

# **CURGEREA ÎN VANELE FLUTURE ȘI EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A COMPONENTELOR DIN OȚELURI INOXIDABILE AUSTENITICE**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul Inginerie Mecanică  
de către

**ing. Cornelia Laura Sălcianu**

Conducători științifici:	Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeășu Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea
Referenți științifici:	Prof.univ.dr.ing. Anton Hadăr Prof.univ.dr.ing. Dorian Nedelcu Prof.univ.dr.ing. Liviu Marșavina

Ziua susținerii tezei: 08.05.2017

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 Politehnică 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 Politehnică – Timișoara, 2013

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 Politehnică 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 reprezintă cel mai nefast efect al cavitației, greu de stăpânit și eliminat total. Cauza o reprezintă scoaterea din funcțiune a pieselor degradate, total sau pentru reparare.

Obținerea unor materiale nedestructibile prin eroziunea cavitației rămâne, încă, de domeniul visului. Motiv pentru care, simultan cu crearea de noi materiale cu rezistențe sporite la solicitările cavitaționale, se caută aplicarea tehnologiilor de tratament, clasice și moderne, care să confere structuri și proprietăți mecanice, capabile să dea sporul de rezistență necesar creșterii duratei de exploatare.

În pas cu aceste cercetări s-a derulat și programul de cercetare doctorală, ce a stat la baza prezentei lucrări de obținere a titlului de doctor inginer. Acesta este continuare a cercetărilor derulate în cadrul Laboratoarelor de Cavitație și de Știința Materialelor ale Universității Politehnica Timișoara, cu privire la comportarea și rezistența la eroziunea cavitației vibratoare, conferită oțelului austenitic X5CrNi18-10 supus tratamentelor de călire volumică pentru punere în soluție și termochimice de nitrurare în gaz, respectiv cu laser. Cercetarea a fost determinată de utilizarea oțelului X5CrNi18-10 la inelul reținere scaun, supus eroziunii cavitației, datorită folosirii sale la fixarea garniturii de etanșare pe discurile/lentilele vanelor fluture, de pe conductele de aducțiune ale centralelor hidroelectrice și nu numai.

Justificarea cercetării are la bază analiza numerică a curgerii printr-o vană fluture cu disc biplan, care arată că la anumite înclinații ale discului, pentru un debit dat, sunt create condițiile de curgere cavitațională, cu efectele cunoscute.

Cercetările de cavitație, realizate pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice și analiza datelor obținute pe alte 19 oțeluri inoxidabile, au permis, să se propună un nou concept de ierarhizare a oțelurilor inoxidabile, testate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, folosind parametrul de scara din relațiile analitice ale curbelor specifice de cavitație, recomandate de normele ASTM G32-2010, în evaluarea rezistenței materialelor testate în aparatele vibratoare.

Definitivarea lucrării, cu îndeplinirea tuturor obiectivelor și aducerea de elemente de noutate în acest domeniu, a fost posibilă datorită sprijinului permanent oferit de coordonatorii științifici D-nii Prof.univ.dr.ing. Ilare Bordeasu și Prof.univ.dr.ing. Ion Mitelea, cărora le mulțumesc.

Sfaturile, colaborarea plăcută și sprijinul neconținut oferit, pe întreaga perioadă de elaborare a tezei, de dl. Prof.univ. dr. ing. Mircea O. POPOVICIU, dl. Prof.univ.dr.ing. Corneliu Crăciunescu, dl. conf.dr.ing. Ion Dragoș UȚU, dl. ș.l.dr.ing. Ioan Pădurean, dna ș.l.dr.ing. Rodica BĂDĂRĂU și CS 1 dr.ing. Octavian OANCĂ, mi-au dat putere și încredere în ceea ce fac. Tuturor le mulțumesc și le rămân recunoscători.

Mulțumiri aduc și d-lui Prof.univ.dr.ing. Dorian NEDELICU de la Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița care mi-a oferit sprijin în simularea curgerii prin vana fluture cu disc biplan.

Sper ca această lucrare să fie de un real folos celor care, încă, în ROMÂNIA mai proiectează, fabrică și exploatează echipamente hidromecanice.

Timișoara, aprilie 2017

ing. Cornelia Laura Sălcianu

Sălcianu, Cornelia Laura

**Curgerea în vanele fluture și eroziunea prin cavitație a componentelor din oțeluri inoxidabile austenitice**

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica, 2017, 178 pagini, 214 figuri, 22 tabele, 49 formule și relații.

ISSN: S9 nr 176

ISSN: 1842-4937

ISBN: 978-606-35-0146-3

Cuvinte cheie: cavitație vibratoare, eroziune, simulare curgere, călire pentru punere în soluție, nitrurare

Rezumat,

În cadrul lucrării de doctorat este studiată curgerea cavitațională prin vanele fluture cu discbiplan. Totodată, este cercetată comportarea și rezistența la cavitație a oțelului inoxidabil austenitic X5CrNi18-10 (folosit în realizarea scaunului și inelelor de reținere scaun și de prindere a garniturii de etanșare pe discul obturator), supus la: 5 tratamente termice volumice de călire pentru punere în soluție (3 cu temperaturi diferite de încălzire și aceeași durată de menținere și două cu aceeași temperatură de încălzire, dar durate diferite de menținere) și două de nitrurare (unul în gaz și altul cu laser la trei puteri diferite a impulsului razei). Prin simularea numerică a curgerii este pusă în evidență existența regimurilor de funcționare în cavitație a vanei fluture la anumite deschideri ale discului obturator, ca justificare a folosirii procedeelor de tratament termic și termochimic pentru creșterea rezistenței la acțiunea corozivă a acesteia. Ultimul capitol este un concept nou prin care se evaluează rezistența la cavitație pe baza parametrului de scară din cadrul relațiilor de definire a curbilor specifice eroziunii cavitației. Acest concept este aplicabil oțelurilor inoxidabile testate pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice din cadrul Laboratorului de Cavitație, al Universității Politehnica Timișoara.

## CUPRINS

<b>INTRODUCERE.....</b>	<b>7</b>
<b>1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII.....</b>	<b>9</b>
1.1. Considerații generale.....	9
1.2. Cerințe funcțional-constructive impuse vanelor fluture.....	12
1.3. Eroziunea prin cavitație la vanele fluture.....	16
1.4. Concluzii.....	21
1.5. Obiectivele tezei de doctorat.....	21
<b>2. MATERIALUL CERCETAT. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ.....</b>	<b>23</b>
2.1. Structura și proprietățile oțelurilor inoxidabile austenitice.....	23
2.2. Fenomene de precipitare a fazelor secundare.....	24
2.3. Tehnologiile de creștere a rezistenței la cavitație.....	26
2.4. Materialul cercetat.....	27
2.5. Stațiuni și metode utilizate în laboratoare pentru cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației.....	28
2.5.1. Stațiuni.....	28
2.5.2. Metode deordonare și evaluare a comportării materialelor la eroziunea cavitațională.....	31
2.5.3. Metoda construirii curbilor specifice eroziunii prin cavitație și de determinare a parametrilor caracteristici.....	33
2.6. Metode și aparate de investigare a suprafețelor erodate de cavitație.....	34
2.7. Concluzii.....	36
<b>3. ANALIZA CURGERII CAVITATIONALE PRIN VANELE FLUTURE CU DUBLU EXCENTRIC.....</b>	<b>37</b>
3.1. Importanța modelării curgerii prin vanele fluture.....	37
3.2. Relații specifice curgerii prin vane.....	37
3.3. Analiza numerică a curgerii.....	40
3.4. Concluzii.....	79
<b>4. INFLUENȚA TRATAMENTELOR TERMICE VOLUMICE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE.....</b>	<b>80</b>
4.1. Generalități privind tratamentele termice volumice aplicate pieselor solicitate la cavitație.....	80
4.2. Călire volumică pentru punere în soluție.....	80
4.2.1. Călire pentru punere în soluție cu temperaturi diferite de încălzire.....	82
4.2.2. Călire pentru punere în soluție cu durate diferite de încălzire.....	94
4.2.3. Corelarea parametrilor de rugozitate cu rezistența la eroziunea prin cavitație.....	100
4.3. Compararea cu oțelul etalon OH12NDL.....	104
4.4. Concluzii.....	106
<b>5. INFLUENȚA TRATAMENTULUI TERMOCHIMIC DE NITRURARE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE.....</b>	<b>107</b>
5.1. Introducere.....	107
5.2. Nitrurarea în gaz.....	108
5.2.1. Cercetări experimentale.....	108
5.2.1.1. Procedura de tratament.....	108

5.2.1.2. Rezultatele testului de cavitație.....	110
5.2.2. Investigarea microscopica a structurii erodate.....	118
5.2.3. Concluzii parțiale.....	120
5.3. Nitrurarea cu laser.....	121
5.3.1. Considerații generale.....	121
5.3.2. Cercetarea experimentală.....	121
5.3.3. Investigarea structurii erodate.....	129
5.3.4. Concluzi parțiale.....	133
5.4. Evaluarea rezistenței la cavitația vibratoare creată prin tehnicile de nitrurare.....	134
5.5. Concluzii.....	135
<b>6. UN NOU CONCEPT DE IERARHIZARE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPĂ REZISTENȚA LA EROZIUNEA CAVITAȚIEI.....</b>	<b>136</b>
6.1. Introducere.....	136
6.2. Modele de evaluare a rezistenței la cavitație.....	136
6.2.1. Modelul Hoff și colaboratorii.....	136
6.2.2. Modelul Hammitt.....	137
6.2.3. Modelul Sakai-Shima.....	138
6.2.4. Modelul Steller.....	138
6.2.5. Modelul Jurchela.....	139
6.2.6. Modelul Karabenciov.....	141
6.2.7. Modelul Bordeiașu.....	144
6.3. Conceptul propus.....	147
6.3.1. Introducere.....	147
6.3.2. Punerea problemei.....	147
6.3.3. Materialele utilizate in realizarea conceptului.....	148
6.3.4. Corelarea rezistenței la cavitație cu parametrii de scară și formă.....	150
6.3.5. Concluzii partiale.....	157
6.4. Concluzii.....	158
<b>7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUTII PERSONALE ȘI ORIGINALE. PERSPECTIVE DE CERCETARE.....</b>	<b>159</b>
7.1. Concluzii finale.....	159
7.2. Contribuții personale și originale.....	160
7.3. Perspective de cercetare.....	161
<b>LISTA PUBLICAȚIILOR REZULTATE ÎN URMA CERCETĂRII DOCTORALE, PUBLICATE SAU ACCEPTATE SPRE PUBLICARE, SUB AFILIERE UPT.....</b>	<b>162</b>
<b>BIBLIOGRAFIE.....</b>	<b>170</b>

## INTRODUCERE

Cavitația a fost un fenomen important în tehnologie și un subiect provocator de cercetare în domeniul științelor ingineresti de mai bine de 160 de ani. Ea este cunoscută în mediul specialiștilor ca fiind un proces hidrodinamic complex de formare, dezvoltare și surpare a unor bule sau cavități umplute cu vapori și gaze [1, 2, 35, 37, 50, 51, 94] care se manifestă prin:

- alterarea câmpului hidrodinamic cu scăderea eficienței energetice,
- zgomote și vibrații,
- distrugere prin eroziune.

Dintre cele trei, eroziunea prin cavitație este efectul cel mai nociv care apare în funcționarea mașinilor și echipamentelor hidraulice datorită distrugerii materialelor solide din care sunt confecționate frontierele ce vin în contact cu lichidul. El a fost identificat în anul 1848, odată cu verificarea primei nave moderne de pasageri, construită din metal și propulsată de un motor cu aburi care acționa o elice navală din oțel, construită de Great Britain, proiectată de Isambard Kingdom Brunel și lansată la apă în 1843 [79]. În anul 1875 Italianul Bartellor consemnează și el eroziuni de cavitație la elicele navelor Mauritania și Luisitania [10]. Însă, efectele negative asupra performanței unei elice navale au fost identificate abia în 1893 de către Parsons, care a construit primul tunel pentru cavitație [98, 120], De atunci și până în prezent nu s-a reușit elucidarea cauzelor care generează acest fenomen și nici nu au fost elaborate materiale perfect rezistente la distrugerea produsă de implozia bulelor cavitaționale. Astfel, eroziunea materialelor prin cavitație constituie o preocupare permanentă a specialiștilor ce a dus la investigații atât pe instalațiile industriale cât și în laborator. Nu există țară exploatoare de nave maritime și fluviale, respectiv constructoare/posesoare de centrale hidroelectrice și echipamente hidromecanice, în care acest fenomen sa nu fie cercetat de specialiști. Cele mai cunoscute sunt: S.U.A, Japonia, Rusia, Suedia, Germania, China, Franța, India, Polonia, Cehia, Marea Britanie.

În România, potențialul hidroenergetic, acompaniat de o fostă industrie constructoare de turbine hidraulice, a determinat realizarea unor ample programe de cercetare a eroziunii prin cavitație, derulate de: Centru de Cercetare - Proiectare al U.C.M. Reșița, ICEPRONAV Galați, Laboratorul de Cavitație al U.P. Timișoara, Centrul de Cercetări în Hidraulică Automatizări și Procese Termice (CCHAPT), din cadrul Universității „Eftimie Murgu” Reșița și U.P. București.

Toate cercetările realizate în laborator (în special cele derulate pe aparate vibratorii) și în instalațiile industriale sunt orientate spre analiza factorilor ce influențează rezistența cavitațională prin structură, compoziția chimică, tehnologia de elaborare și tratament, etc. În această direcție se înscriu studiile realizate de un număr însemnat de cercetători străini, dintre care amintim: Osborne Reynolds (1894) [50], Heymann (1970) [70], Edel și Pîlaev (1974) [122], Thiruvengadam (1963) [151], Hammitt (1980) [70], Noskievic (1983) [119], Steller K. (1983) [142], Steller J.K. (1992) [143], J.P. Franc și colaboratorii (2004) [49], Fr. Avelan (2011) [50], precum și cele realizate în România în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, concretizate prin numeroase teze de doctorat (ex. Mircea Octavian Popoviciu (1971), Arpad Kuzman (1992), Bordeasu (1997), Georgevici (2003), Padurean (2005), Dimian (2012), Jurchela (2012), Karabenciov (2013), Oancă (2013), Katona și Micu (2017), etc), și La universitatea Eftimie

Murgu din Reșița de Nedeloni (2011) [118]. Toate acestea arată că eroziunea prin cavitație se manifestă diferit de la un material la altul, în funcție de rezistența pe care acesta o opune impacturilor cu microjeturile și undele de șoc, dezvoltate în procesul cavitațional.

Cercetările experimentale, dezvoltate prin programul doctoral, s-au axat pe oțelul inoxidabil austenitic X5CrNi18-10, supus tratamentului termic de călire pentru punere în soluție și la tratamentele termochimice de nitrurare în gaz și cu laser. Rezultatele obținute au permis realizarea unor corelații între structură - proprietăți și durata de exploatare în condiții hidrodinamice de cavitație avansată, oferind și noi dimensiuni asupra rezistenței, precum și a transformărilor microstructurale pe care le suferă suprafața oțelului la atacul cavitației vibratoare.

Astfel, teza de doctorat este organizată pe 7 capitole, dintre care: unul este destinat prezentării succinte a stadiului actual al cercetării în domeniul temei tezei, unul prezentării materialului, aparatelor și procedurii de cercetare, unul este de modelare a curgerii prin vanele fluture, două sunt de cercetare experimentală privind efectul tratamentelor (termic de călire pentru punere în soluție și termochimic de nitrurare în gaz și cu laser) asupra comportării și rezistenței la cavitația vibratoare și ultimul este de concluzii generale, de prezentare a contribuțiilor personale și a noilor direcții de cercetare.

Totodată, teza de doctorat oferă un amplu studiu bibliografic și o prezentare a diseminării rezultatelor realizate pe durata programului.



# 1. STADIUL ACTUAL AL CERCETĂRII

## 1.1. Considerații generale

Vanele fluture își au numele de la mișcarea discului care se rotește în jurul unui ax, cu rolul de închidere (obturare) a unui circuit hidraulic sau de reglare a debitului.

Rotirea discului (cunoscut și sub denumirea de clapetă) se poate face în plan vertical sau orizontal, manual, electric, pneumatic sau hidraulic. Acest mod de acționare depinde de diametrul interior al vanei, care este același cu al conductei pe care este montată și de domeniul de presiuni la care lucrează.

Domeniile de utilizare sunt foarte largi. Se regăsesc în amenajările hidraulice, fig.1.1, la stațiile de pompare, în industria petrochimică, etc [1, 4, 10, 12, 13, 14, 36, 38, 47, 73, 90, 96, 127, 141, 155].



Fig.1.1 Soluții de montaj a vanei fluture pe conductele de aducțiune [160]

În tabelul 1.1 sunt prezentate o parte din amenajările CHE din România, prevăzute cu vane fluture, marea parte fiind proiectate și montate de firma SC HydroEngineering SA [164].

Tabelul 1.1 Vane fluture în CHE România

Beneficiar (CHE)	Diametru nominal (mm)	Cădere de calcul (m.c.a.)	Amplasare în circuit hidraulic
Voineasa	350	160	Intrare în turbină
Stejaru	500	160	Intrare în turbină
Teliucu	600	400	Intrare în turbină
Tarnița	800	100	Intrare în turbină
Tarnița	800	100	Izolare turbină
Cugir	450	100	Intrare în turbină
Râul Alb	2400	110	Nod presiune
Godeanu 2	500	160	Intrare în turbină

10 Stadiul actual al cercetării – 1

Motru	2800	150	Nod presiune
Herculane	1200	100	Intrare în turbină
Galbenu	1000	60	Intrare în turbină
Jidoaia	800	60	Stație pompare
Tătaru	1400	100	Intrare în turbină
Lotru	4000	125	Nod presiune
Poiana Uzulu	1500	100	Golire de fund
Petrimanu	2000	40	Izolare conductă
Petrimanu	1000	60	Stație pompare
Leșu	1400	72	Izolare conductă
Cumpănița	1500	30	Intrare în turbină

O categorie aparte o reprezintă vanele cu disc biplan folosite în România pentru dimensiuni nominale mari ale conductelor. Funcție de locul unde sunt montate avem următoarele tipuri de amenajări [127, 164]:

- amenajări cu două vane montate la castelul de echilibru pentru serviciu și siguranță :

- CHE Râul Mare Retezat (diametrul nominal=3600 mm, presiunea nominală = 175 m.c.a),
- CHE Mărișelu (diametrul nominal = 3200 mm., presiunea nominală = 100 m.c.a.),
- CHE Dâmbovița - Clăbucet (diametrul nominal = 2800 mm, presiunea nominală = 120 m.c.a,
- CHE Colibița (diametrul nominal = 2000 mm, presiunea nominală = 110 m.c.a.,
- CHE Răstolița (diametrul nominal 2300 mm, presiunea nominală = 125 m.c.a.).

- amenajări cu o singură vană montată la castelul de echilibru, în nodul de presiune:

- CHE Ruieni (diametrul nominal = 3600 mm, presiunea nominală = 140 mca),
- CHE Munteni (diametrul nominal 3600 mm, presiunea nominală = =170 m.c.a.),
- CHE Rucăr (diametrul nominal = 3200 mm, presiunea nominală = 140 m.c.a.),
- CHE Remeți (diametrul nominal = 2800 mm, presiunea nominală = 110 m.c.a),
- CHE Nehoiășu-Siriu (diametrul nominal = 2800 mm, presiunea nominală = 140 m.c.a.),
- CHE Bumbesti (diametrul nominal 3000 mm, presiunea nominală = 45 m.c.a.),
- CHE Dumitra (diametrul nominal 3000 mm, presiunea nominală = 45 m.c.a.).

- amenajări cu o vană montată la intrarea în turbină:

- CHE Tarnița (diametrul nominal = 2700 mm, presiunea nominală = 100 m.c.a.),
- CHE Vălenii de Munte (diametrul nominal = 1400 mm, presiunea nominală = 65 m.c.a.),
- CHE Herculane (diametrul nominal = 1800 mm, presiunea nominală = 60 m.c.a.)
- CHE Bumbesti (diametrul nominal = 1500 mm, presiunea nominală = 170 m.c.a.),

- CHE Dumitra (diametrul nominal = 1500 mm, presiunea nominală = 170 m.c.a.).

Toți constructorii de vane fluture (și în general de vane) [160-163] prin documentația tehnică însoțitoare, fac precizări cu privire la poziția unghiulară a discului vanei, de la care aceasta poate funcționa în cavitație. Din acest motiv, piesele aflate în zona în care hidrodinamica curentului determină funcționarea în cavitație, sunt realizate din oțeluri inoxidabile, așa cum se va arăta în descrierile de mai jos (subcapitolul 1.2).

Deși toate vanele, indiferent de forma lor constructivă sau de dimensiune, oricât s-a dorit evitarea, în anumite situații, sunt exploatare în regim de cavitație, cercetările pe acest subiect sunt foarte reduse. Din literatura parcursă am reușit să identific doar o singură teză, elaborată de PERIȘ [127], în care simularea numerică a curgerii prin vanele fluture cu disc biplan evidențiază existența cavitației, dar fără a se face un studiu profund legat de toate efectele ce derivă de la o astfel de funcționare - nefiind principalul obiectiv al tezei. Alte informații, găsite în literatură [1, 2, 3, 4, 126, 127] menționează această funcționare, fără a se da date cantitative privind gradul de deteriorare prin eroziunea cavitației, durata de exploatare până la repararea ori înlocuirea pieselor erodate, sau alte informații importante legate de exploatarea în cavitație.

O clasificare a vanelor fluture, folosite în sistemul hidroenergetic și la stațiile de pompare, arată astfel [2, 160, 162, 163]:

1. după modul de acționare a organului obturator:
  - cu acționare manuală;
  - cu acționare electrică;
  - cu acționare pneumatică;
  - cu acționare hidraulică;
2. după numărul de excentricități cu care este prevăzut discul:
  - vane fluture centrice (la care axa discului este concentrică cu axa fusului și cu axa corpului vanei);
    - vane fluture cu dublu excentric (la care excentricitatea este raportată la axul central al conductei, iar excentricitatea dublă este raportată la scaunul vanei);
    - vane fluture cu triplu excentric (la care excentricitatea se referă la diferența de poziție (excentricitate după ambele direcții) a centrelor de greutate pentru fus, respectiv pentru discul în ansamblu).
3. după forma și caracteristicile mecanice și hidraulice ale discului:
  - vane fluture cu disc lenticular orizontal sau vertical (folosite în aplicațiile cu presiuni  $\leq 16$  bar și diametre nominale de până la 2200 mm);
  - vane fluture cu disc plan (utilizate la amenajările hidroenergetice în care fluidul de lucru lucrează la presiuni mari și viteze mici, având discul executat în variantă turnată din fontă sau oțeluri manganoase sau în variantă sudată din table laminate);
    - vane fluture cu disc biplan, cu două sau mai multe nervuri (folosite la amenajările hidroelectrice ca organe de izolare a conductei forțate, montate în nodul de presiune de la castelul de echilibru, sau la intrarea în turbină, deoarece suportă presiuni de maxim 25 bar și pot ajunge la diametre nominale de până la 4900 mm. Aceste vane au scaunul de etanșare realizat din oțel inoxidabil).
4. după diametrul nominal al vanei (egal cu cel interior al conductei) sunt de la ordinul zecilor de milimetru ( $\leq 40$  mm) până la ordinul metrilor ( $\cong 4,9$  m, în cazul vanelor cu disc biplan).
5. după domeniul de presiuni funcționează de la ordinul barilor la cel al zecilor de bari, care se poate corela și cu viteza maximă.

6. după locul de plasare poate fi:

- la intrarea în turbină;
- în nodul de presiune de la castelul de echilibru;
- pe aspirația pompei;
- pe refularea pompei;
- la golirile de fund la barajelor.

7. după numărul vanelor din nodul de presiune de la castelul de echilibru pot fi:

- cu o singură vană;
- cu două vane.

Întrucât scopul principal al tezei este cel de analiză a funcționării în cavitație și de cercetare a efectului metodelor utilizate pentru creșterea rezistenței la eroziunea cavitației a oțelului inoxidabil X5CrNi18-10, folosit pentru piesele vanelor fluture, aflate în zonele de manifestare a curgerii cavitaționale, în cadrul acestui capitol se va face referire, în special, la acele aspecte care au legătură cu tema de doctorat.

## **1.2. Cerințe funcțional-constructive impuse vanelor fluture**

Din punct de vedere al rolului funcțional vanele sunt echipamente hidromecanice destinate reglării debitului de fluid în funcție de necesarul dorit sau pentru a bloca trecerea fluidului. De aceea sunt componente de bază ale centralelor hidroelectrice (montate pe conductele forțate de aducțiune a apei), ale stațiilor de pompare și ale barajelor de acumulare.

