF and APS thermally sprayed NiTi intermetallic coatings in 3.5% NaCl solution, Corrosion Science, vol. 52, 2010, pp. 1052-1059
- [130] *** ASTM G32-10, Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus, ASTM International, 2010, <http://www.astm.org/Standards/G32.htm>
- [131] *** Cermet powder type Al₂O₃ 30(Ni 20Al), <https://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-materials/coating-materials-thermal-spray/cermets/>