Indiferent de forma constructivă și tipul de închidere, vanele destinate trecerii fluidelor și obturării conductelor, trebuie să îndeplinească o serie de condiții: rezistență mecanică corespunzătoare presiunii maxime din circuit, să se cunoască lichidul de lucru și temperatura maximă a acestuia, viteza lichidului de lucru, să opună o rezistență hidraulică mică la poziția complet deschisă, la poziția complet închis să asigure etanșarea perfectă între organul obturator și corpul vanei, siguranță în funcționare și fiabilitate.

Corpul vanei, are diametrul identic cu cel al conductei, fiind executat din fontă cenușie, tablă de oțel sudată sau din oțel turnat. Organul obturator este constituit dintr-un disc lenticular, executat din oțel carbon aliat, oțel inoxidabil, și mai rar din fontă, care se poate roti cu unghiul  $\alpha \leq 90^\circ$  în jurul fusurilor. În poziția închis, aceasta trebuie să asigure etanșarea corespunzătoare. Etanșarea se poate realiza prin contactul metalic direct ("fier pe fier") între disc și carcasă sau cu ajutorul unui element elastic care poate fi montat pe carcasă sau pe disc, în ambele situațiile folosindu-se o garnitură profilată din cauciuc sintetic, [163].

În figurile ce urmează sunt date soluții de vane fluture cu marcarea componentelor realizate din oțel inoxidabil care în timpul funcționării sunt atacate de cavitație.

Fig.1.2 prezintă toate piesele componente ale unei vane fluture.

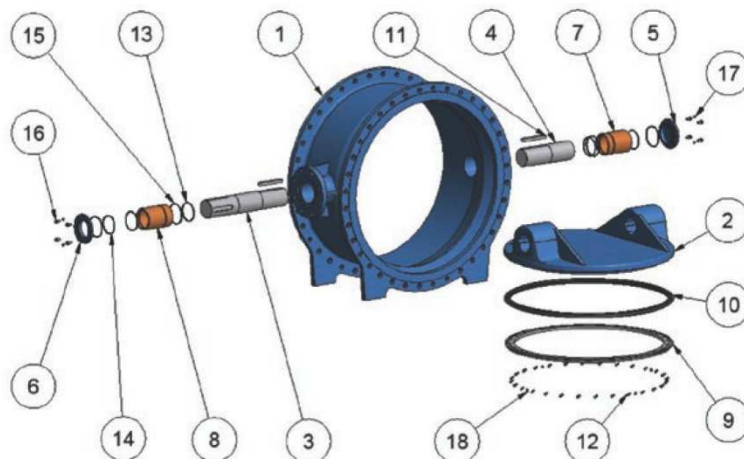


Fig.1.2 Componentele vanei fluturi

1-Corp; 2- Disc; 3- Ax de transmisie; 4 - Ax; 5 - Capac; 6- Capac rulment;  
 7 - Rulment scurt; 8 - Rulment lung; 9 - Inel suport de etanșare; 10 - Garnitura de etanșare;  
 11 - Cheie; 12 - Suruburi; 13-15 - O-ring; 16 - Suruburi; 17, 18- Set șuruburi [159]

Pieșele afectate de cavitație, atunci când poziția unghiulară a discului, generează curenți cavitaționali și rezerva de presiune devine negativă (vezi capitolul 3) sunt 4, 9, 12 și 18.

În fig.1.3 este prezentată, în secțiune, o vană fluturi cu disc plan, de tip AVK dublu excentrică, cu acționare manuală, destinată domeniului de diametre nominale de 200...2200 mm, cu limitarea vitezei de curgere, în conformitate cu DIN EN 1074, la 2,5 m/s pentru presiunea nominală de 6 bar și la o viteză de 5 m/s pentru presiunea nominală la 25 bar [160].

Vana poate fi exploatată în regim deschis și închis, însă pentru evitarea funcționării în cavitație, executantul recomandă ca discul să fie deschis la minimum 30°.

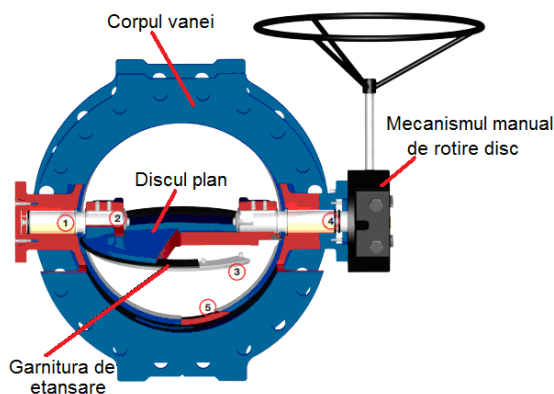


Fig.1.3 Vană fluturi cu disc plan, de tip AVK (prelucrare din [160])

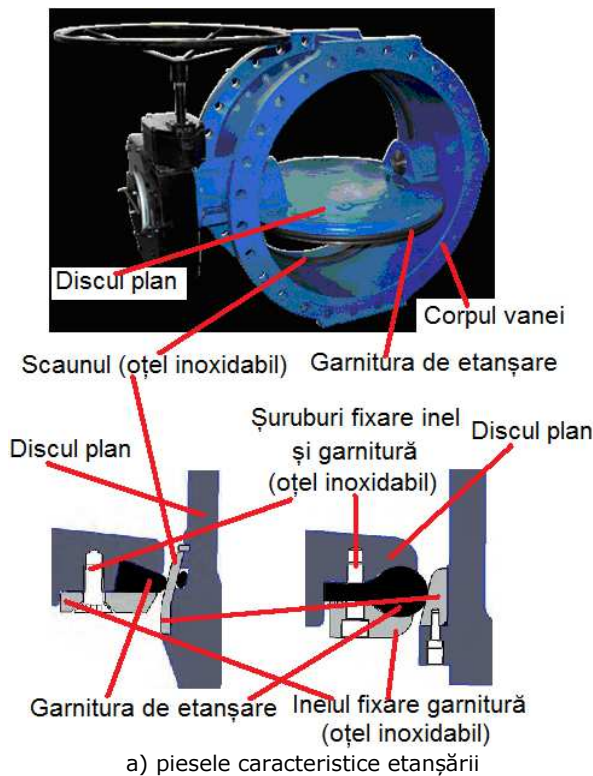
Semnificațiile și caracteristicile funcțional - constructive ale acestei vane, conform notațiilor din fig.1.3, sunt:

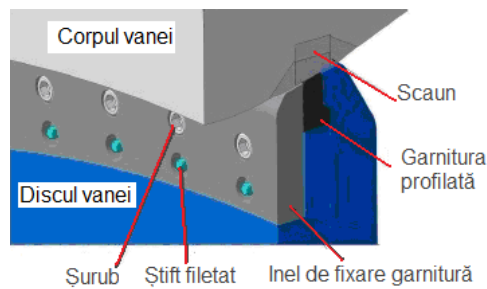
#### 14 Stadiul actual al cercetării – 1

- 1- lagărele de sarcină mare, sunt autolubrifiante, prevăzute cu inele de etanșare duble la capătul axului și sunt realizate din bronz cu aluminiu;
- 2- placă de oțel inoxidabil care asigură protecția împotriva coroziunii (pe perioada de închis complet) și este plasată în acest loc datorită vârtejului cavitațional ce se formează la poziția deschisă;
- 3- garnitura de etanșare, fixată pe discul vanei cu inelul din oțel inoxidabil, prin șuruburi realizate tot din oțel inoxidabil. Această soluție permite etanșare pe ambele direcții;
- 4- inele de etanșare, care împiedică ajungerea apei la mecanismul de rotire;
- 5- scaunul fixat pe corpul vanei cu inel din oțel inoxidabil.

Piesele care sunt supuse eroziunii, în situațiile de funcționare în cavitație, sunt: scaunul, inelul fixare scaun (numit și inel reținere scaun pentru fixarea garniturii de etanșare) și placa din oțel inoxidabil. Astfel de vane au corpul și discul turnate din fontă ductilă (cu grafit nodular).

În fig.1.4 sunt prezentate soluțiile constructive pentru sistemul de etanșare a discului. Aceste soluții, în care scaunele și inelele de fixare a garniturilor pe disc sunt realizate din oțeluri inoxidabile, vin să confirme și existența unor regimuri de funcționare în cavitație.





b) Detaliu de contact disc-scaun

Fig.1.4 Soluții pentru piesele de etanșare a vanei fluture (prelucrare din [160])

În fig.1.5 este prezentată vana fluture VKF 41, cu disc vertical, care lucrează la presiuni de 6 bar, 10 bar și 16 bar, având diametrele nominale de 40...200 mm [161]. Este destinată circuitelor închise, circuitelor de cascada cazane și circuitelor schimbătoarelor de căldură. Regimul de exploatare este unul intens coroziv, nu numai datorat cavitației ci și mediilor vapoaze și lichide cu temperaturi ce pot ajunge până la +120 °C. Ca urmare a condițiilor de exploatare discul și axul sunt realizate din oțel inoxidabil, iar corpul este realizat din fontă cenușie EN-GJL-250 conform EN 1561.



Fig.1.5 Vana fluture VKF 41 (preluare din [161])

Fig.1.6 prezintă o vană fluture cu flanșe și ax centric acționată manual, destinată obturării totale sau parțiale a conductelor prin care se transportă gaze corozive sau necorozive, lichide, semilichide și pulberi [162]. Astfel de vane sunt realizate la diametre nominale de 50 mm până la 1200 mm și funcționează la presiuni maxime de 16 bar și temperaturi de până la +150 °C. Există soluții și cu acționare prin actuator electric. Pentru diametre nominale mai mari de 300 mm, sistemele de rotire a discului sunt dotate cu reductoare. Funcție de condițiile de funcționare, discul este realizat din fontă, oțel carbon sau oțel inoxidabil, în timp ce corpul este turnat din fontă cenușie EN-GJL-250, conform EN 1561.



Fig.1.6 Vană fluture cu flanșe și ax centric (preluare din [162])

În fig.1.7 și 1.8 sunt prezentate soluții ale vanelor fluture cu disc biplan, proiectate și montate de SC HydroEngineering SA [164], pentru care în capitolul 3 s-a făcut simularea numerică a curgerii.



Fig.1.7 Vana fluture cu disc biplan înainte de montaj [159]

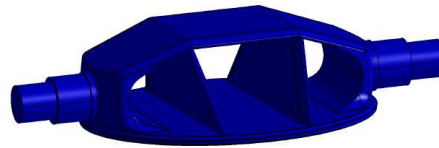


Fig.1.8 Soluție constructivă disc biplan – variantă finală [127]

Specific acestor vane le este robustețea la solicitările mecanice și hidrodinamice și pretarea la conducte cu diametre nominale foarte mari, motiv pentru care acționarea lor, în cele mai multe cazuri se realizează cu servomotoare hidraulice. Acest tip de vane a fost foarte bine realizat din punct de vedere al proiectării de către SC HydroEngineering SA [164] și de comportare în exploatare. Din păcate, mersul prost al industriei românești a dus în stare de colaps această firmă, în care au lucrat adevărați profesioniști din domeniul echipamentelor hidromecanice, destinate sistemelor hidroenergetice și de alimentare cu apă.

### 1.3. Eroziunea prin cavitație la vanele fluture

Literatura de specialitate este foarte săracă în rezultate privind cavitația în vanele fluture. Din documentarea realizată, rezultă că funcționarea în cavitație a vanelor fluture este dependentă de debit (prin viteza de curgere) și unghiul de înclinare a discului [2, 3, 4, 126, 127, 152].



Un studiu elocvent, prin care se confirmă funcționarea în cavitație a vanelor fluturo, este cel realizat de Periș [127], la Universitatea Eftimie Murgu din Reștia pe o vană fluturo având trei variante de disc: inițial, intermediar respectiv final (fig.1.8-1.9), prin intermediul modulului Flow Simulation, integrat în interfața aplicației SolidWorks, pentru debitul nominal  $Q_n$  masic = 154631 m<sup>3</sup>/s, respectiv viteza de 8.2 m/s și pentru 17 poziții unghiulare ale discului, cuprinse între 0 ÷ 80 grade cu pas de 5 grade.

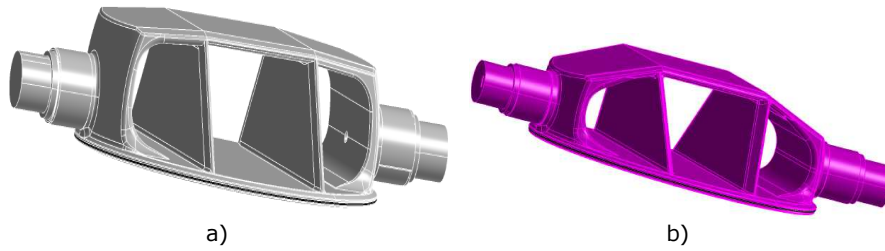
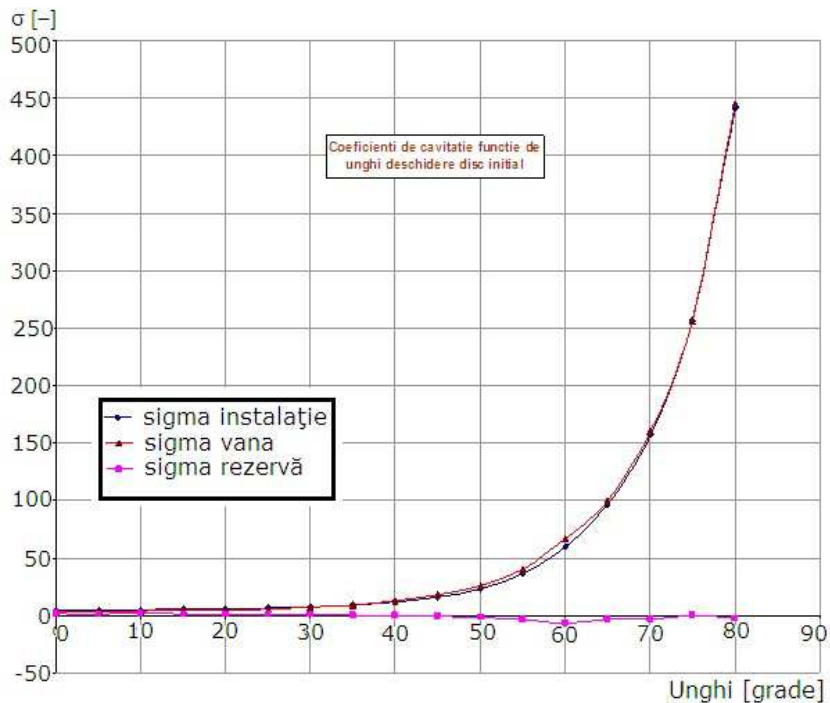
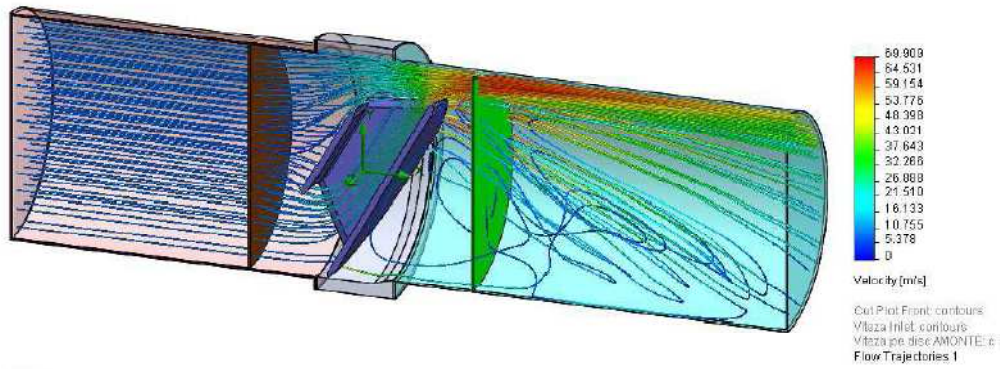


Fig.1.9 Soluții constructive disc biplan folosite la simularea curgerii [127]  
a) variantă inițială  
b) variantă intermediară

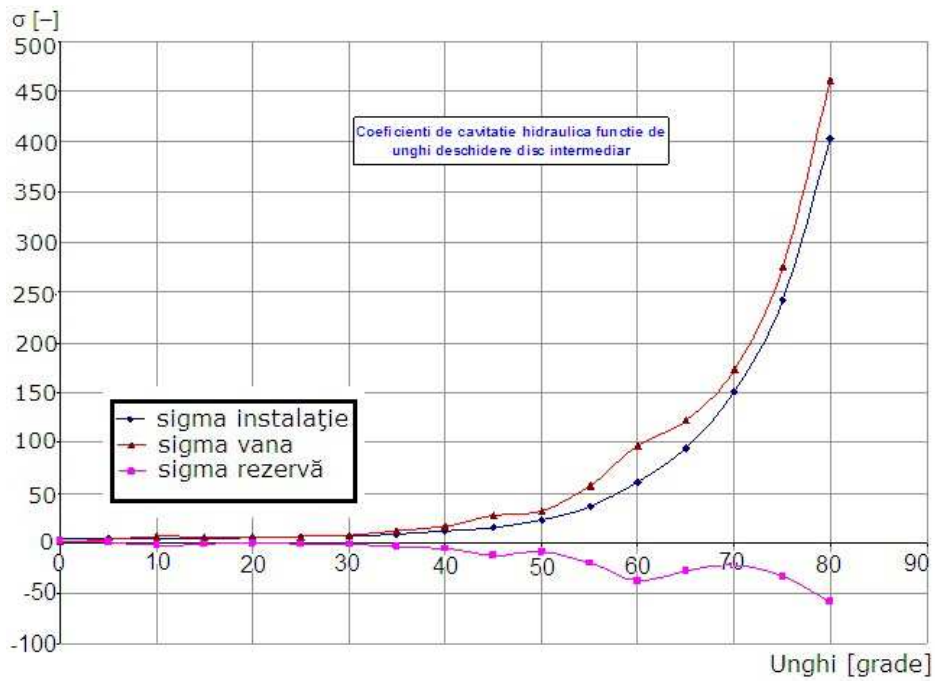
Rezultatele obținute, fig.1.10-1.12, confirmă că, indiferent de forma discului, la un unghi de deschidere mai mare de 50° vana funcționează în cavitație puternic dezvoltată.



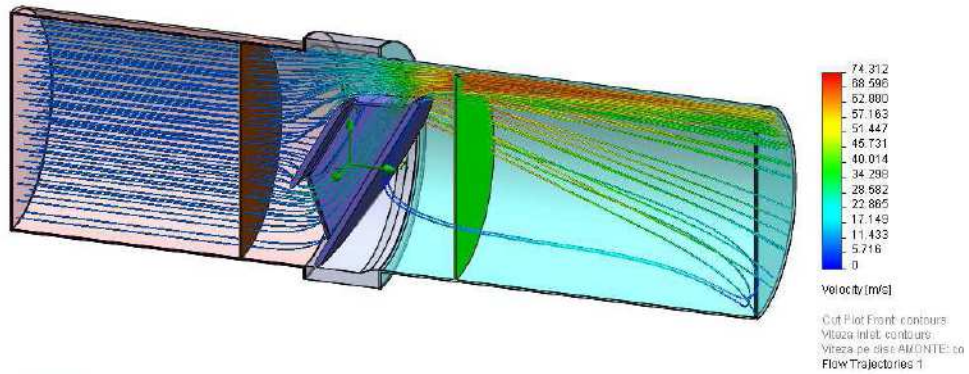
a) Variația coeficienților de cavitație



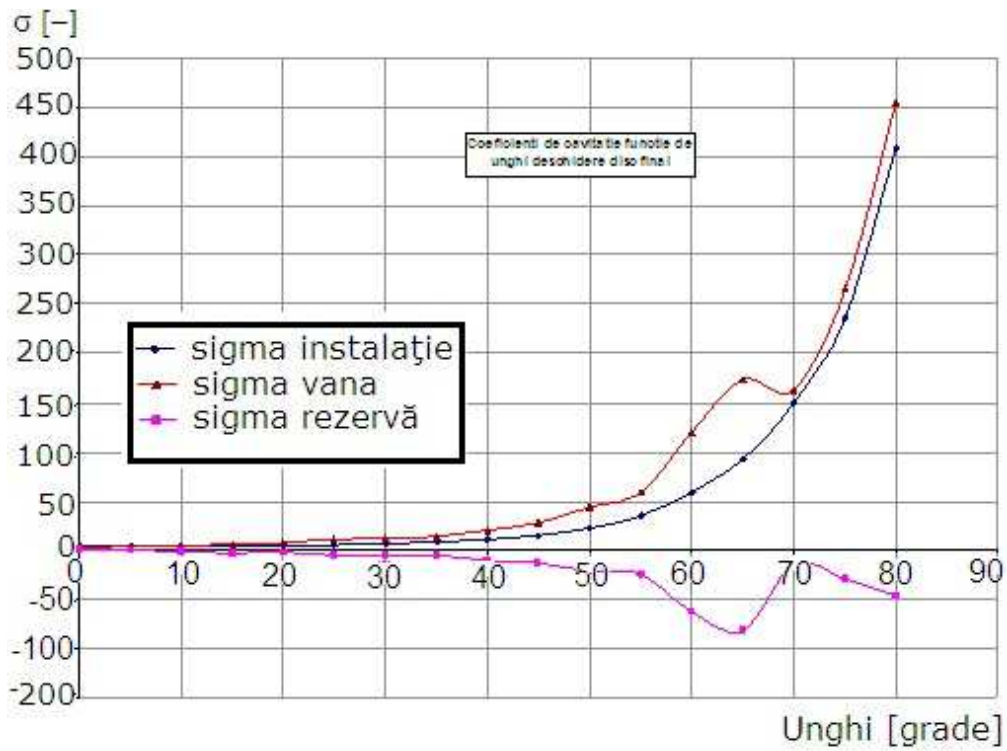
b) Distribuția vitezei la un unghi de deschidere de  $60^\circ$   
 Fig.1.10 Variația vitezei și a coeficienților de cavitație funcție de unghiul deschidere - disc inițial (preluare din [127])



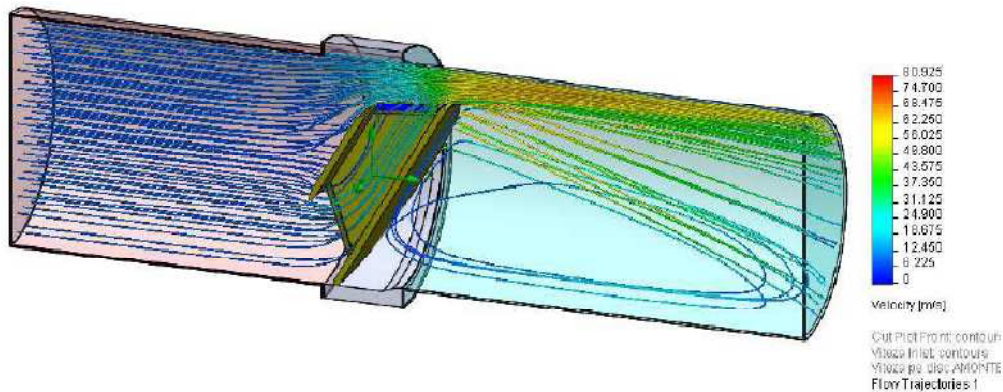
a) Variația coeficienților de cavitație



b) Distribuția vitezei la un unghi de deschidere de 60°  
 Fig.1.11 Variația vitezei și a coeficienților de cavitație funcție de unghi deschidere disc intermediar - (preluare din [127])



a) Variația coeficienților de cavitație



b) Distribuția vitezei la un unghi de deschidere de 60°

Fig.1.12 Variația vitezei și a coeficienților de cavitație funcție de unghi deschidere disc final - (preluare din[127])

O altă dovadă a existenței cavitației în vana fluture o reprezintă diagrama din fig.1.13, obținută de un colectiv de cercetători de la UP București, în urma cercetărilor realizate pe o vană fluture cu diametrul de 600 mm [133].

Din această diagramă se observă că în vanele fluture, prin diferite valori de deschidere se pot crea toate cele 6 regimurile de funcționare în cavitație, indicate de literatură.

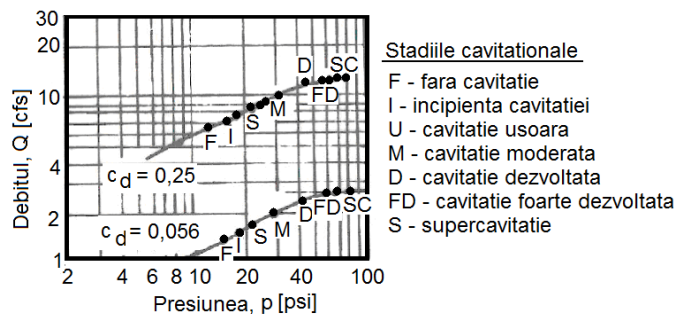


Fig.1.13 Evoluția stadiului cavitației într-o vană fluture cu diametrul nominal de 250 mm, pentru diferite unghiuri de deschidere [133]

Cum cele mai solicitate piese la cavitație sunt scaunul, inelul de reținere scaun și fixare garnitură pe disc, precum și șuruburile de prindere a acestora, se justifică necesitatea ca ele să fie realizate din oțeluri inoxidabile. Însă, pentru a le mări durata de exploatare, în astfel de condiții hidrodinamice, datorită formelor geometrice simple și dimensiunilor nu foarte mari, pot fi supuse unor tratamente (cum sunt cele de călire volumică și termochimice de nitrurare), prin care suprafețele expuse la cavitație să își sporească rezistența față de atacul acesteia.

Observațiile din timpul reparațiilor [166], pe o vană fluture, după 2 ani de funcționare la presiunea de 1,2-1.4 bar, o viteză de 2,2 m/s, la o deschidere a discului de aproximativ 30° fig.1.14, pun în evidență zone erodate pe inelul de fixare garnitură și pe scaunul fixat de corpul vanei.

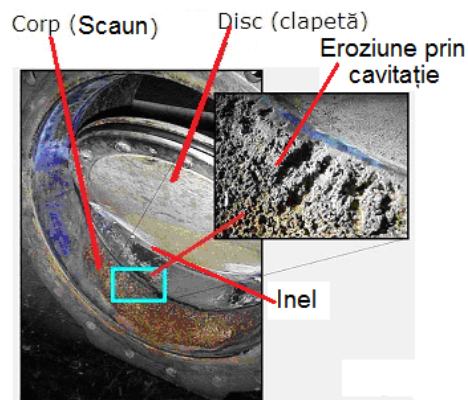


Fig.1.14 Vana fluture distrusă de cavitație [166]

### 1.4. Concluzii

1. Vanele fluture sunt echipamente hidromecanice de bază în construcțiile hidrotehnice și stațiile de pompare, construite într-o gamă largă de dimensiuni și forme, funcție de domeniul de aplicație și condițiile hidrodinamice de exploatare.
2. Cercetările și simulările numerice, privind regimurile de curgere, realizate până în prezent, confirmă că funcție de unghiul de înclinare a discului obturator, la anumite valori, pentru un debit dat, se creează condițiile hidrodinamice de apariție și dezvoltare a cavitației.
3. Pentru zonele în care apare cavitația, prin efectul său de distrugere, vanele sunt prevăzute cu piese realizate din oțeluri inoxidabile. Cele mai afectate zone sunt cele de etanșare în care sunt montate: scaunele, inelele de fixare a garniturilor și cele de reținere scaune.
4. Cerințele impun minimizarea degradării materialelor structurale selectate pentru execuția pieselor ce pot fi erodate și aplicarea unor învelișuri sau a unor tratamente termice, mecanice, termochimice, care să asigure o înaltă rezistență la eroziune prin cavitație.

### 1.5. Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele tezei de doctorat sunt:

- analiza numerică a curgerii în vana fluture cu disc biplan cu punerea în evidență a regimurilor de funcționare în cavitație și a zonelor afectate de aceasta.
- aprofundarea mecanismului de degradare prin eroziunea cavitației, produsă de aparatul vibrator standard, cu cristale piezoceramice, T2 (amplitudinea vibrațiilor = 50  $\mu\text{m}$ , frecvența vibrațiilor = 20000  $\pm 1\%$  Hz, diametrul probei = 15,8 mm), aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara și stabilirea modalităților tehnologice de creștere a

rezistenței la degradare a oțelului inoxidabil austenitic X5CrNi18-10 prin aplicarea unor tratamente termice volumice (călirea pentru punere în soluție la temperatură constantă și durate diferite de menținere, respectiv la diferite temperaturi de încălzire și durate identice de menținere) și de suprafață (de nitrurare în mediu gazos și cu fascicul laser);

- morfologia și caracterizarea microstructurii suprafețelor solicitate la eroziunea cavitației;
- un nou concept de ierarhizare a oțelurilor inoxidabile după rezistența la eroziunea cavitației.

**Noutatea tezei de doctorat:**

Noutatea tezei de doctorat constă în identificarea regimurilor de exploatarea a vanelor fluture cu disc biplan, la care sunt create condițiile de funcționare în cavitație, prin simularea numerică a curgerii și în oportunitatea aplicării procedurii tradițional de călire pentru punere în soluție (cu temperatură de încălzire constantă și durate de menținere diferite, respectiv cu durate de menținere constante și temperaturi de încălzire diferite) și a unor tehnici speciale de tratament termochimic de suprafață (nitrurare în mediu gazos și cu rază laser) pentru îmbunătățirea rezistenței la eroziunea prin cavitație a oțelului inoxidabil austenitic X5CrNi18-10, destinat fabricării pieselor de vană fluture, supuse atacurilor cavitației.

## 2. MATERIALUL CERCETAT. PROCEDURA EXPERIMENTALĂ

### 2.1. Structura și proprietățile oțelurilor inoxidabile austenitice

Oțelurile inoxidabile austenitice au în compoziția chimică în general 18-25%Cr, 8-20%Ni și o concentrație scăzută în carbon; uneori, ele mai conțin Mo, Nb, Ti, N [88]. Structura de echilibru este constituită în principal din austenită și o anumită proporție de ferită și de carburi  $(CrFe)_{23}C_6$  (fig.2.1).

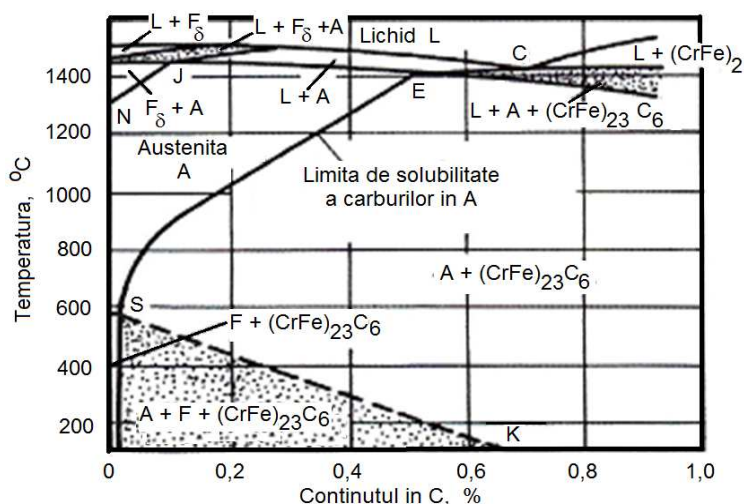


Fig.2.1 Diagrama de echilibru pseudobinară Fe- Cr-Ni-C pentru 18% Cr și 8% Ni [112]

Aliajele cu un conținut mai mic de 0,04%C nu prezintă în structură carburi în exces (fig.2.1). Exemple de oțeluri inoxidabile austenitice: X2CrNi18-9; X10CrNiTi18-10; X2CrNiMo17-12-2; X6CrNiMoTi17-12-2; X2CrNiMoN17-13-3; X1CrNiMoCuN20-18-7. Aceste oțeluri se caracterizează printr-o rezistență mare la rupere, o limita de curgere scăzută, valori foarte ridicate ale ductilității și tenacității și o mare rezistență la coroziune în apa dulce, apă de mare, acid azotic, acid sulfuric și alte medii agresive. Obținerea unei rezistențe foarte mari la coroziune și a unei structuri complet austenitice a acestor oțeluri se face prin încălzirea la temperaturi situate deasupra liniei SE (fig.2.1) cel mai des la 1050-1150 °C (pentru dizolvarea carburilor, a fazei  $\sigma$ ,  $\Pi$ , etc.) și apoi sunt călite în apă (sau chiar în aer). Structura austenitică obținută în urma acestui tratament termic (numit călire pentru punere în soluție) oferă slabe caracteristici de rezistență mecanică și bune caracteristici de plasticitate. Rezistența la rupere poate fi mărită prin deformarea la rece (60-70%) până la valori de 1400-1500 N/mm<sup>2</sup>, în timp ce alungirea la rupere scade până la 8-

9% (vezi exemplul din fig.2.2) [112]. Modificarea proprietăților mecanice este justificată de efectul de ecrusare mecanică, uneori însoțită și de o ecrusare fizică.

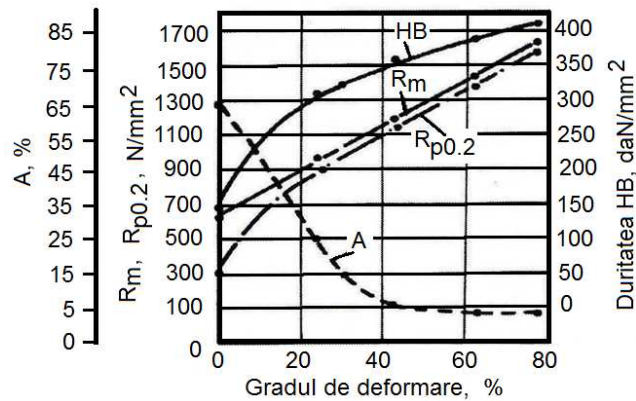


Fig.2.2. Variația proprietăților mecanice ale oțelului 2NiCr185 cu grad de deformare la rece [112]

Aceste oțeluri au o aptitudine relativ bună la sudare. În cazul încălzirii pentru sudare, pe intervalul 550-750 °C, are loc precipitarea carburilor de  $(CrFe)_{23}C_6$  pe limitele grăunților austenitici iar în zonele adiacente conținutul în crom scade sub limita admisă de 12%; oțelul devine mai fragil și sensibil la coroziune intercristalină. Inițierea acestei forme de coroziune are loc doar atunci când carburile precipitate  $(CrFe)_{23}C_6$  formează o rețea aproape continuă pe marginile grăunților [112].

## 2.2. Fenomene de precipitare a fazelor secundare

Precipitarea carburilor este un proces care depinde de temperatură - timp și care, la temperaturi mai mici, este dirijat de difuzia carbonului, iar la temperaturi mai ridicate de creșterea solubilității carbonului în masa de bază (fig.2.3).

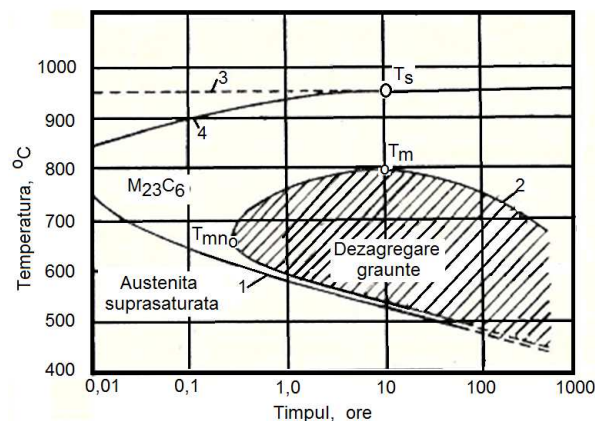


Fig.2.3 Diagrama T.T.P (temperatură-timp-precipitare carbură  $M_{23}C_6$ ) [106]



Faza  $\sigma$  este o combinație intermetalică cu rețea tetragonală, nemagnetică, fragilă și dură ( $HV = 700-800 \text{ daN/mm}^2$ ) care participă în oțelurile înalt aliate cu Cr și Cr-Ni. În sistemul Fe-Cr, faza  $\sigma$  conține 48%Cr, iar la oțelurile aliate, ea poate conține Mo, Ni, Mn, Si, Ti și P [106].

Precipitare fazei  $\sigma$  se manifestă printr-o scădere a tenacității, o creștere a durtității și uneori prin micșorare rezistenței la coroziune. La oțelurile inoxidabile, faza  $\sigma$  precipită de obicei la conținuturi de peste 16%Cr.

Concentrații mai mari de C și Ni, alături de obținerea unei structuri pur austenitice, provoacă o frânare intensă a proceselor de precipitare. Prezența azotului declanșează precipitarea fazei  $\sigma$  care are loc la concentrații mai mari în Cr. Oțelurile aliate cu Mo necesită temperaturi mai ridicate de încălzire pentru punere în soluție (1100 °C) pentru că se deplasează domeniul faze  $\sigma$ . Având o afinitate mai mare față de C, elementele stabilizatoare (Ti și Nb) favorizează separarea de faza  $\sigma$ , dând naștere unor carburi stabile [106].

Oțelurile austenitice, de tipul celui cercetat în cadrul tezei, prezintă avantaje deosebite privind caracteristicile de tenacitate și rezistență la coroziune. Solubilitatea carbonului în matricea de bază a acestor oțeluri este extrem de redusă la temperaturi nu prea ridicate (fig.2.4). Ea este de aproximativ 0,006% la temperaturi de 20 °C pentru un oțel austenitic și mult mai scăzută pentru un oțel feritic [106]. Odată cu creșterea conținutului în carbon se creează condiții favorabile precipitării unor carburi de crom de tipul  $M_{23}C_6$  iar în cazuri mai rare și  $M_7C_3$ , respectiv  $M_6C$ . Conținutul în crom al carburilor  $M_{23}C_6$  și  $M_7C_3$  este cuprinsă între 42 și 65%. Precipitarea carburilor de crom de-a lungul limitelor grăunților cristalini este o premisă pentru declanșarea coroziunii intercrystaline dar și pentru înrăutățirea unor caracteristici mecanice [106].

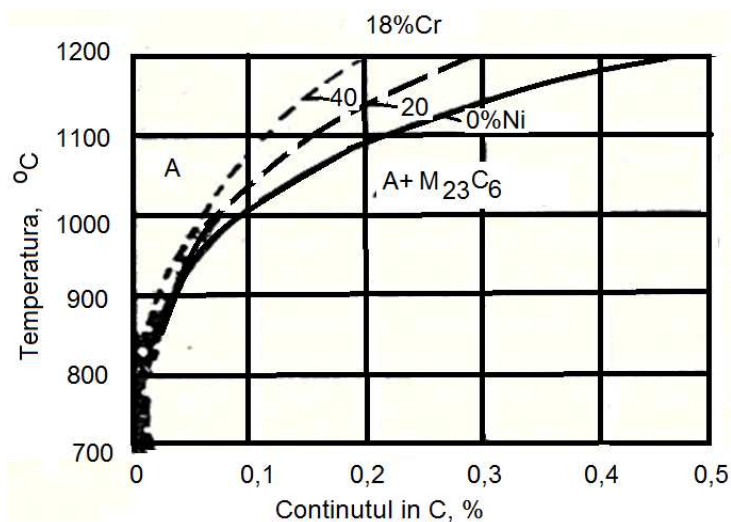


Fig.2.4 Influența conținutului de Ni asupra solubilității carbonului și a limitei de precipitare a carburii  $M_{23}C_6$  în aliajele fierului cu 18% Cr [106]

Alături de reducerea conținutului în carbon și de aplicarea tratamentului termic de călire pentru punere în soluție, o altă soluție de creștere a rezistenței la coroziune intercrystalină o constituie alierea cu elemente stabilizatoare Ti ( $\%Ti \geq 5x\%C$ ) sau Nb ( $\%Nb \geq 8x\%C$ ). Ambele elemente leagă carbonul sub formă de

carburi (TiC, NbC) astfel încât cromul rămâne în soluția solidă. Oțelurile inoxidabile austenitice se utilizează pe scară largă în tehnica frigorifică pentru fabricarea elementelor de transport și stocarea de gaze lichefiate, în construcția echipamentelor hidromecanice folosite pentru generarea puterii hidroelectrice, în industria aeronautică și în tehnica spațială, etc. [112].

### 2.3. Tehnologii de creștere a rezistenței la cavitație

Oamenii de știință și producătorii de echipamente hidromecanice sunt preocupați de găsirea de materiale și tehnologii noi prin care să se mărească durata de exploatare în regim de cavitație, lucru posibil prin realizarea unei rezistențe ridicate la eroziunea cavițională și a unor bune proprietăți mecanice. Cercetările realizate în laboratoarele de specialitate [1, 2, 15, 48, 54, 71, 128, 134, 142, 148, 150, 157] arată că nivelul distrugerilor caviționale depind, în mare parte, de intensitatea caviției, dar și de natura materialului caracterizat prin: microstructură, tehnologia de elaborare a semifabricatului (turnat, laminat, etc), tratamentul de durificare, omogenizare structurală, valoarea proprietăților mecanice (Rm, Rp0.2, HB, KCU), compoziția chimică, respectiv conținutul în carbon și în elemente de aliere (Ni, Cr, Mn, Mo, V, W, Nb, Al) [112]. Astfel, la toate piesele solicitate la cavitație, se aplică diverse tehnologii prin care se urmărește ca în structura materialului, dar mai ales în suprafața expusă la cavitație, să se obțină caracteristici mecanice și microstructurale care măresc rezistența la impactul cu microjeturile și undele de șoc, generate în procesul cavițional [1, 2, 15, 48, 54, 65, 70, 71, 141, 142, 146,].

Din literatura parcursă [15, 20, 24-27, 29, 32, 39, 48-49, 52, 55, 56, 82, 87, 104, 105, 109-111, 113-117, 120, 136, 139], cele mai utilizate tehnologii aplicate pieselor solicitate la cavitație, fabricate din oțeluri, sunt:

- 1. tratamentele termice volumice** (recoacere, călire pentru punere în soluție și îmbătrânirea);
- 2. tratamente termice de suprafață** (călire prin curenți de înaltă frecvență, călire cu laser și călire cu fascicul de electroni);
- 3. tratamentele termochimice** (cementarea, nitrurarea, cianizarea, aluminizarea, cromizarea, brunarea, borizarea, feroxarea, silicizarea, sulfizarea, zincarea);
- 4. acoperirile de suprafață prin pulverizare termică** (HVOF, în plasmă, cu arc electric);
- 5. acoperirile de suprafață prin depuneri în fază de vapori** (PVD și CVD);
- 6. tratamente duplex** (Carburare + rulare la rece, Nitrurare + CVD, Nitrurare + metalizare)
- 7. acoperirile de suprafață prin sudare** (sudarea în plasma cu arc transferat, sudarea cu fascicul laser și de electroni, sudarea cu sârmă tubulară);
- 8. tratamente mecanice prin deformare la rece și la cald** (rularea și sablarea cu alică)

Dintre aceste tehnologii cele mai aplicate sunt tratamentele termice volumice, mai ales la piesele mari și cu configurație geometrică spațială complexă, cum sunt rotoarele și paletele mașinilor hidraulice, inclusiv elicele navale [39, 55, 87, 104, 105, 107, 110, 111, 113, 120].

Tratamentele termice de suprafață și termochimice sunt des utilizate la piesele de dimensiuni medii și mici, cu configurații relativ simple, de tipul sertarelor, supapelor

și scaunelor din construcția aparatelor de comandă, distribuție și reglare, evacuatoarele de condens termodinamic și inelelor de reținere scaun de la discurile vanelor fluture, și alte piese din oțel de la vanele echipamentelor hidromecanice, solicitate la cavitație [15, 20, 25, 27, 29, 32, 48, 55, 87, 104, 107, 110, 111, 113, 120].

În ultimul timp sunt accentuate cercetările privind influența acoperirilor de suprafață. folosind tehnologiile moderne, în special pe cele bazate pe laser [31,33, 34, 41, 57, 87, 104, 117, 120, 121, 137,138].

Restul tratamentelor, menționate mai sus, sunt în curs de cercetare, dar rezultatele nu sunt a se justifica din diverse motive, în special datorită complexității geometrice a pieselor ce funcționează în cavitație intens dezvoltată și datorită costurilor care sunt destul de mari. De altfel, utilizarea oricărei tehnologii în îmbunătățire a rezistenței la cavitație trebuie să poată fi aplicată și să fie justificată din punct de vedere economic. Principala dificultate, în special la tehnologiile noi de acoperire cu utilizarea fasciculului laser, este forma spațială a pieselor, cum sunt rotoarele turbinelor Francis și ale pompelor centrifuge.

## 2.4. Materialul cercetat

Compoziția chimică prescrisă [165] și efectivă a oțelului inoxidabil austenitic X5CrNi18-10 în stare de livrare este prezentată în tabelul 2.1. Valorile determinate pentru principalele proprietăți mecanice, sunt:  $R_m = 550$  MPa,  $R_{p0.2} = 195$  MPa, Duritatea Brinell HB = 183 daN/mm<sup>2</sup> (circa. HV = 192 daN/mm<sup>2</sup>), alungirea la rupere  $A_5 = 45$  %.

Tabelul 2.1 Compoziția chimică a oțelului cercetat X5CrNi18-10

Elemente chimice componente [%]										
C	Cr	Ni	Mn	Si	Cu	W	P	S	N	Fe
Prescripții [20]										
0.07	17.5-19.5	8.0-10.5	2.0	1.0	-	-	0.045	0.015	≤0.11	rest
Efectiv										
0.046	17.95	8.11	1.46	0.89	0.27	0.16	0.024	0.019	Nedeterminat	rest

Corelația dintre compoziția chimică și microstructură este realizată cu ajutorul diagramei Schäßler [111-112]. Această diagramă a fost construită pentru condiții de cristalizare specifice sudării manuale cu electrozi înveliți luând în considerare acțiunea combinată a elementelor de aliere alfa-gene (conținutul echivalent de Cr) și gama-gene (conținutul echivalent de Ni). Calculând cromul echivalent și nichelul echivalent s-a stabilit, pe diagramă, un punct caracteristic care indică structura aliajului. La același oțel compoziția chimică variază între anumite limite, de aceea s-au calculat valorile minime și maxime ale cromului și nichelului stabilindu-se un dreptunghi caracteristic (Crech.min.-Niech.min.; Crech.min.-Niech.max.; Crech.max.-Niech.min; Crech.max.-Niech.max.), fig.2.5.

În conformitate cu diagrama Schäßler [111-112], microstructura acestui oțel, în stare de livrare, este formată din cca. 88 % austenită și 12 % ferită  $\delta$ .

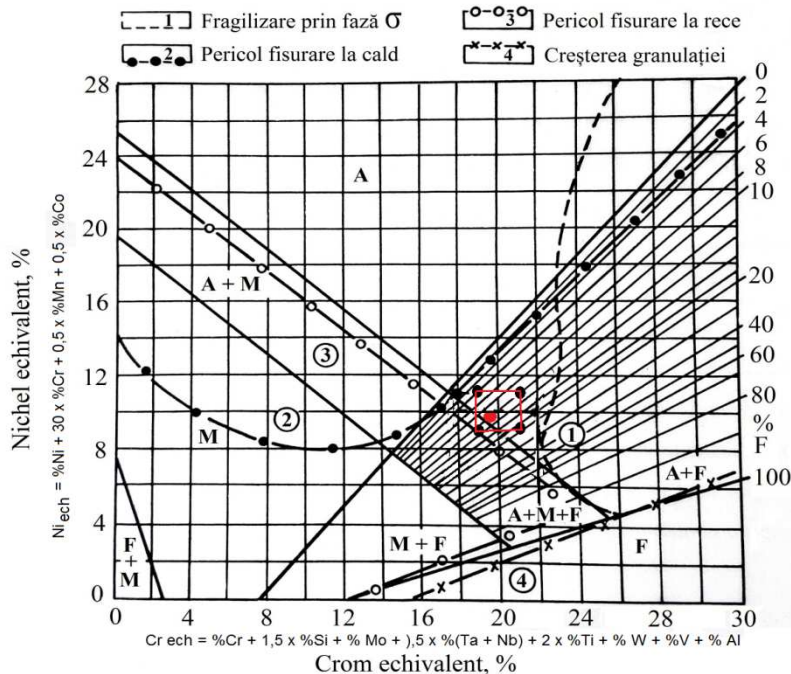


Fig.2.5 Poziționarea oțelului cercetat pe diagrama Schaeffler

## 2.5. Stațiuni și metode utilizate în laboratoare pentru cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

### 2.5.1. Stațiuni

În laborator, cercetarea comportării materialelor la eroziunea cavitației se face pe una dintre instalațiile:

1. **tunele hidrodinamice**, construite după modelul lui Knap [89] și folosite cu precădere la studiul curgerii cavitaționale și mai puțin la studiul distrugerii prin eroziune. Motivul, pentru care nu sunt folosite frecvent pentru cercetarea eroziunii, îl reprezintă durata foarte mare de creare a unei eroziunii semnificative, de ordinul sutelor și miilor de ore, în cazul oțelurilor inoxidabile, de tip Stelite [15]. Cel mai des sunt folosite la materiale cu slabă rezistență la cavitație cum sunt metalele monofazice (aluminiu, plumb, cupru) și aliaje ale acestora cu slabe caracteristici mecanice (duritate, rezistență mecanică la rupere și limită de curgere). Cele mai cunoscute laboratoare sunt cele din [146]: Institute of Water Problems of the Bulgarian, Academy of Sciences, Sofia, **Bulgaria**, China Ship Scientific Research Centre, Wuxi, **China**, Hiroshima University, Higashi Hiroshima, **Japonia**, University of Hannover, Hannover, **Germania**, United Power Plants Co. Peitz, Hohenwarte II Pumped Storage Power Plant, Hohenwarte, **Germania**, The City University, London, **Anglia**;

2. **aparate cu disc rotitor imersat în lichid**, care modelează cel mai bine curgerea cavitațională din rotoarele mașinilor hidraulice și care au o intensitate de erodare prin cavitație mai mare decât tunele hidrodinamice, de ordinul zecilor și

sutelor de ore, funcție de tipul materialului. Sunt folosite atât pentru studiul curgerii cavitaționale, cât și pentru evaluarea distrugerii generate de eroziunea cavitației. Cele mai cunoscute laboratoare sunt cele din [146]: China Ship Scientific Research Centre, Wuxi, **China**, SIGMA Research Institute, Olomouc, **Cehia**, KSB AG, Frankenthal, **Germania**, Institute of Fluid-Flow Machinery of the Polish Academy of Sciences, Gdansk, **Polonia**;

**3. aparate vibratorii**, care sunt sisteme acustice, respectiv ultraacustice, deschise, cu aplicații tehnologice active, care folosesc energia sonoră, respectiv ultrasonoră, pentru producerea de modificări în structura mediului prin care se propagă [1, 2, 15, 40, 48, 63, 80-81]. Au cea mai mare intensitate de distrugere prin cavitație, motiv pentru care sunt folosite cu precădere spre analiza influenței efectului generat de diverse tehnologii de elaborare și tratament asupra caracteristicilor mecanice și structurale ale materialelor, ce le determină un anumit comportament și o anumită rezistență la eroziunea prin cavitație. Motivul folosirii cu precădere în acest scop, îl constituie durata necesară producerii de distrugere semnificativă, de ordinul zecilor de ore pentru cele mai rezistente suprafețe, permit utilizarea oricărui tip de lichid, spațiul ocupat foarte redus și pentru că rezultatele obținute sunt acoperitoare pentru situațiile reale. Diferența substanțială dintre hidrodinamica cavitației produsă prin vibrație și cea produsă la curgerea fluidului, face ca aceste aparate să nu fie utilizate în modelarea hidrodinamicii cavitației, datorită imposibilității utilizării unor relații de similitudine, între cele două procese.

Cele mai cunoscute laboratoare sunt cele din [146]: Institute of Water Problems, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, **Bulgaria**, China Ship Scientific Research Centre, Wuxi, **China**, Tsinghua University, Beijing, **China**, Technical University of Ostrava, Ostrava, **Czech Republic**, CISE S.p.A., Milan, **Italia**, Hiroshima University, Higashi Hiroshima, **Japonia**, Institute of Fluid-Flow Machinery of the Polish Academy of Sciences, Gdańsk, **Polonia**, University of Cape Town, Rondebosch, **Africa de sud**, University of Hull, Hull, **Marea Britanie**. Aceste aparate se diferențiază între ele prin parametrii funcționali și tipul probei folosite la testele de cavitație, care poate fi de tip vibrator sau staționar.

**Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice**, aflat în dotarea **Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara** [78], folosit pentru cercetările derulate în prezenta teză, a fost construit în anul 2012 de colectivul coordonat de prof. dr. ing. Ilare Bordeasu, coordonator al acestei teze de doctorat și respectă întru-totul cerințele de funcționare impuse de normele standardului ASTM G32-2010 [146] (puterea generatorului electronic de ultrasunete de 500 W, amplitudinea dublă a vibrațiilor de 50  $\mu\text{m}$ , frecvența vibrațiilor de 20000  $\pm$  1% HZ, diametrul probei cilindrice de 15,8 mm, mediul de lucru obișnuit este apa). Caracteristic acestui aparat, spre deosebire aparatele menționate mai sus, îl reprezintă modul de control și menținere constantă a parametrilor acustici și electrici, cu ajutorul calculatorului, pe baza unui soft realizat în acest scop. De asemenea, temperatura mediului lichid este menținută la valoarea prescrisă printr-un sistem de răcire. Aparatul a fost construit folosind ca model aparatul vibrator de la Universitatea din Michigan (Marea Britanie), prezentat în fig.2.6, recomandat de normele ASTM G32-1010.

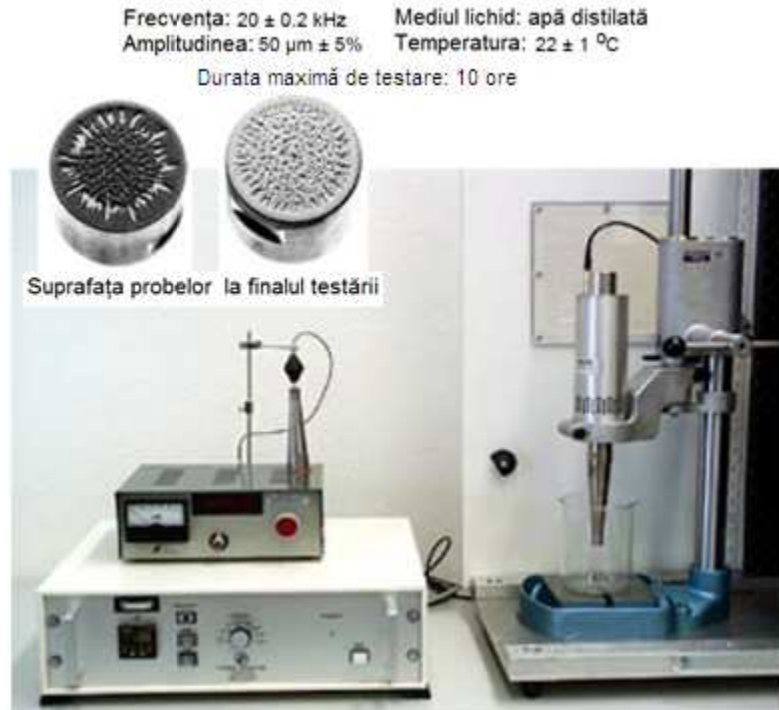


Fig.2.6 Aparatul vibrator model, de la Universitatea din Michigan (Anglia)[158]

În fig.2.7 este prezentată o imagine cu aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație, din cadrul Universității Politehnice din Timișoara. În aceeași figură este prezentată și o secțiune prin proba folosită în testele de cavitație, cu indicarea principalelor cote dimensionale.

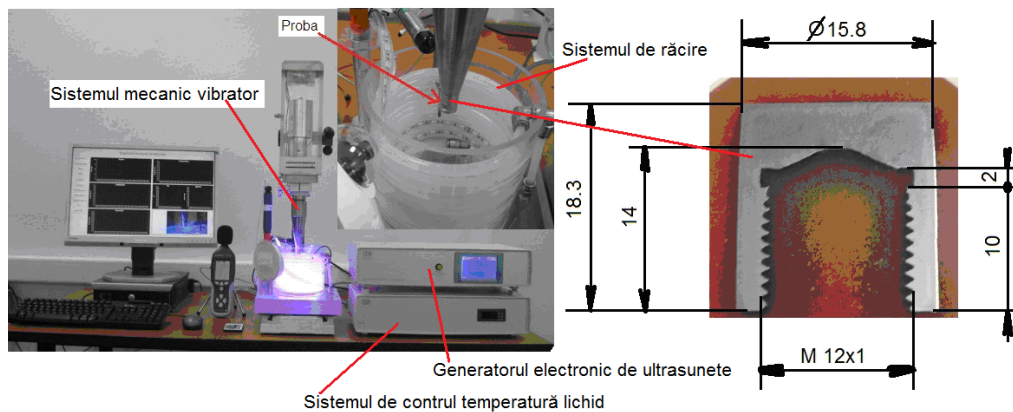


Fig.2.7 Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice

Metoda de testare, utilizată în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnice din Timișoara, folosită în cercetarea experimentală dezvoltată în teză, constă într-o succesiune de etape, după ce proba a luat forma

finală (vezi fig.2.7) în urma operațiilor de prelucrare mecanică și ajustare la frecvența de vibrație. Acestea sunt:

- 1- înainte de începerea programului experimental de testare la cavitație, se spală succesiv în apă sub presiune, la rețeaua de apă potabilă și în alcool (acetonă) și se usucă în curent de aer cald;
  - 2- se cântărește la balanța analitică Zatkłady, ce permite citirea cu o precizie de  $10^{-5}$  grame și se notează masa inițială;
  - 3- se montează în sonotroda sistemului vibrator și se pornește aparatul vibrator, cu prima durată a atacului cavitației);
  - 4- Se imersează în apa distilată circa 8-10 mm;
- Precizare:** durata totală a testului de cavitație, conform cutumei laboratorului și în conformitate cu cerințele ASTM G 32-2010, izvorâtă din cei peste 70 ani de experiență, este de 165 minute divizată în 12 perioade intermediare (câte una de 5 și 10 minute și 10 a câte 15 minute fiecare);
- 5- la terminarea perioadei de testare se parcurg etapele de spălare, uscare și cântărire;
  - 6- se fotografiază suprafața probei expusă cavitației, cu scop de urmărire a evoluției ariei de extindere a eroziunii și, eventual, se analizează și prin microscopie optică și electronică;
  - 7- se reia procedura de testare cu respectarea etapelor 3, 4, 5 și 6.

Pe baza maselor măsurate la final de fiecare perioadă intermediară de testare se calculează pierderile de material, datorate eroziunii cavitației și se fac calculele specifice, necesare construirii curbelor caracteristice de cavitației și determinării parametrilor specifici eroziunii, conform subcapitolului 2.5.3.

Păstrarea probelor pe perioade de pauză se face în exsicatoare pentru a împiedica influența mediului exterior prin acțiunea corozivă, care poate afecta rezultatele cercetării.

## 2.5.2. Metode de ordonare și evaluare a comportării materialelor la eroziunea cavitațională

În conformitate cu recomandările din ASTM G32-2010, dar și funcție de scopul urmărit prin testele de cavitație [40, 66-67, 84-86, 91, 97, 124, 140,], pentru aprecierea comportării evaluarea rezistenței materialului testat la eroziune cavitațională se folosește unul sau mai mulți dintre parametrii, definiți analitic sau pe baza curbelor caracteristice, construite pentru: masa erodată și viteza acesteia, sau pentru volumul erodată și viteza acestuia, sau pentru adâncimea medie de eroziune și viteza acesteia. În fig.2.8 sunt prezentate aceste curbe, calitativ pentru volumul erodată,  $V$ , respectiv viteza de eroziune a acestuia,  $v$ . Prin urmare, parametrii ce pot fi utilizați, luând ca exemplu fig.2.8, dar nu restrictiv la mărimea care se referă, sunt:

1. panta curbelor exprimată prin  $\tan \alpha$ , în zona de stabilizare;
2. valoarea spre care viteza de eroziune tinde să se stabilizeze (finală de palier)  $v_s$ ;
3. viteza maximă a eroziunii  $v_{max}$ ;
4. rezistența normalizată la cavitație  $R_n$ , definită de rapoartele  $R_{n,max} = V_{max}/V_{max,er}$  sau  $R_{n,s} = v_s/v_{e-}$  unde indicele "e" se referă la materialul etalon al laboratorului (în cazul laboratorului utilizat în această cercetare sunt două oțeluri OH12NDL- de referință pentru oțelurile inoxidabile utilizate la echipamentele hidroenergetice, exploatate în regim intens de cavitație

- (palete și rotoare de turbine hidraulice, elice navale, anumite piese din vanele de pe traseul conductelor de aducțiune, cum este cel al inelului de reținere scaun) și oțelul carbon aliat 41Cr4, folosit cu precădere pentru celelalte categorii de oțeluri, folosite cu precădere la piesele mai slab solificate la cavitație din sistemele hidraulice;
5. adâncimea maximă de eroziune, rezultată la finalul atacului cavitației,  $MDE_{max}$ ;
  6. viteza adâncimii maxime de pătrundere a eroziunii  $MDER_{max}$  sau medii spre care tinde să se stabilizeze  $MDER_s$  sau inversul acestora,  $1/MDER_{max}$  respectiv  $1/MDER$ , care sunt considerate a fi rezistența la cavitație  $R_{cav}$ ;
  7. timpul de incubație,  $t_i$ ;
  8. durata necesară obținerii unei pierderi volumice sau masice date;
  9. durata necesară realizării unei anumite adâncimi de pătrundere;
  10. microrelieful suprafețelor erodate cavitațional, exprimat prin unul dintre parametrii rugozității:  $R_a$ ,  $R_z$  sau  $R_t$ , ce se pot determina pe baza profilogramelor rugozității înregistrate pe suprafața cavitată la final de atac.

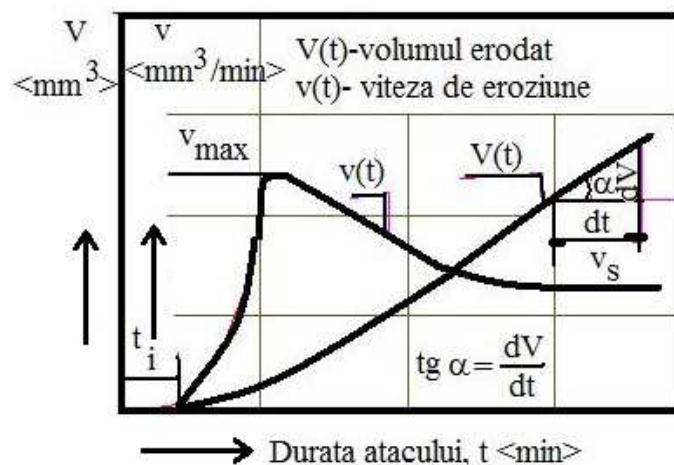


Fig.2.8 Curbele și mărimile caracteristice utilizate în estimarea comportamentului și a rezistenței la eroziune cavitațională

Actualmente, majoritatea cercetătorilor utilizează parametrii 1 și 2, iar pentru analiza cauzelor distrugerii sub anumite forme se folosesc rezultatele oferite de investigațiile microstructurilor cu ajutorul microscopelor optice și electronice cu baleiaj. Normele ASTM [158] recomandă parametrii 2, 3, 4, 5 și 6. Pentru maximul vitezei de eroziune cavitațională normele ASTM recomandă acea valoare după care viteza devine descrescătoare, conform curbei model oferite de Thiruvengadam [151].

Cercetările realizate în ultimii 15 ani, în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, au dus la concluzia că utilizarea parametrilor MDE și MDER, respectiv inversului acestuia  $1/MDER$ , sunt mai sugestive în evaluarea rezistenței și descrierea comportării la cavitație, motiv pentru care se folosesc în cadrul capitolelor 4, 5 și 6, de rezultate ale cercetării experimentale.



### 2.5.3. Metoda construirii curbelor specifice eroziunii prin cavitație și de determinare a parametrilor caracteristici

La finalul fiecărei perioade intermediare de testare, "i", se determină pierderea de masă corespunzătoare  $\Delta m_i$ .

Masa erodată va fi determinată cu relația:

$$m_i = \sum_{i=1}^{12} \Delta m_i \quad (2.1)$$

Pe baza pierderilor masice s-au determinat valorile experimentale pentru adâncimile medii de pătrundere a eroziunii MDE și ale vitezei medii de pătrundere a eroziunii MDER, cu relațiile:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii, pentru perioada "i"

$$\Delta MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{4 \cdot \Delta m_i}{\rho \cdot \pi \cdot d_p^2} \right) \quad (2.2)$$

- pentru adâncimea medie cumulată

$$MDE_i = \sum_{i=1}^{12} \Delta MDE_i \quad (2.3)$$

- pentru viteza adâncimii medie de pătrundere a eroziunii, pentru perioada "i"

$$MDER_i = \Delta MDE_i / \Delta t_i \quad (2.4)$$

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 minute, 10 minute sau 15 minute)

$d_p$  - diametrul suprafeței probei, supusă atacului cavitației ( $d_p = 15,8$  mm),

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

Pentru construirea curbelor caracteristice eroziunii cavitației, care mediază/aproximează valorile experimentale, s-au folosit relațiile construite statistic de Bordeășu și colaboratorii în 2004 [14, 16], a căror formă analitică este:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii

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

- pentru viteza adâncimii medii de pătrundere a eroziunii

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-Bt}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-Bt} \quad (2.6)$$

unde:

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

B - este parametrul de formă a curbei

Curbele de mediere/aproximare au o importanță foarte mare, deoarece forma evoluției lor cu durata atacului cavitației și dispersia punctelor experimentale față de acestea, duc la aprecieri corecte despre evoluția comportării și rezistenței pe care materialul o are pe durata atacului cavitației. Importanța acestor curbe este dată și de faptul că ele stau la baza stabilirii valorilor parametrilor caracteristici 1...9 de la subcapitolul 2.5.2.

## 2.6. Metode și aparate de investigare a suprafețelor erodate de cavitație

Laboratoarele de Cavitație și de Ingineria Materialelor ale Universității Politehnica Timișoara dispun de aparate fotografice de mare rezoluție, microscopie optice și electronice de mare performanță, de ultimă generație pentru investigarea micro și macrografică a distrugerilor produse în suprafețele probelor atacate prin cavitație. În acest scop au fost utilizate și aparatele pentru pregătirea și analiza metalografică.

În figurile de mai jos sunt prezentate imagini ale acestor aparate folosite în cadrul programului doctoral de cercetare experimentală.

Figura 2.9 prezintă balanța analitică Zatkłady care servește la determinarea masei de material ce se pierde prin eroziunea cavitației. Precizia ridicată de măsurare ( $10^{-5}$  grame) permite să se facă o evaluare foarte precisă asupra comportării materialului la solicitările mecanice, generate prin impactul dintre suprafața probei și microjeturile și undele de șoc, dezvoltate la implozia bulelor cavitaționale.



Fig.2.9 Balanța analitică Zatkłady  
(foto din Laboratorul de Cavitație)



Fig.2.10 Microscopul optic „Optika”  
(foto din Laboratorul de Cavitație)

Imaginea din fig.2.10 reprezintă microscopul „Optika” cu care, datorită gradului de mărire (4x, 10x, 20x, 40x respectiv 80x), se fac investigații ale degradării realizate la final de fiecare perioadă intermediară de cavitație.

În fig.2.11 este reprezentat microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax cu care s-au realizat toate imaginile structurale și EDX, prezentate în capitolele 4, 5 și 6, pe baza cărora s-a făcut analiza modului de răspuns al constituenților structurali ai oțelului și de modificare a compoziției chimice, din suprafața erodată, la cavitația vibratoare.

Evaluarea adâncimii maxime de pătrundere a eroziunii, MDEmax, într-o secțiune perpendiculară pe suprafața erodată și evidențierea fisurilor și expulzărilor, produse prin șocurile generate la impactul cu microjeturile și undele de șoc (vezi capitolele 4, 5 și 6), sunt realizate cu ajutorul microscopului electronic cu baleiaj tip Philips XL 30 ESEM, fig.2.12.



Fig.2.11 Microscopul electronic cu baleiaj TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax (Foto din laboratorul de ingineria Materialelor)



Fig.2.12 Microscopul electronic cu baleiaj Philips XL 30 ESEM (foto din laboratorul de Ingineria Materialelor)

Fig.2.13 prezintă microscopul Olympus SYX7, din cadrul Laboratorului de Ingineria Materialelor, folosit la examinările macro- și micrografice, de la finalul testului de cavitație (165 minute).



Fig.2.13 Microscopul OPLIMPUS SYX7 (foto din laboratorul de Ingineria Materialelor)



Fig.2.14 Aparatul de tăiat cu pânză BUEHLER 4000 (foto din laboratorul de Ingineria Materialelor)

Aparatul de tăiat cu pânză și lichid de răcire de tip Buehler 4000, fig.2.14, a servit la tăierea probelor cavitate, perpendicular pe suprafața atacată, în lungul axei cilindricului, în vederea pregătirii pentru atacul metalografic, după înglobarea în rășină și șlefure.

Înglobarea la cald, în rășina polimerică, a probelor secționare s-a realizat cu ajutorul aparatului tip Buehler Simplimet 1000, prezentat în fig.2.15.

Șlefuirea și lustruirea probelor secționare, după înglobare în rășină a fost făcută pe aparatul Buehler Phoenix Beta din fig.2.12, care este echipat cu un cap de șlefuire/lustruire Buehler Vector.



Fig.2.15 Aparatul de înglobat la cald BUEHLER SIMPLIMET 1000  
(foto din laboratorul de Ingineria Materialelor)



Fig.2.16 Aparatul de șlefuit și lustruit Buehler Phoenix Beta  
(foto din laboratorul de Ingineria Materialelor)

În capitolele următoare vor mai fi prezentate și alte aparate și instalații, care au fost utilizate pentru aplicarea tehnologiilor de tratament, ele fiind aparținătoare altor instituții, decât Universității Politehnica Timișoara (UPT), ca urmare a bunei colaborări dintre instituția UPT și acestea.

## 2.7. Concluzii

**1.** Oțelurile cu structuri preponderent austenitice, prin elementele chimice de îmbinare și tehnologii adecvate de tratament, au capacitatea necesară de a-și modifica structura și proprietățile mecanice, astfel încât să asigure creșterea rezistenței la eroziunea produsă de curenții cavitaționali, în care funcționează echipamentele hidroenergetice și nu numai.

**2** Oțelul inoxidabil austenitic X5CrNi18-10, cercetat în cadrul acestei lucrări de doctorat este unul care se pretează la tratamentele termice volumice și termochimice, stabilite prin obiectivele din capitolul 1, în scopul utilizării sale la piese solicitate de cavitație, în special la inelele rețineră scaun de la discurile vanelor fluture, precum și la axurile acestora.

**3.** Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, folosit la testele de cavitație, este unul modern, performant, care prin modul de control al parametrilor funcționali, la valorile indicate de ASTM G32-2010, oferă garanție pentru acuratețea cercetării.

**4.** Aparatura pentru analiză microscopică, aflată în Laboratorul de Ingineria Materialelor al Universității Politehnica Timișoara, utilizată în examinările structurale este una modernă și de înaltă performanță, care asigură derularea experimentului la cel mai înalt nivel științific.

## **3. ANALIZA CURGERII CAVITAȚIONALE PRIN VANELE FLUTURE CU DUBLU EXCENTRIC**

### **3.1. Importanța modelării curgerii prin vanele fluture**

Performanța energetică a unei vane depinde foarte mult de modul în care este proiectată și confecționată [43, 53, 147, 149, 154]. Din acest motiv, proiectantul ia în considerare toți factorii care reduc la minim pierderile hidraulice, volumice și mecanice, în condițiile tranzitării debitului maxim și, pe cât posibil, cu evitarea fenomenului de cavitație [36, 46, 155]. Pe lângă aceste condiții de funcționare hidrodinamică eficientă, constructiv vana trebuie să fie robustă cu elemente componente care să reziste tuturor solicitărilor, dincolo de cele generate de o eventuală funcționare în cavitație (vibrații și zgomote) [123].

Simularea curgerii prin vana fluture, în cadrul acestei teze, are drept obiectiv punerea în evidență a pozițiilor unghiulare ale discului vanei de la care începe să apară și să se dezvolte cavitație, funcție de cât de negativă devine rezerva de presiune. Explicația fizică a apariției cavitației în vana fluture este dată de faptul că, la tranzitarea apei, datorită obturării create de disc, se produce o cădere de presiune semnificativă și în anumite condiții/poziții ale discului apare fenomenul de cavitație, ce se manifestă prin efectele arhicunoscute: reducerea eficienței energetice, încărcări asimetrice, eroziune și deteriorarea suprafețelor, vibrații, zgomote și, în consecință, reducerea duratei de viață a echipamentelor [149, 154, 155].

În cadrul acestui capitol, modelarea curgerii în vană este realizată cu programul SolidWorks Flow Simulation și are drept scop justificarea utilizării tehnologiilor clasice și moderne pentru creșterea rezistenței la eroziunea cavitației a oțelului austenitic X5CrNi18-10 folosit ca material de fabricație și protecție a pieselor din zonele afectate de cavitație. În SolidWorks Flow Simulation modelul cavitațional al vanei este utilizat pentru a estima numeric extinderea fenomenului de cavitație și influență asupra performanțelor, fără însă a lua în considerare fenomene specifice, cum ar fi: generarea bulelor cavitaționale, creșterea și colapsul acestora, fenomene care influențează eroziunea suprafețelor, dar care nu sunt necesare în estimarea performanțelor vanei.

### **3.2. Relații specifice curgerii prin vane**

Discul vanei fiind dispus într-un curent de fluid este supus acțiunii forțelor hidrodinamice dezvoltate pe acesta, care determină un moment hidraulic, ca în fig.3.1.

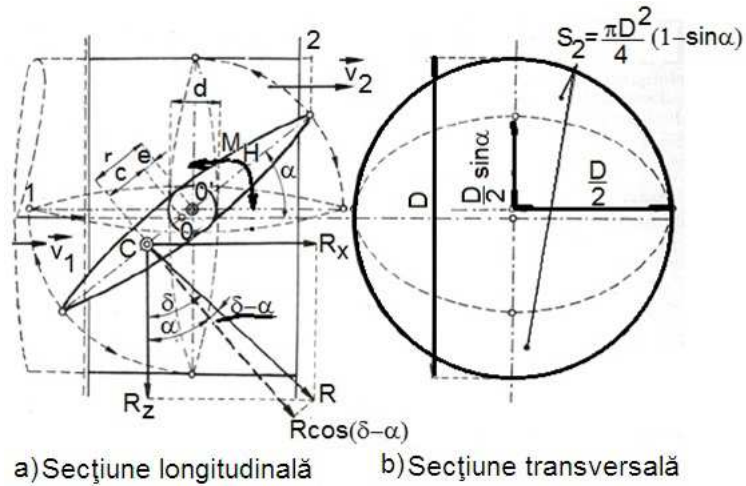


Fig.3.1 Schema de calcul a forțelor și momentelor hidraulice pe discul vanei fluturo (prelucrare din [47])

Conform schemei din fig.3.1, relațiile de determinare a acțiunilor hidrodinamice sunt:

1. Pentru poziția complet închisă ( $\alpha = 90^\circ$ ) singura solicitare este forța hidrostatică, dată de relația:

$$R = \rho \cdot g \cdot H \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.1)$$

2. Forțele hidrodinamice:

- forța portantă

$$R_z = \frac{\rho}{2} \cdot C_z \cdot S \cdot v_1^2 \quad (3.2)$$

- forța de rezistență

$$R_x = \frac{\rho}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot v_1^2 \quad (3.3)$$

- forța rezultantă

$$R = \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_1^2 \cdot \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (3.4)$$

3. pentru momentul hidraulic:

$$M_H = R \cdot (c+e) \cdot \cos(\delta - \alpha) \quad (3.5)$$

Semnificațiile fizice ale mărimilor din relațiile de mai sus sunt:

$\rho$  - densitatea apei ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$g$  - accelerația gravitațională ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$S$  - aria suprafeței discului, în direcție de curgere, determinată de unghiul  $\alpha$  de deschidere

$C_z$  - coeficientul forței portante

$C_x$  - coeficientul forței de rezistență

$v_1$  – viteza curentului la intrarea în vana fluture (m/s)

Coeficienții  $C_x$  și  $C_z$  se determină conform procedurilor cunoscute (pe baza polarei discului, obținută la încercările pe model, sau prin măsurarea pierderii de sarcină a vanei în natură [2, 47]).

Pe lângă solicitările hidrodinamice, poziția discului determină pierderi locale de sarcină, care se pot evalua pe baza relației:

$$h_r = \zeta \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.6)$$

unde  $\zeta$  - este coeficientul pierderilor locale ce se poate determina din nomograme sau din literatura [75] dacă etanșarea nu este perfectă, atunci apar pierderi de debit, care se pot estima cu relațiile empirice [47]:

$$\Delta Q = (0,04 \cdot D + 0,02 \cdot D^2) \cdot H^{1/2} \quad (3.7)$$

respectiv

$$\Delta Q = 0,43 \cdot D^{4/3} \cdot H^{1/2} \quad (3.8)$$

Relațiile oferite de literatură [133] pentru coeficienții de cavitație al vanei fluture sunt:

Coeficientul de cavitație Thoma:

$$\sigma = \frac{p_{am} - p_v}{\frac{\rho v^2}{2}} \quad (3.9)$$

Coeficientul de cavitație al vanei fluture

$$K_f = \frac{(\Delta p)_C}{p_{am} - p_v} \quad (3.10)$$

Coeficientul de cavitație cu parametrii amonte și aval

$$K_d = \frac{p_{am} - p_v}{p_{av} - p_v} \quad (3.11)$$

Coeficientul de cavitație cu parametrii aval

$$K_M = \frac{(\Delta p)_C}{p_{av} - p_v} \quad (3.12)$$

unde:

$p_{am}$  – presiunea absolut din amonte vanei fluture (măsurată la o distanță de 5x diametrul vanei)

$\Delta p_C$  – căderea de presiune în regim de cavitației

$p_{av}$  – presiunea absolută din avalul vanei fluture (măsurată la o distanță de 10 x diametrul vanei)

$v$  - viteza curentului de fluid la intrarea în vană (m/s)

Mărimile de mai sus servesc la evaluarea solicitărilor și a eficienței vanei fluture, dar și pentru calculele ulterioare necesare dimensionării sistemului de acționare (rotire a discului).

Prezentarea acestor mărimi a avut drept scop punerea în evidență doar a naturii solicitărilor hidrodinamice, scopul tezei, așa cum s-a menționat în capitolul 1, la obiective, fiind de evidențiere a funcționării în cavitație, pentru a justifica tehnologiile de crește a rezistenței la eroziunea prin cavitație a oțelului inoxidabil X5CrNi18-10, folosit la executarea scaunului de etanșare și a inelelor de fixare garnitură etanșare și reținere scaun.

### 3.3. Analiza numerică a curgerii

Acest capitol a fost realizat cu sprijinul D-lui prof.univ.dr.ing. Dorian NEDELCU de la Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița.

Simularea curgerii în vana fluture, pe soluția cu disc biplan, a fost realizată prin intermediul modulului Flow Simulation, integrat în interfața aplicației SolidWorks, pentru 2 puncte de funcționare: debit nominal respectiv maxim, vana având dimensiunile din fig.3.2 și caracteristicile din tabelul 3.1. Vana a fost încadrată într-o tubulatură amonte și o tubulatură aval, cu diametrul egal cu 2,94 m.

Pentru simplificarea simulării numerice s-a utilizat simetria domeniului computațional pe direcția Z, ceea ce a redus semnificativ timpul de calcul al simulărilor numerice și resursele sistemului de calcul, fără a afecta precizia rezultatelor, fig.3.3. Parametrii simulării numerice sunt prezentați în tabelul 3.2, iar discretizarea domeniului computațional și a discului vanei sunt prezentați în fig.3.4 respectiv fig.3.5.

Simularea a fost realizată pentru 17 poziții ale discului vanei, cuprinse între  $0^\circ \div 80^\circ$ , cu pas de 5 grade, poziții definite de unghiul dintre planul ZX, fig.3.3 și planul inferior al discului vanei, fig.3.6. Figurile 3.6÷3.11 prezintă poziția discului vanei la unghiurile  $0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 80^\circ$ .

Etapetele simulării numerice sunt următoarele:

- Creare geometrie;
- Activare modul Flow Simulation;
- Creare proiect de simulare a curgerii;
- Definire tip analiză și volum de control;
- Specificare condiții de frontieră;
- Specificare criteriu de convergență;
- Calcul studiu de curgere, pentru debitul nominal de  $61 \text{ m}^3/\text{s}$  și cel maxim de  $84,18 \text{ m}^3/\text{s}$ ;
- Vizualizare rezultate.

Tabelul 3.3 prezintă distribuția presiunilor obținute din SolidWorks Flow Simulation pentru debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ , iar fig.3.12 prezintă presiunile pe disc vană Amonte/Aval funcție de unghiul de deschidere al discului pentru acest debit.

Tabelul 3.4 prezintă viteze și coeficienți de cavitație obținuți din SolidWorks Flow Simulation pentru debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ , iar fig.3.13 prezintă variația coeficienților de cavitație funcție de unghiul de deschidere al discului pentru acest debit. Figurile 3.14÷3.30, 3.31÷3.47, 3.48÷3.64, prezintă distribuția presiuni, vitezei, respectiv a liniilor de curent pentru cele 17 poziții ale discului vanei la unghiurile  $0^\circ \div 80^\circ$ , cu pas de 5 grade, iar fig.3.65 prezintă distribuția



tridimensională a traiectoriilor de curgere pentru unghiul 80°, pentru debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ .

La calculul coeficienților de cavitație s-a admis temperatura apei de 20 °C, iar presiunea de vaporizare egală cu  $P_v=2380 \text{ Pa}$ .

Coeficientul de cavitație al instalației, al vanei respectiv rezerva de cavitație, tabelul nr.3.4, s-au calculat prin relațiile:

$$\sigma_{\text{instalatie}} = \frac{(P_{\text{int}} - P_v)}{\frac{\rho V_{\text{int}}^2}{2}} \quad (3.13)$$

$$\sigma_{\text{vana}} = -C_{p \text{ min}} = \frac{(P_{\text{min}} - P_{\text{int}})}{\left(\frac{\rho V_{\text{int}}^2}{2}\right)} \quad (3.14)$$

$$\sigma_{\text{rezerva}} = \sigma_{\text{instalatie}} - \sigma_{\text{vana}} \quad (3.15)$$

unde:

$P_{\text{int}}$  - este presiunea la intrare în domeniu computațional, tabel 3.2;

$V_{\text{int}}$  - este viteza la intrare în domeniu computațional, tabel nr.3.3;

$P_{\text{min}}$  - este presiunea minimă pe disc; pentru calcul s-a considerat ca referință presiunea de pe planul inferior al discului.

Din tabelul 3.4 și fig.3.12 rezultă că incipiența cavitațională, corespunzătoare lui  $\sigma_{\text{rezerva}} = 0$ , la debitul nominal se produce pentru poziția unghiulară a discului cuprinsă între 35° ÷ 40°.

Din fig.3.30÷3.46, care prezintă distribuția vitezei rezultă creșterea acesteia simultan cu creșterea unghiului discului. Din fig.3.47÷3.63, care prezintă traiectoriile de curgere, rezultă concluzia că regimul turbulent se intensifică pe măsura creșterii unghiului discului.

Tabel 3.1. Caracteristici vană

Tip vană	Vană fluture cu disc biplan		
Axa fusurilor	Orizontală		
Diametru corp vană	D	m	2.94
Lungime corp vană	$L_{CV}$	m	1.7
Arie secțiune intrare/ieșire	Aria	m <sup>2</sup>	6.788668
Debit volumic maxim	$Q_{\text{max}}$	m <sup>3</sup> /s	84.18
Debit volumic nominal	$Q_n$	m <sup>3</sup> /s	61
Debit masic maxim	$Q_{\text{max}}$	kg/s	84179
Debit masic nominal	$Q_n \text{ masic}$	kg/s	61098
Viteza la intrare la debit nominal	$V_n$	m/s	9
Viteza la intrare la debit maxim	$V_{\text{max}}$	m/s	12.4
Lungime Tronson Amonte	$L_{TAm}$	m	4
Lungime Tronson Aval	$L_{TAv}$	m	5.2
Diametru Tronson Amonte / Aval	$D_{TAm} / D_{TAv}$	m	2.94
Dimensiuni principale vană	Figura 3.1		

Tabel 3.2 Parametrii simulării numerice în SolidWorks Flow Simulation

Tip simulare	3D			
Computational domain	Simetric pe direcția Z			
	Lungime pe direcția X	m	10.9	
Punct de funcționare ( varianta de simulare )			$Q_n/2$	$Q_{max}/2$
Condiții de frontieră - Intrare	SemiDebit masic (Inlet Mass Flow)	kg/s	30549	42090
Condiții de frontieră - Ieșire	Presiune statică (Static Pressure)	Pa	101325	

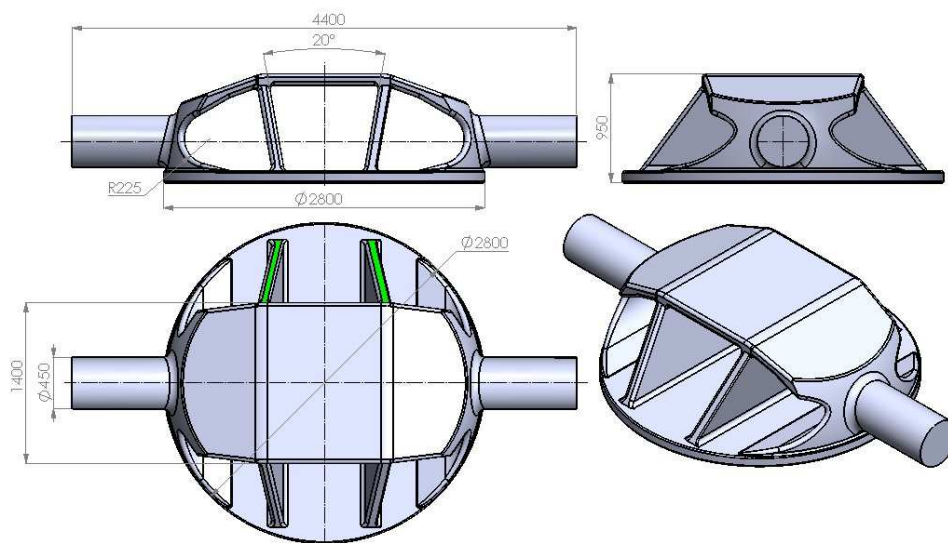


Fig.3.2 Dimensiunile principale ale discului vană

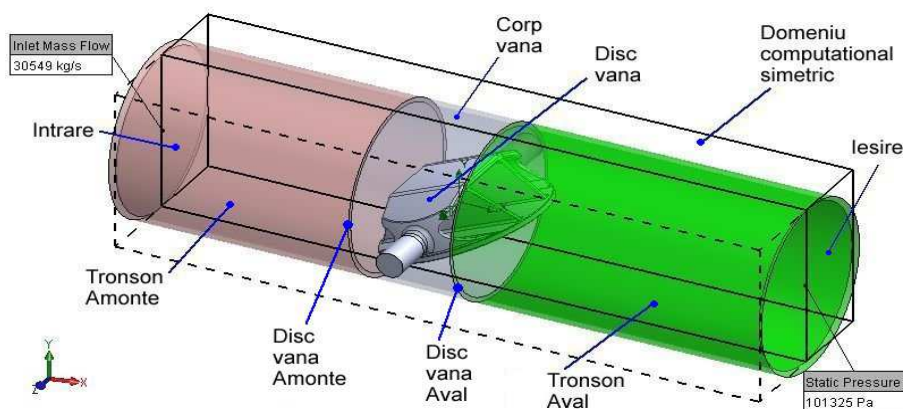


Fig.3.3 Domeniul computațional (de analiză)

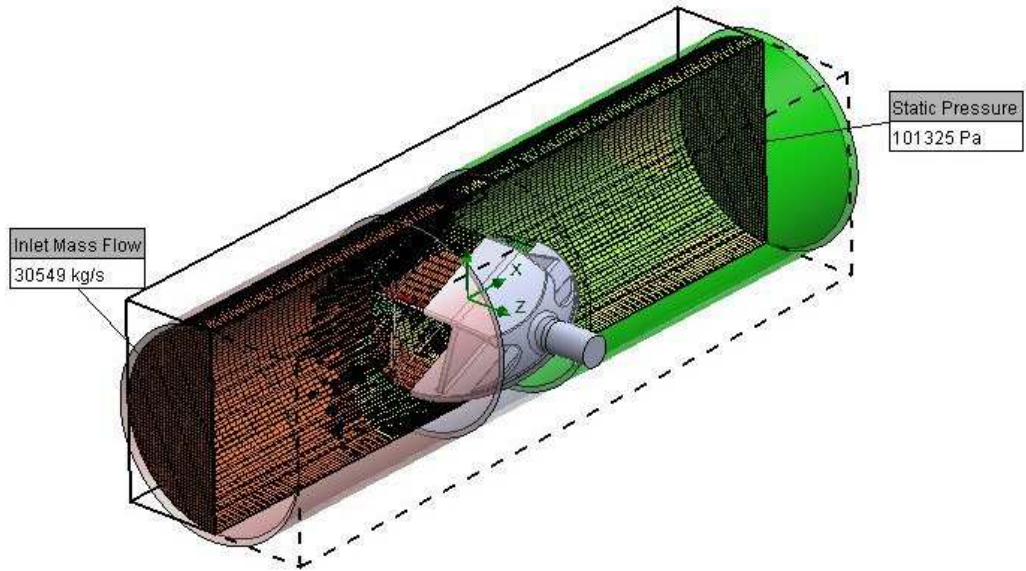


Fig.3.4 Discretizare domeniu computațional

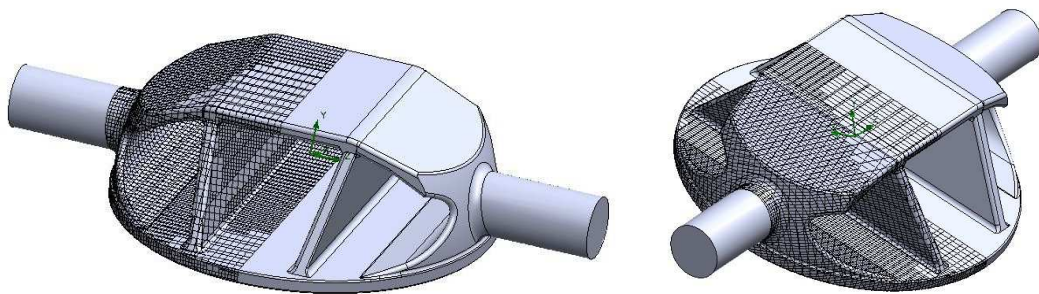


Fig.3.5 Discretizare disc vană

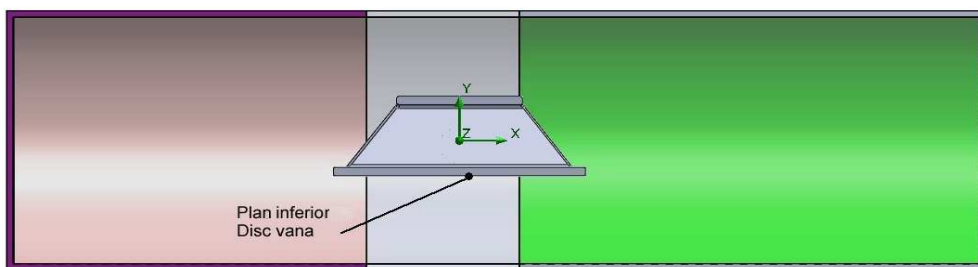


Fig.3.6 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

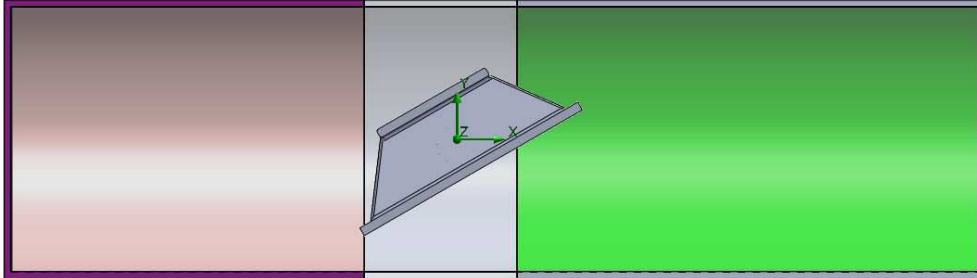


Fig.3.7 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

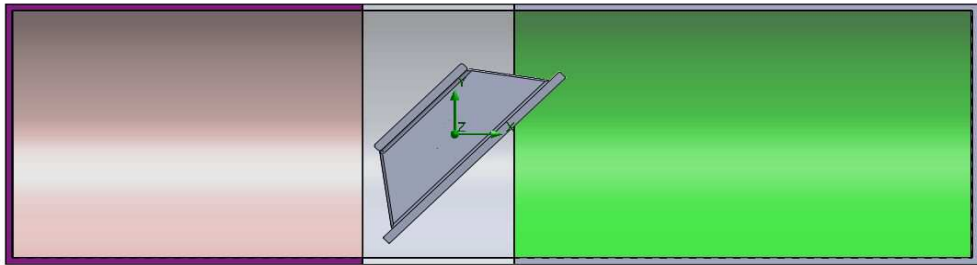


Fig.3.8 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

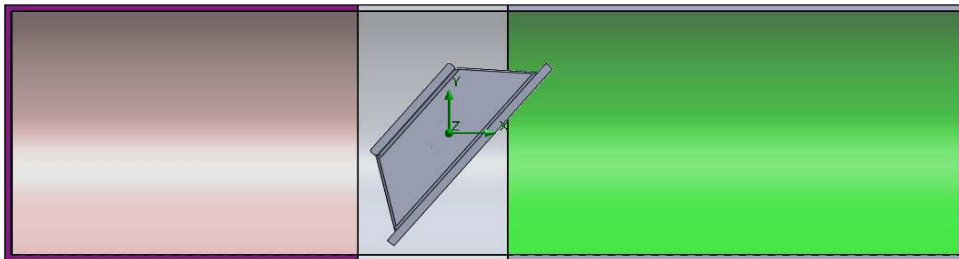


Fig.3.9 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

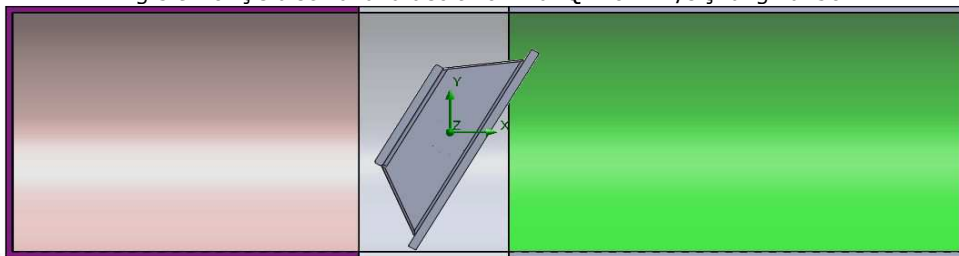
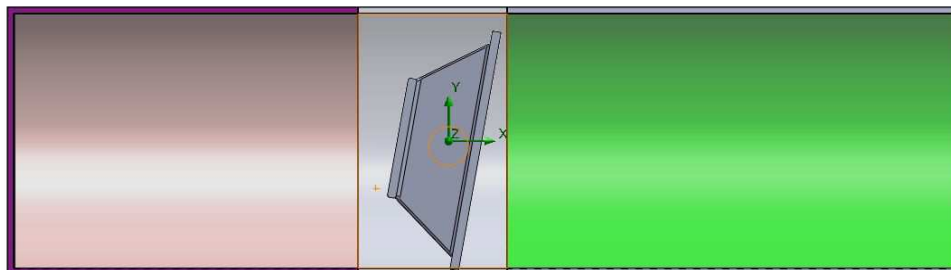
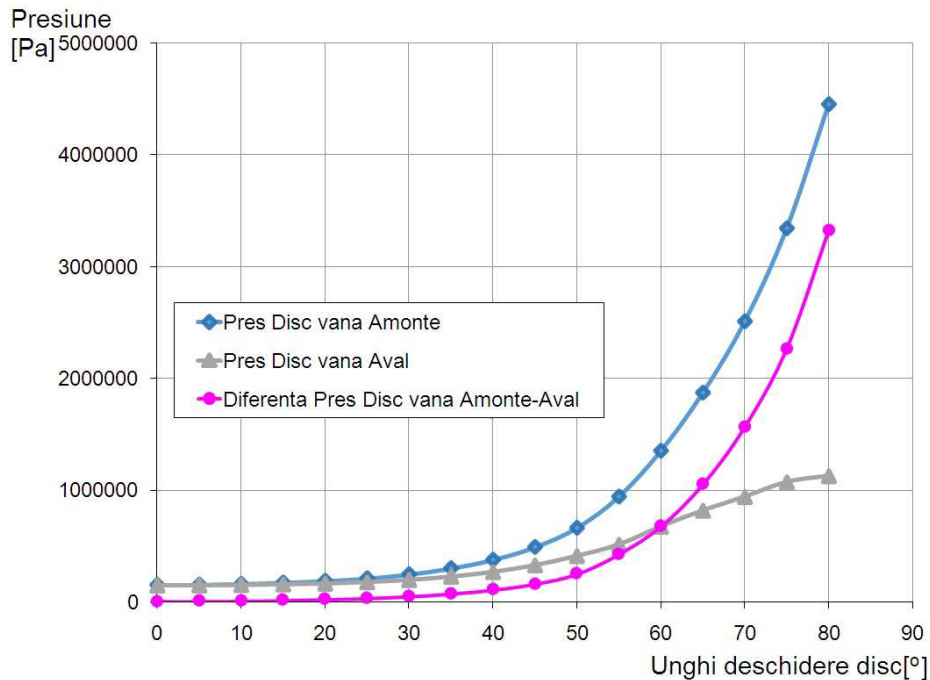


Fig.3.10 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

Fig.3.11 Poziție disc vană la debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$ Tabel 3.3 Distribuția presiunilor obținute din SolidWorks Flow Simulation pentru  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Unghi disc	Presiune Intrare $P_{int}$	Presiune Ieșire	Diferență presiune Intrare - Ieșire	Presiune Disc vană Amonte	Presiune Disc vană Aval	Diferență presiune Disc vană Amonte-Aval	Presiune Placă inferioară Disc vană
grade	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
0	150264	143277	6987	149638	144429	5209	91435
5	152514	143823	8691	151854	145402	6453	80430
10	159118	146302	12816	158492	148667	9825	73510
15	170373	150743	19630	169796	154485	15311	62015
20	186034	154982	31051	185480	161604	23876	50328
25	208599	162567	46031	208072	174005	34067	42031
30	245253	173487	71766	244747	193838	50909	26541
35	299162	189766	109395	298672	223452	75221	9861
40	374916	212972	161944	374419	265071	109348	-5968
45	488972	236579	252393	488474	325668	162806	-31706
50	660685	268832	391853	660184	409175	251010	-59844
55	940003	296747	643257	939499	511439	428060	-105936
60	1349641	340422	1009219	1349135	672535	676601	-151253
65	1869448	366017	1503430	1868939	816418	1052520	-207662
70	2507843	378693	2129150	2507333	939960	1567373	-270136
75	3340469	396579	2943889	3339954	1072295	2267659	-335808
80	4450284	631678	3818606	4449768	1126995	3322773	-286531

Fig.3.12 Presiuni Disc vană Amonte/Aval funcție de unghi deschidere disc  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ Tabel 3.4 Viteze și coeficienții de cavitație obținuți din SolidWorks Flow Simulation pentru debit nominal  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Unghi disc grade	Viteza Intrare $V_{int}$ m/s	Viteza Disc vana Amonte m/s	$\sigma_{\text{Instalație}}$	$C_{pmin}$	$\sigma_{\text{Vana}}$	$\sigma_{\text{Rezervă}}$
0	9.024	9.051	3.632	-1.445	1.445	2.187
5	9.024	9.078	3.688	-1.771	1.771	1.917
10	9.024	9.096	3.850	-2.103	2.103	1.747
15	9.024	9.090	4.126	-2.662	2.662	1.465
20	9.024	9.080	4.511	-3.333	3.333	1.178
25	9.024	9.071	5.065	-4.091	4.091	0.974
30	9.024	9.066	5.966	-5.372	5.372	0.593
35	9.024	9.064	7.290	-7.106	7.106	0.184
40	9.024	9.065	9.150	-9.355	9.355	-0.205
45	9.024	9.063	11.952	-12.789	12.789	-0.837
50	9.024	9.060	16.170	-17.698	17.698	-1.528
55	9.024	9.055	23.030	-25.691	25.691	-2.660
60	9.024	9.050	33.092	-36.865	36.865	-3.774
65	9.024	9.054	45.860	-51.019	51.019	-5.159
70	9.024	9.059	61.540	-68.234	68.234	-6.694
75	9.024	9.065	81.991	-90.298	90.298	-8.307
80	9.024	9.072	109.251	-116.347	116.347	-7.096

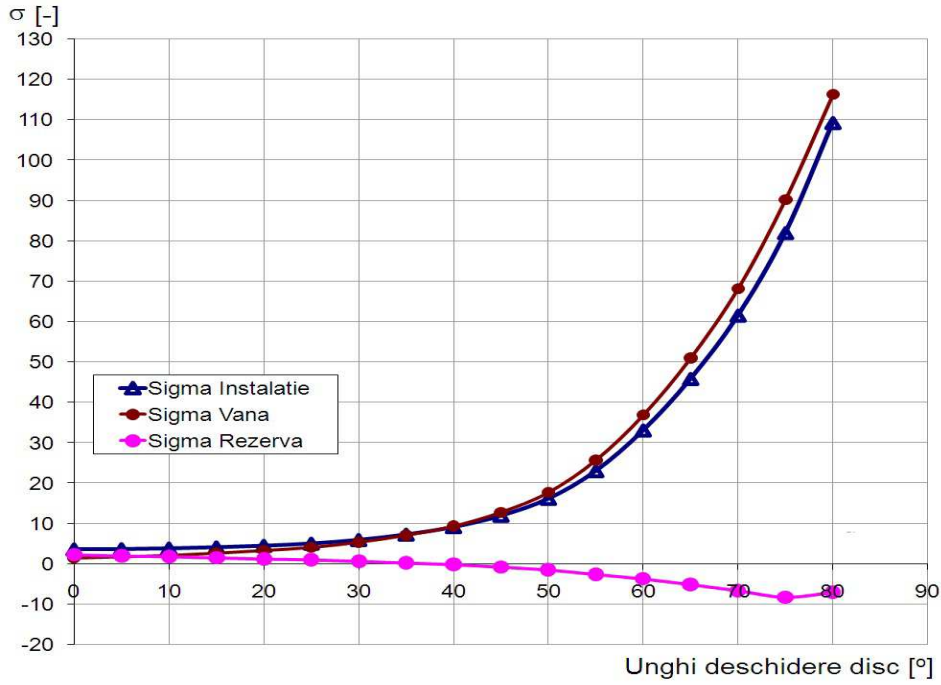


Fig.3.13 Coeficienții de cavitație funcție de unghi deschidere disc ( $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ )

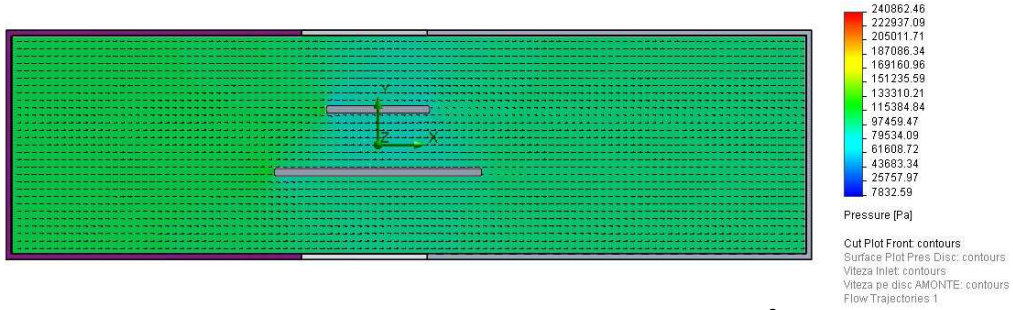


Fig.3.14 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

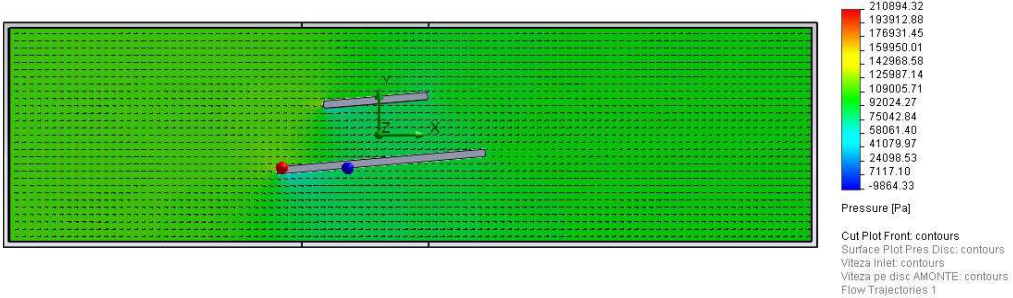


Fig.3.15 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

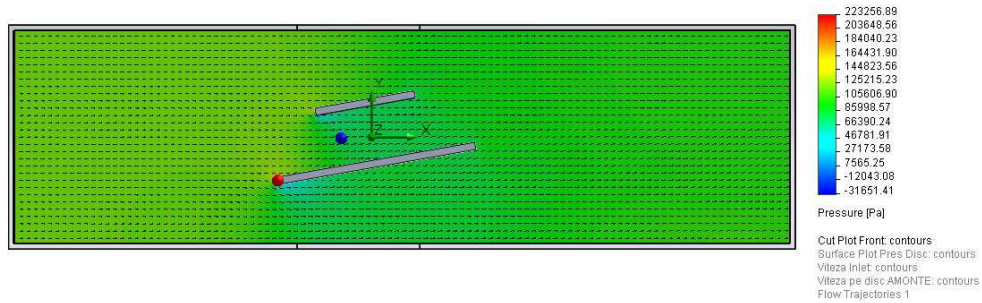


Fig.3.16 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

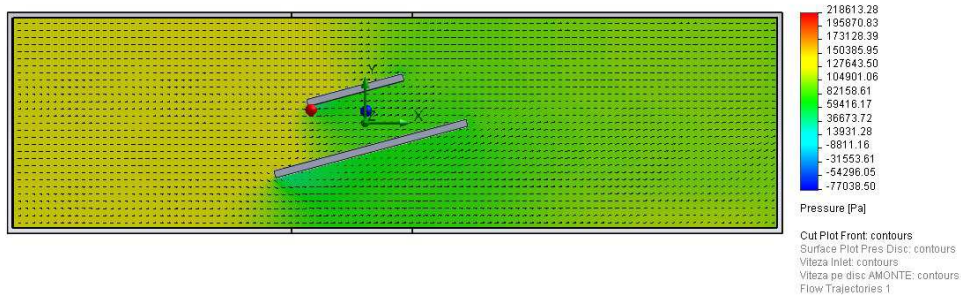


Fig.3.17 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$

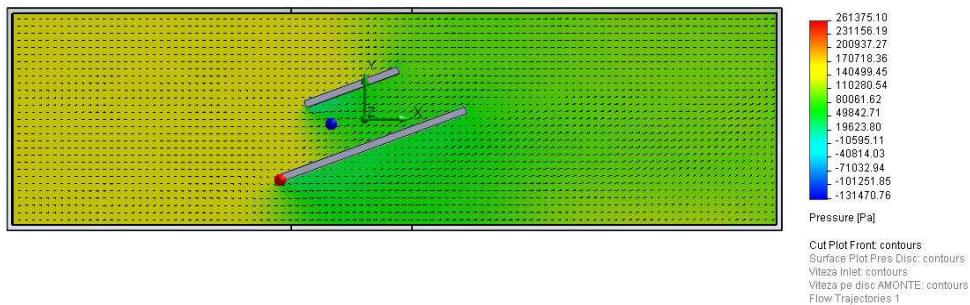


Fig.3.18 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

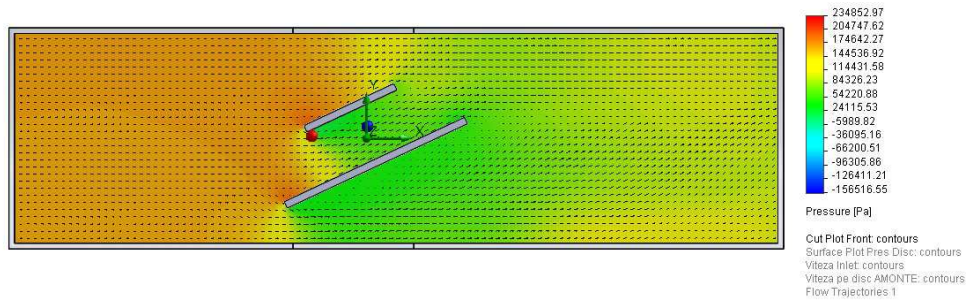


Fig.3.19 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$



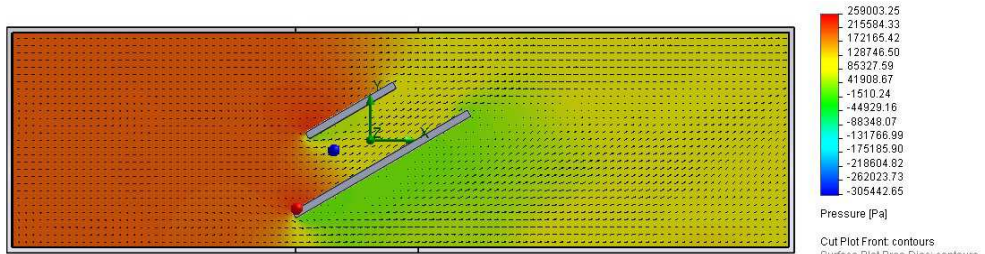


Fig.3.20 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

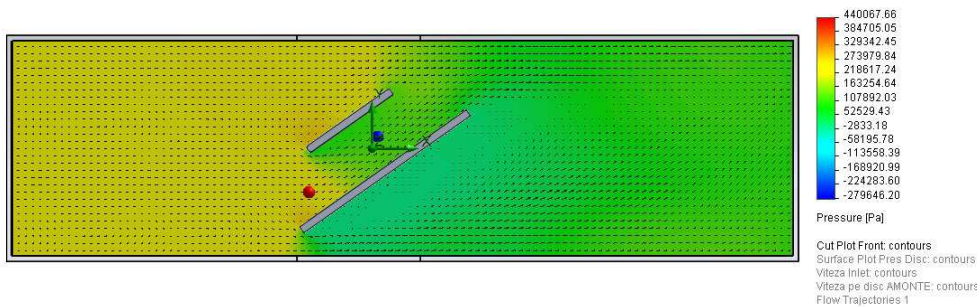


Fig.3.21 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$

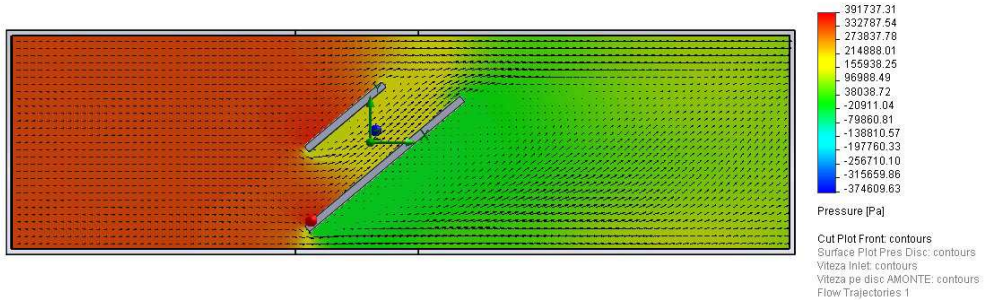


Fig.3.22 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

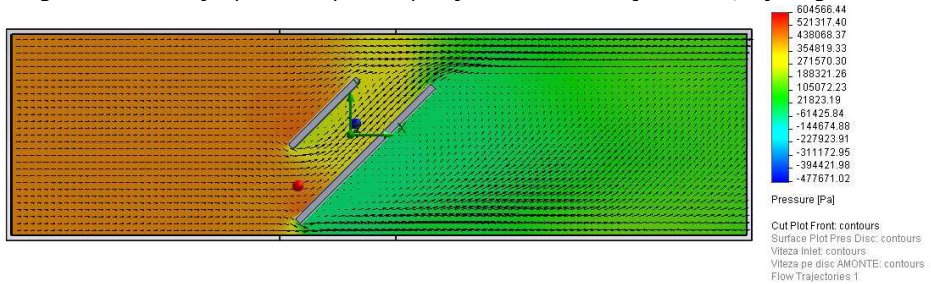


Fig.3.23 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

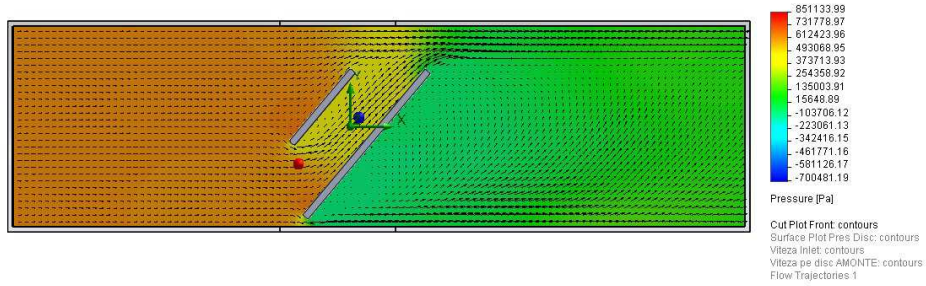


Fig.3.24 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

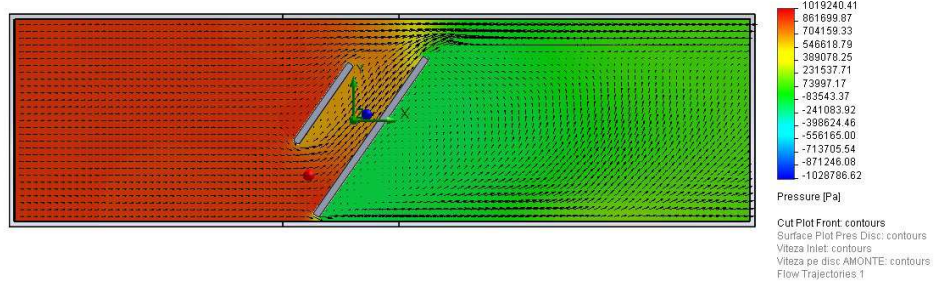


Fig.3.25 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

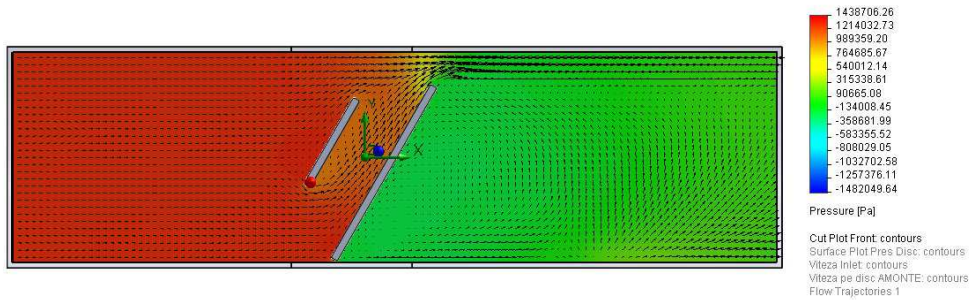


Fig.3.26 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

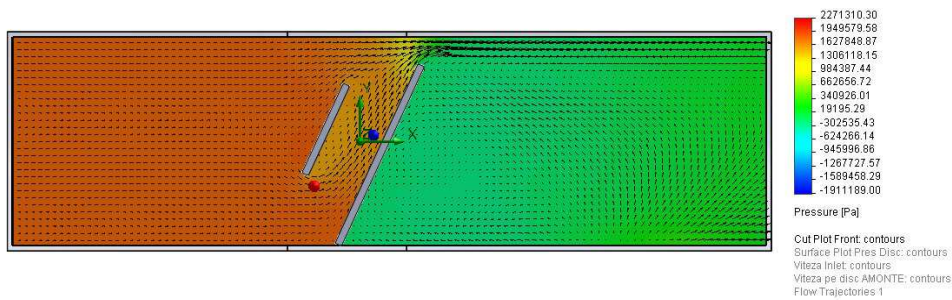


Fig.3.27 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

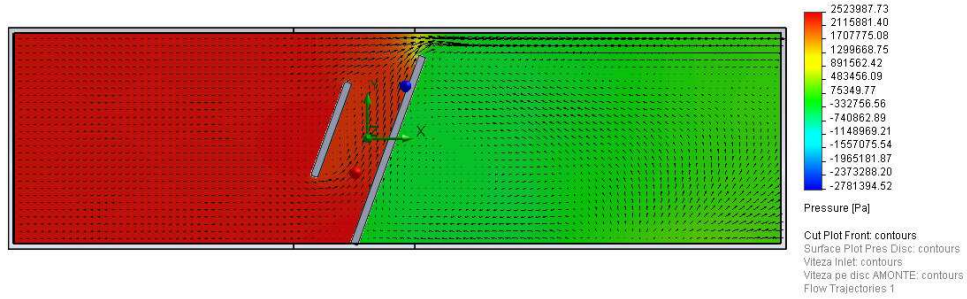


Fig.3.28 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$

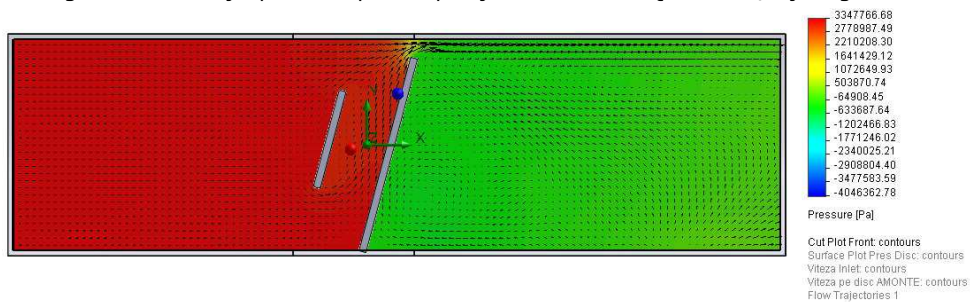


Fig.3.29 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$

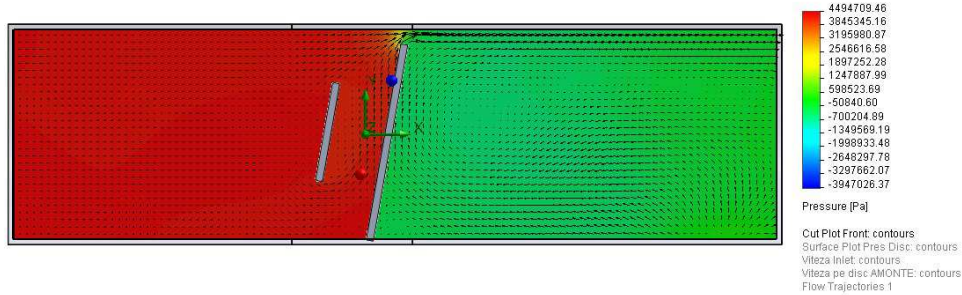


Fig.3.30 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

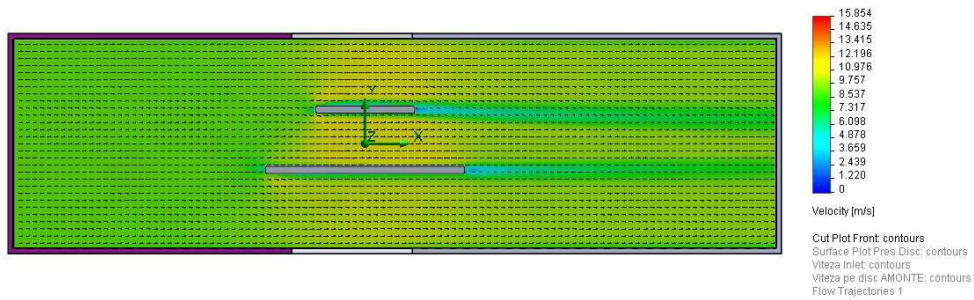


Fig.3.31 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

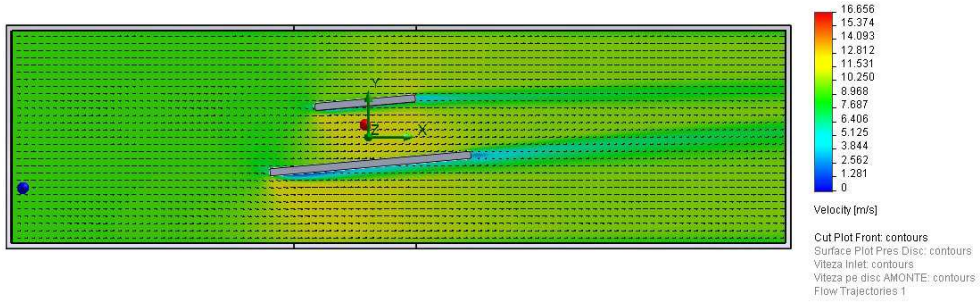


Fig.3.32 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

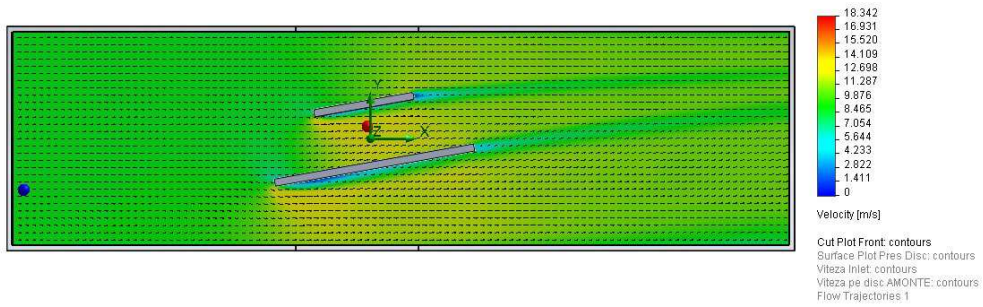


Fig.3.33 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

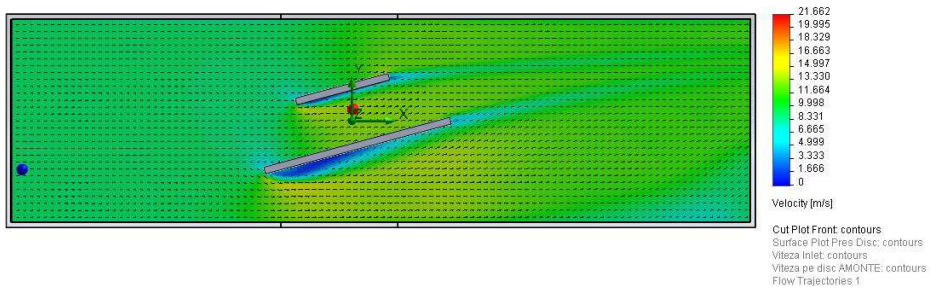


Fig.3.34 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$

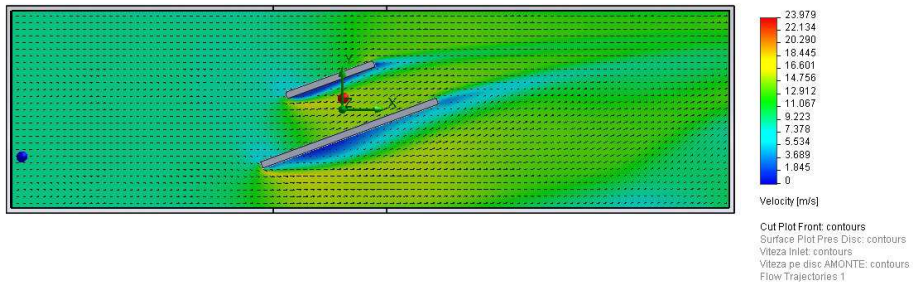


Fig.3.35 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

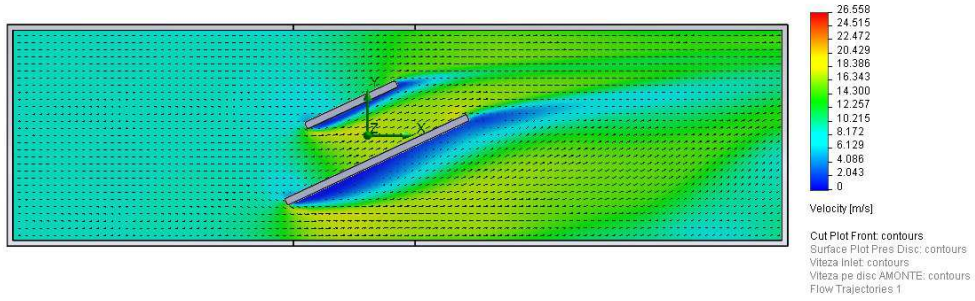


Fig.3.36 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$

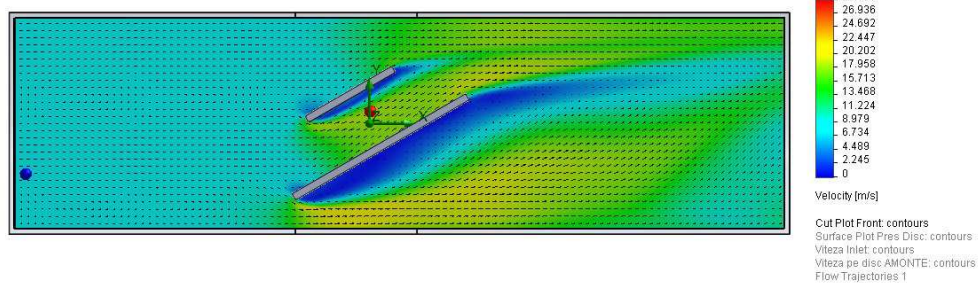


Fig.3.37 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

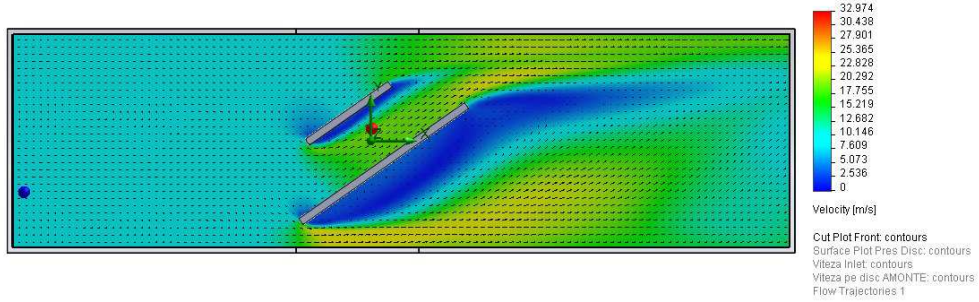


Fig.3.38 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$

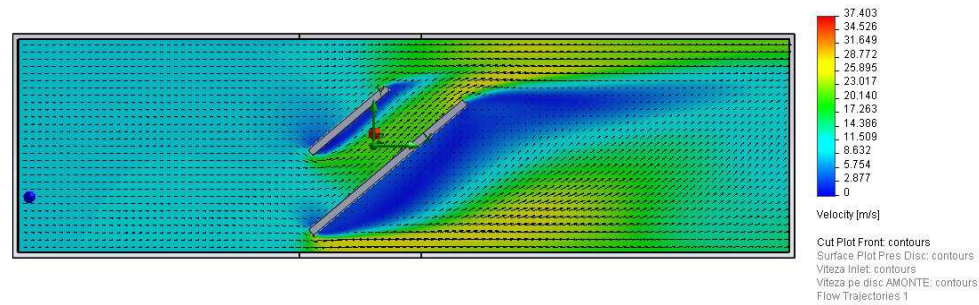


Fig.3.39 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

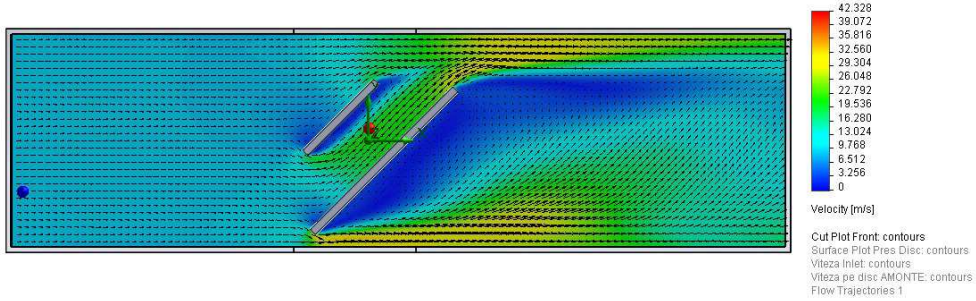


Fig.3.40 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

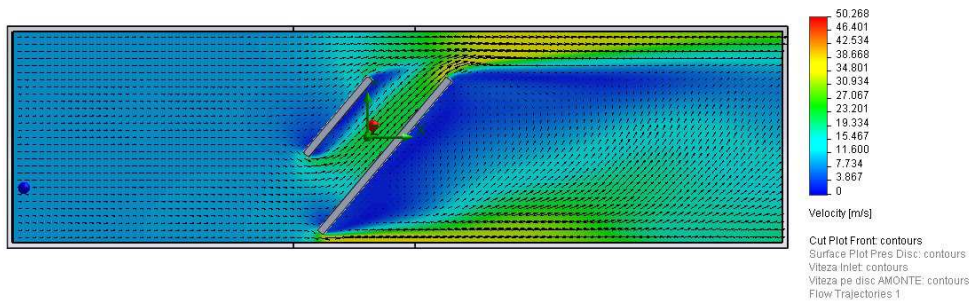


Fig.3.41 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

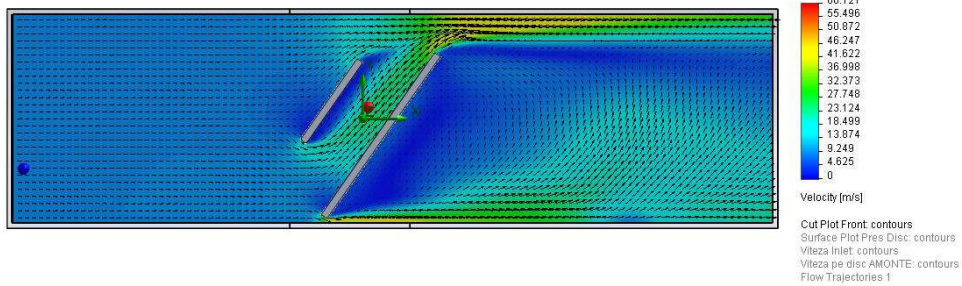


Fig.3.42 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

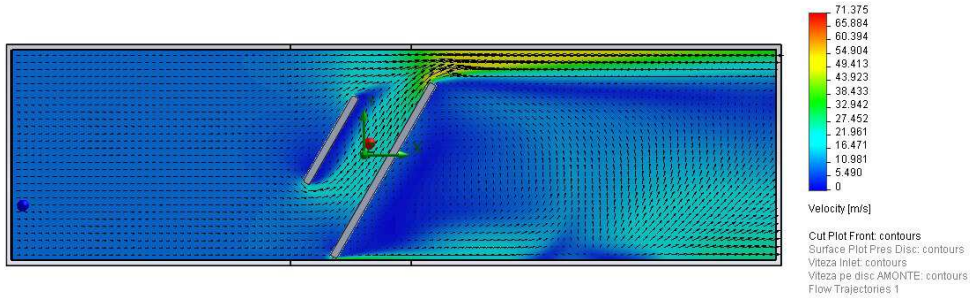


Fig.3.43 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

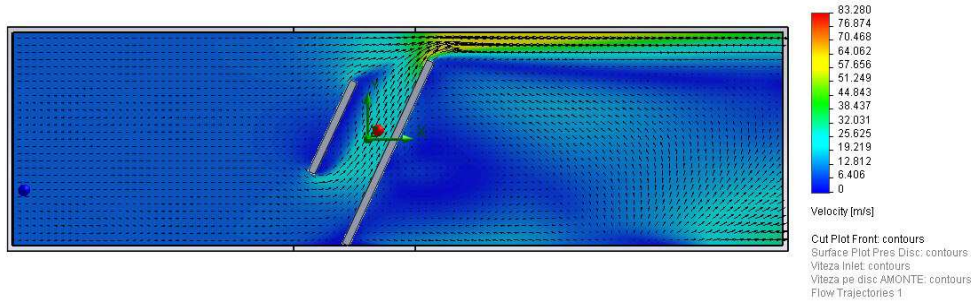


Fig.3.44 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

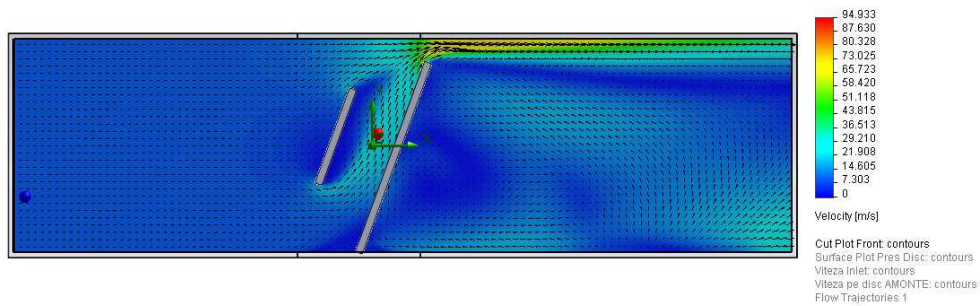


Fig.3.45 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$

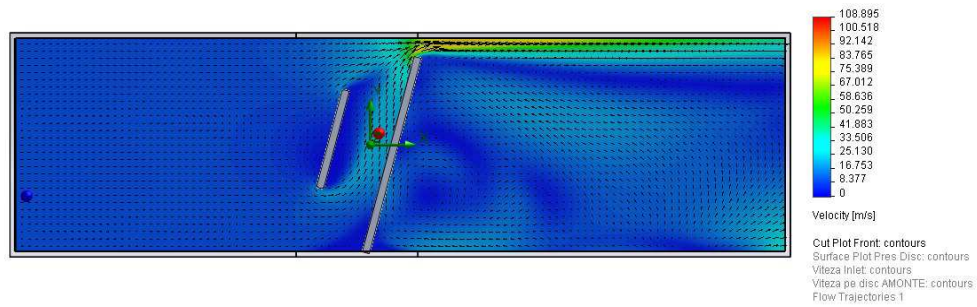


Fig.3.46 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$

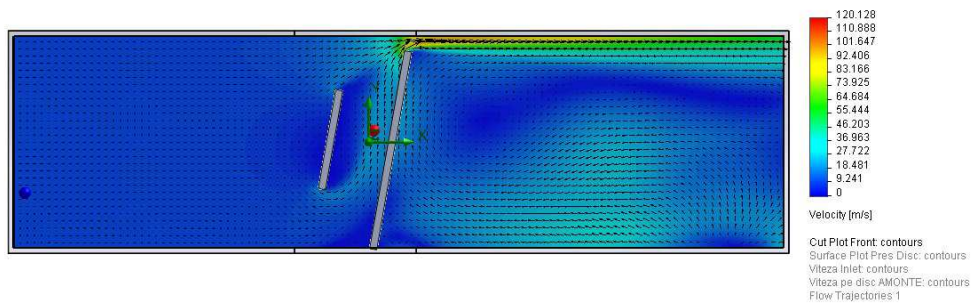


Fig.3.47 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

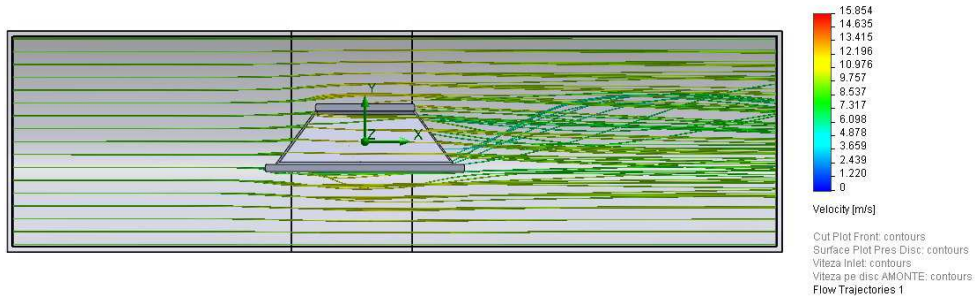


Fig.3.48 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

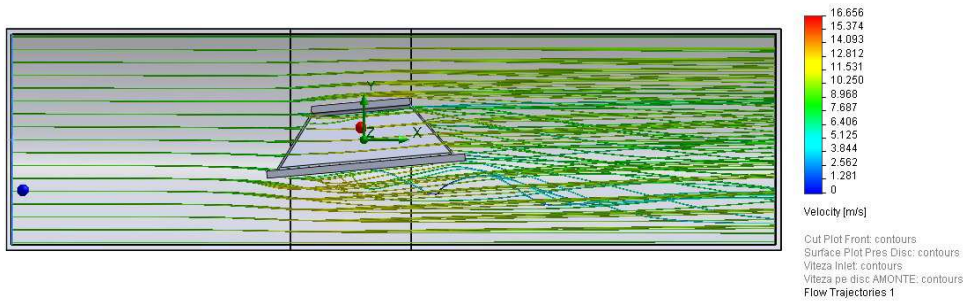


Fig.3.49 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

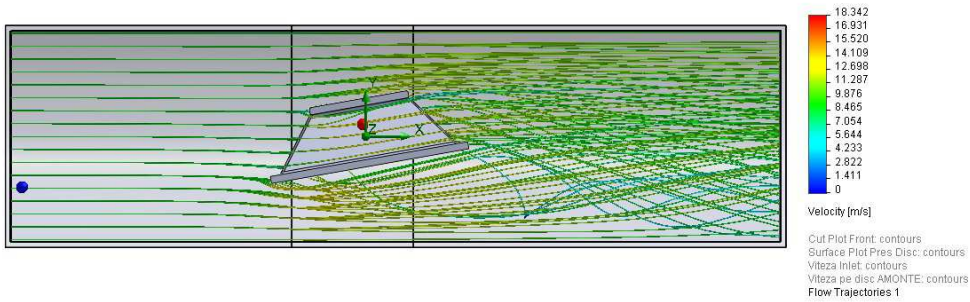


Fig.3.50 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

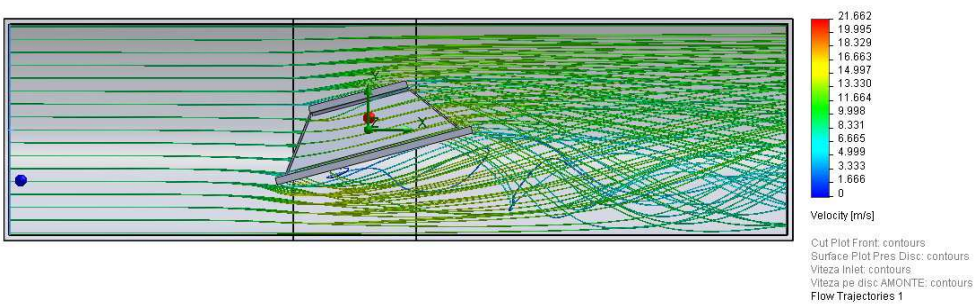


Fig.3.51 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$



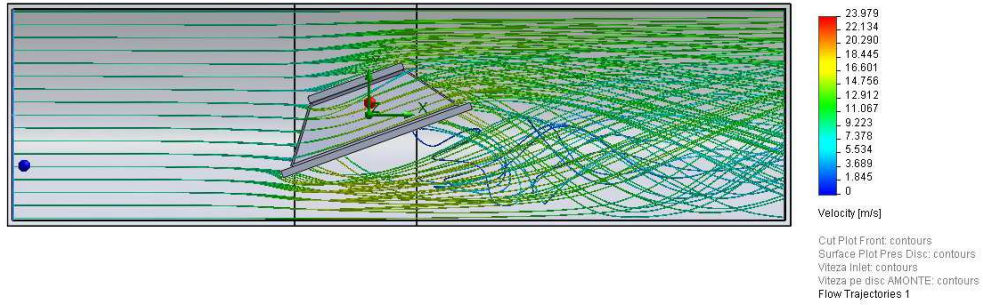


Fig.3.52 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

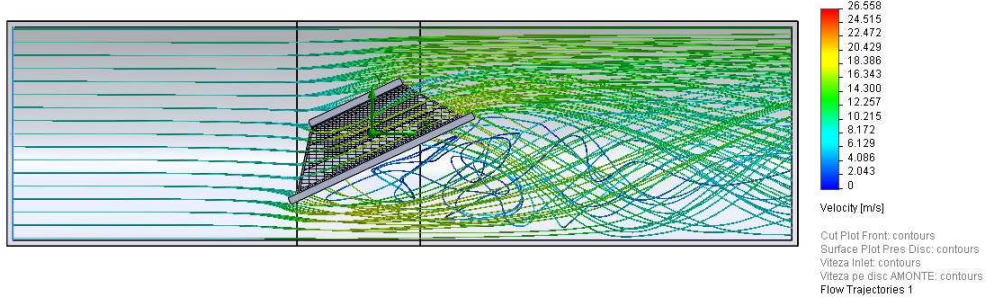


Fig.3.53 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$

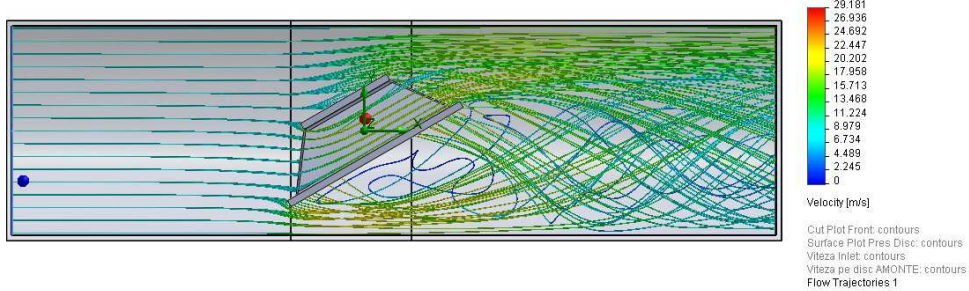


Fig.3.54 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

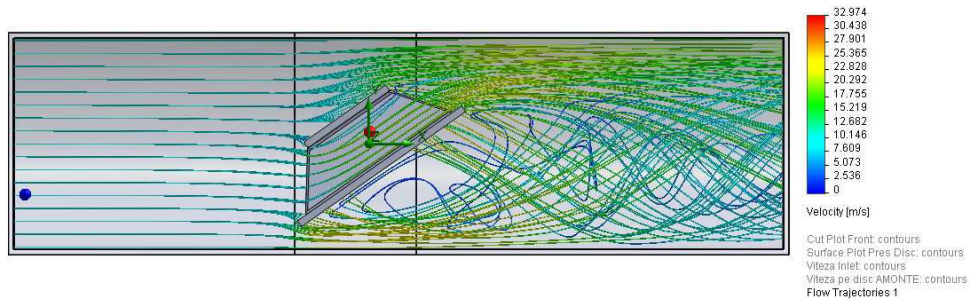


Fig.3.55 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$

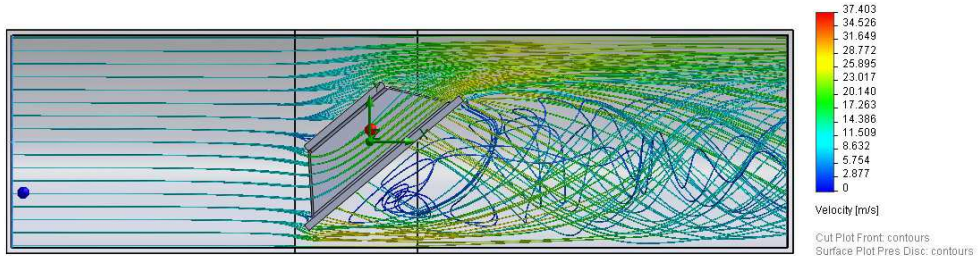


Fig.3.56 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

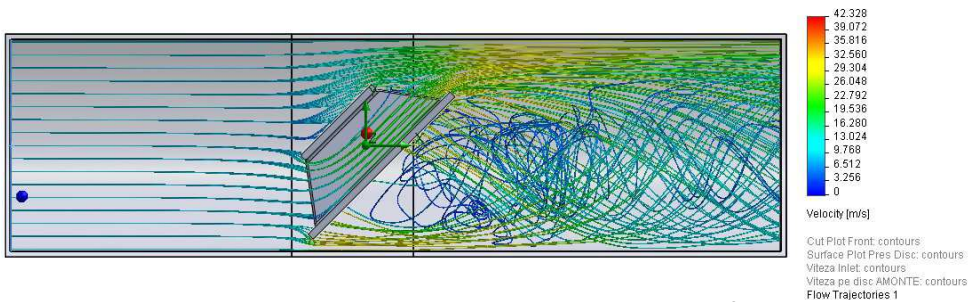


Fig.3.57 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

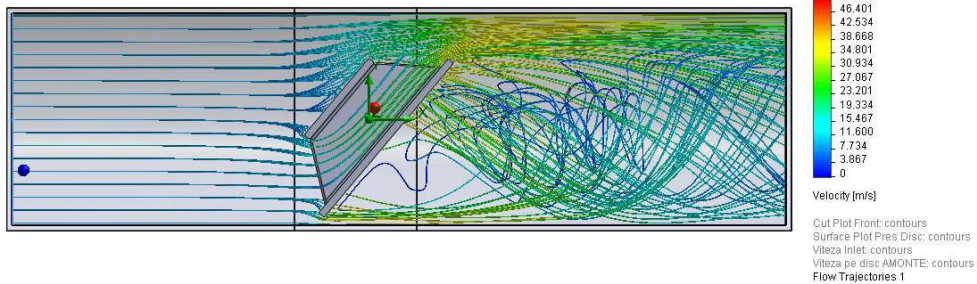


Fig.3.58 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

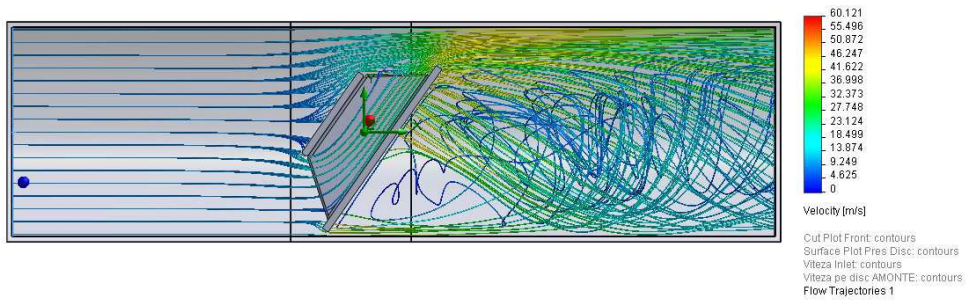


Fig.3.59 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

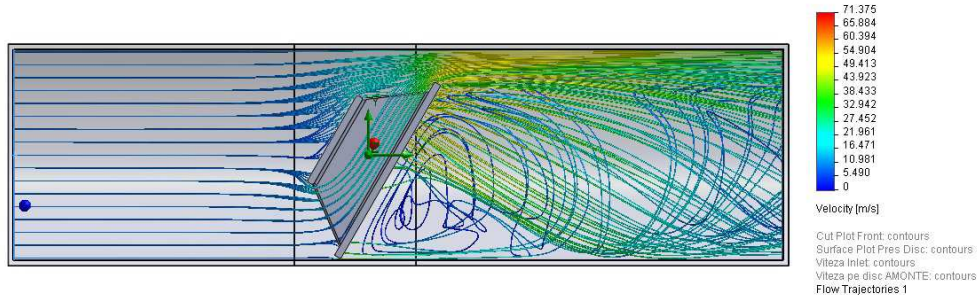


Fig.3.60 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

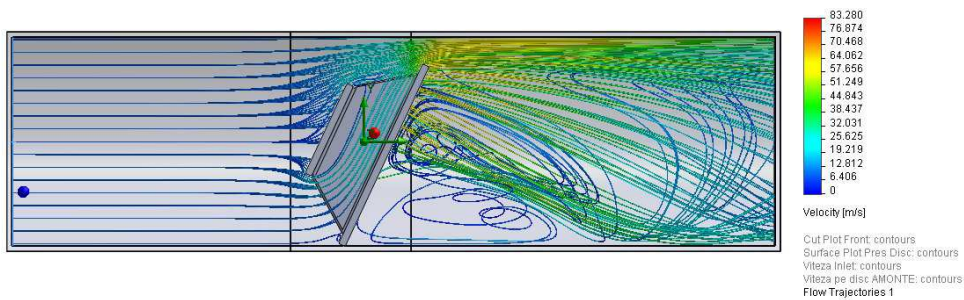


Fig.3.61 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

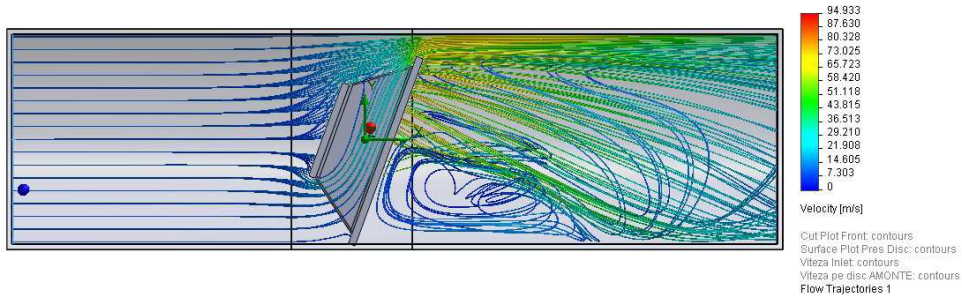


Fig.3.62 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$

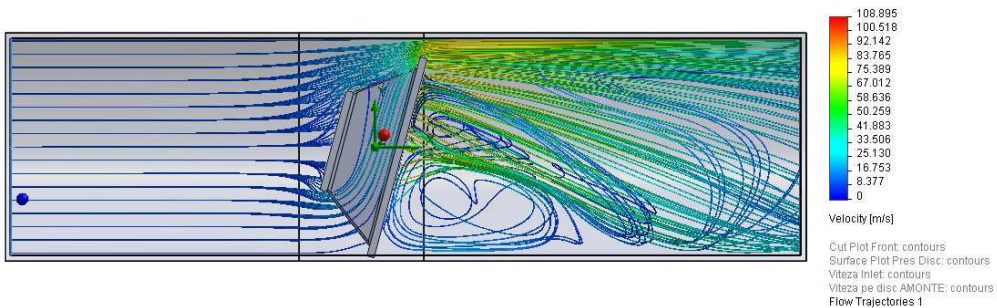


Fig.3.63 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$

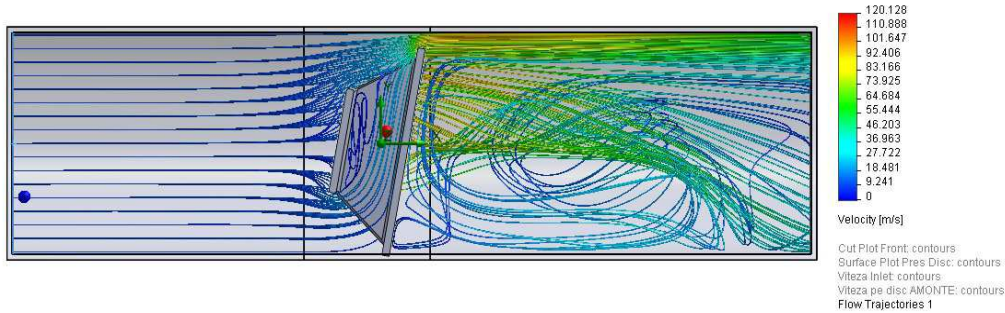


Fig.3.64 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

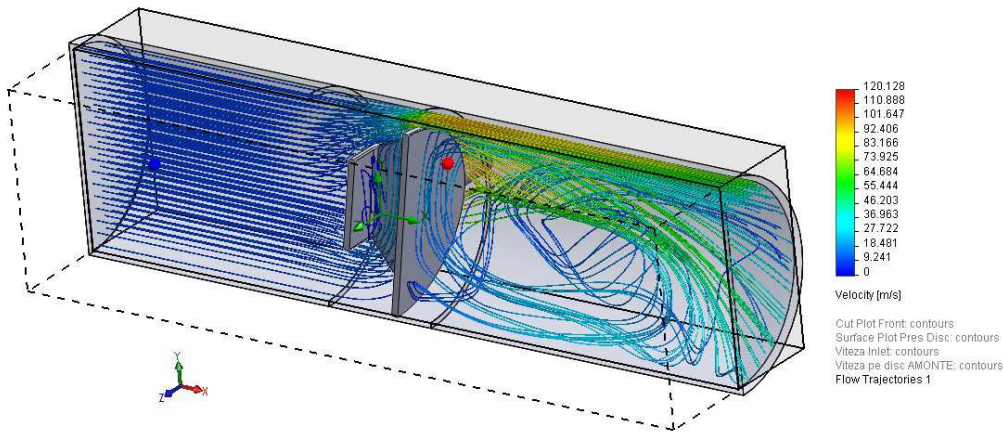


Fig.3.65 Liniile de curent tridimensionale pentru pozitie disc vana la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

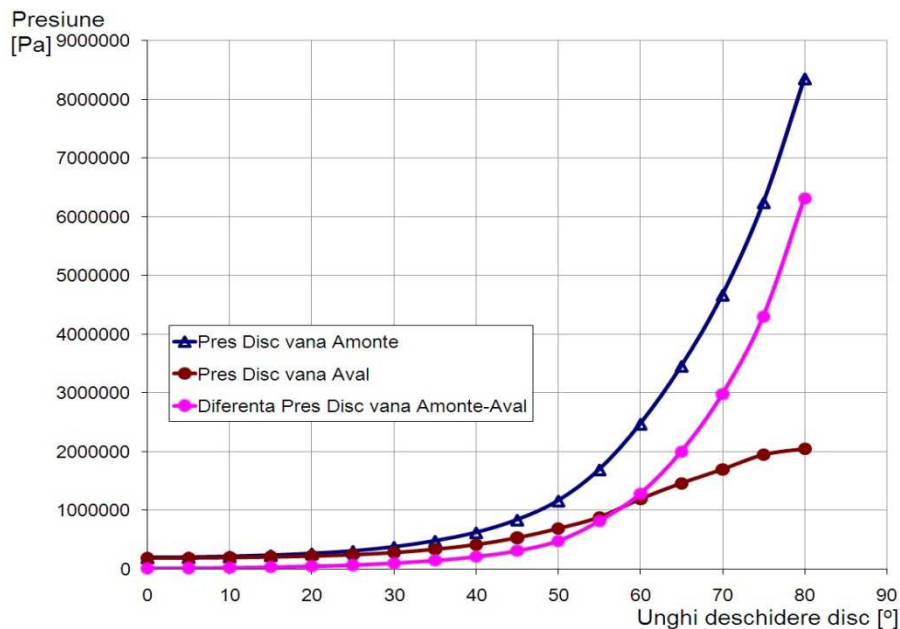
Tabelul 3.5 prezintă distribuția presiunilor obținute din SolidWorks Flow Simulation pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , iar fig.3.66 prezintă presiunile pe Disc vana Amonte/Aval funcție de unghiul de deschidere al discului pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Tabelul 3.6 prezintă viteze și coeficienți de cavitație obținuți din SolidWorks Flow Simulation pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , iar fig.3.67 prezintă variația coeficienților de cavitație funcție de unghiul de deschidere al discului la debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Figurile 3.68÷3.84, 3.85÷3.101, 3.102÷3.118, prezintă distribuția presiunii, vitezei respectiv a liniilor de curent pentru cele 17 poziții ale discului vanei la unghiurile  $0^\circ \div 80^\circ$ , cu pas de 5 grade, pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ .

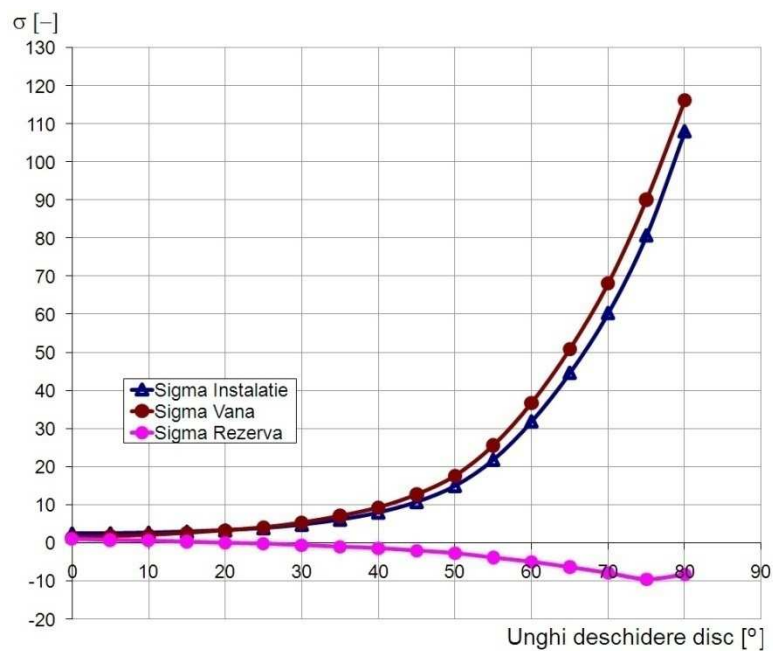
Tabel 3.5 Distribuția presiunilor obținute din SolidWorks Flow Simulation pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Unghi disc	Presiune Intrare $P_{\text{int}}$	Presiune Ieșire	Diferența presiune Intrare - Ieșire	Presiune Disc vană Amonte	Presiune Disc vană Aval	Diferență presiune Disc vană Amonte- Aval	Presiune Placă inferioară Disc vană
grade	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa
0	194015	180919	13096	192858	183066	9792	82501
5	198262	181954	16307	197050	184906	12143	61511
10	210755	186654	24101	209609	191096	18512	48513
15	232136	195155	36982	231082	202235	28848	26757
20	261768	203328	58440	260759	215788	44970	4680
25	304513	217565	86948	303554	239104	64450	-11312
30	374141	238338	135802	373222	276780	96442	-40693
35	476422	269287	207135	475533	333030	142503	-72430
40	619951	313243	306708	619048	411834	207214	-102628
45	836776	358792	477984	835871	527784	308088	-150851
50	1161925	419454	742471	1161014	685541	475472	-204616
55	1691418	471808	1219610	1690502	878450	812052	-292781
60	2469687	555553	1914135	2468769	1188823	1279946	-378508
65	3455818	603574	2852245	3454893	1458110	1996783	-486427
70	4667508	628317	4039191	4666580	1694207	2972373	-604437
75	6242603	661343	5581260	6241667	1944382	4297285	-729823
80	8353510	1116135	7237375	8352572	2045929	6306644	-634103

Fig.3.66 Presiuni Disc vană Amonte/Aval funcție de unghi deschidere disc  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

Tabel 3.6 Viteze și coeficienții de cavitație obținuți din SolidWorks Flow Simulation pentru debit maxim  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ 

Unghi disc grade	Viteză Intrare $V_{\text{int}}$ m/s	Viteză Disc vana Amonte m/s	$\sigma_{\text{Instalație}}$ -	$C_{p\text{min}}$ -	$\sigma_{\text{Vana}}$ -	$\sigma_{\text{Rezervă}}$ -
0	12.433	12.471	2.480	-1.443	1.443	1.037
5	12.433	12.507	2.535	-1.769	1.769	0.765
10	12.433	12.532	2.696	-2.099	2.099	0.597
15	12.433	12.523	2.973	-2.657	2.657	0.315
20	12.433	12.509	3.356	-3.326	3.326	0.030
25	12.433	12.498	3.909	-4.087	4.087	-0.177
30	12.433	12.490	4.810	-5.368	5.368	-0.557
35	12.433	12.488	6.134	-7.102	7.102	-0.968
40	12.433	12.489	7.991	-9.350	9.350	-1.359
45	12.433	12.487	10.796	-12.779	12.779	-1.983
50	12.433	12.482	15.004	-17.682	17.682	-2.678
55	12.433	12.476	21.855	-25.674	25.674	-3.819
60	12.433	12.468	31.925	-36.853	36.853	-4.928
65	12.433	12.474	44.685	-51.009	51.009	-6.325
70	12.433	12.481	60.363	-68.214	68.214	-7.852
75	12.433	12.489	80.743	-90.217	90.217	-9.474
80	12.433	12.499	108.056	-116.292	116.292	-8.236

Fig.3.67 Coeficienții de cavitație funcție de unghiul deschidere disc ( $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ )

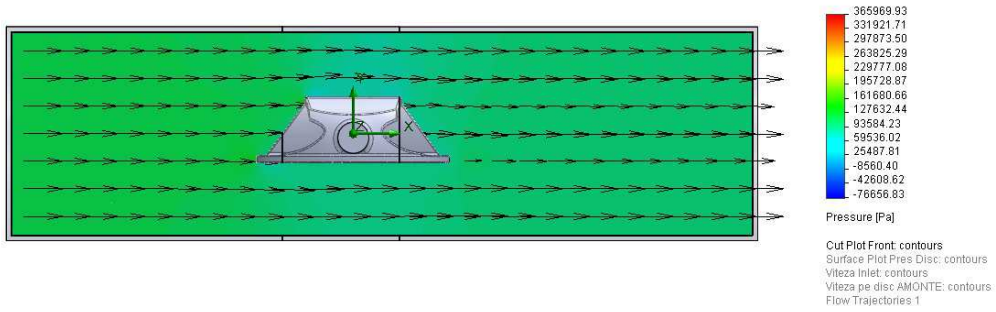


Fig.3.68 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

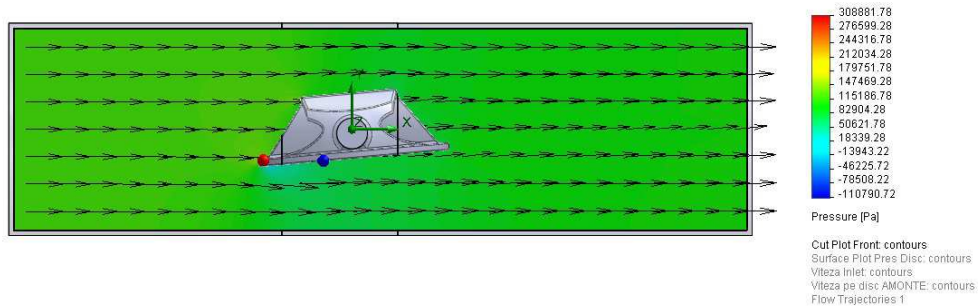


Fig.3.69 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

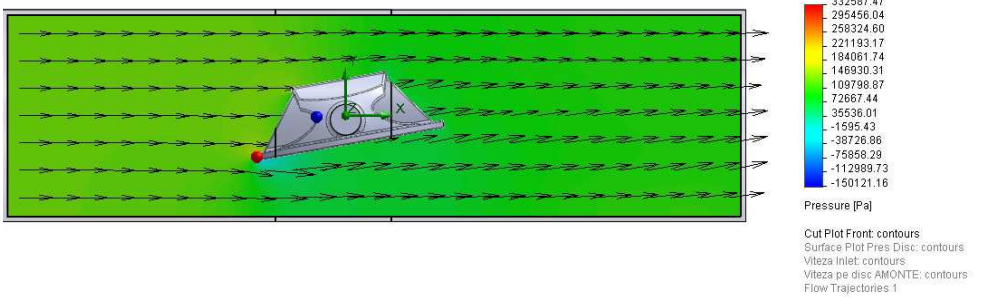


Fig.3.70 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

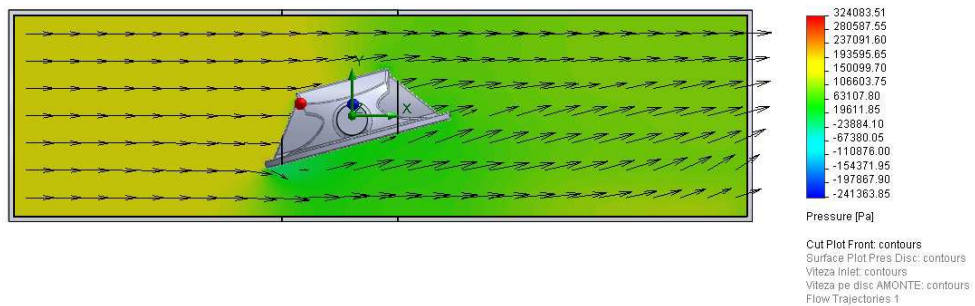


Fig.3.71 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$

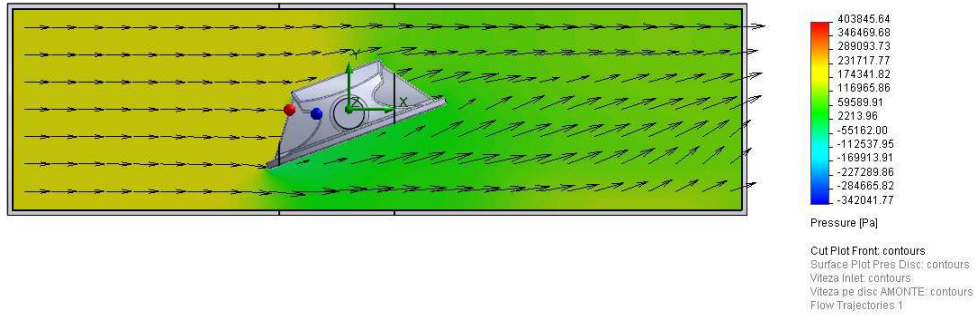


Fig.3.72 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

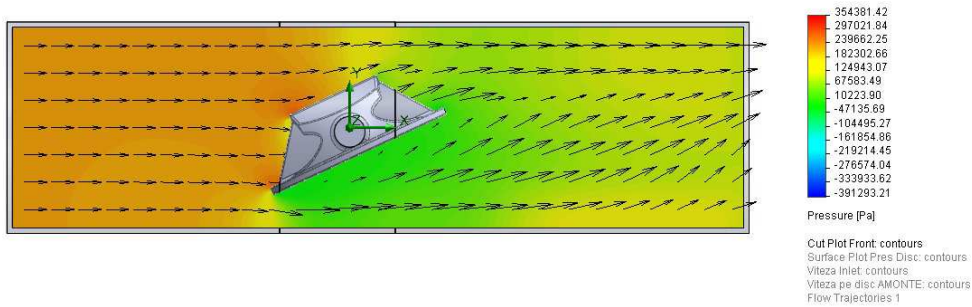


Fig.3.73 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$

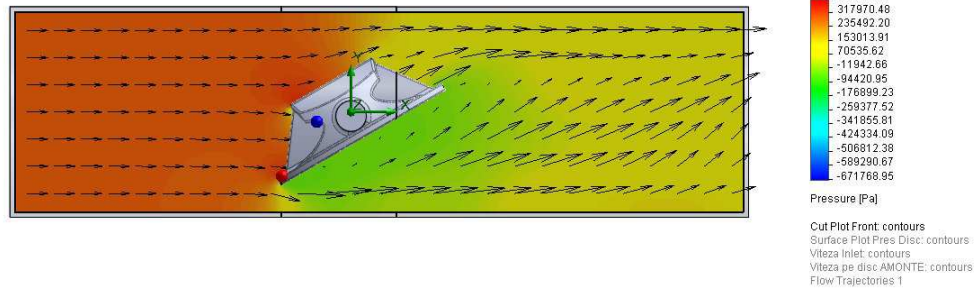


Fig.3.74 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

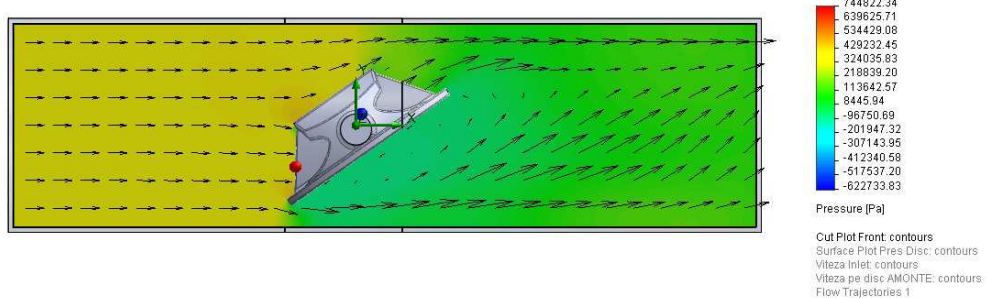


Fig.3.75 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$



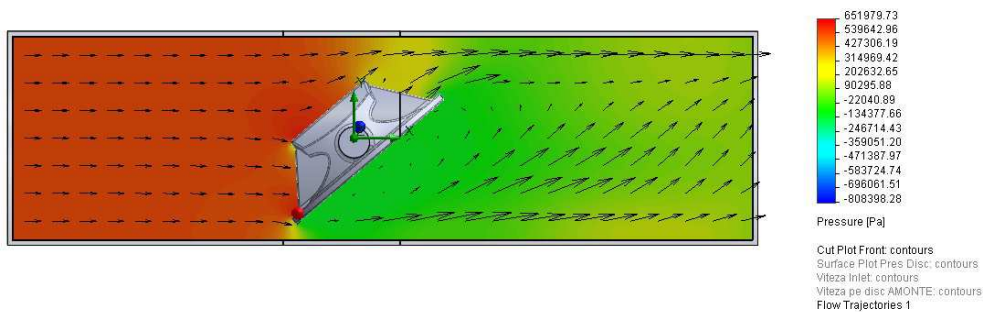


Fig.3.76 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

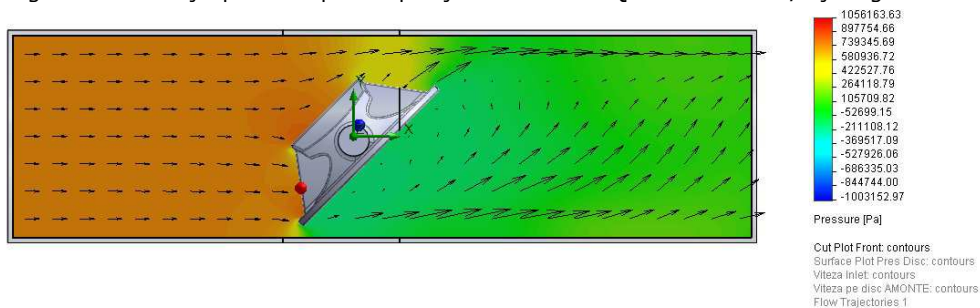


Fig.3.77 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

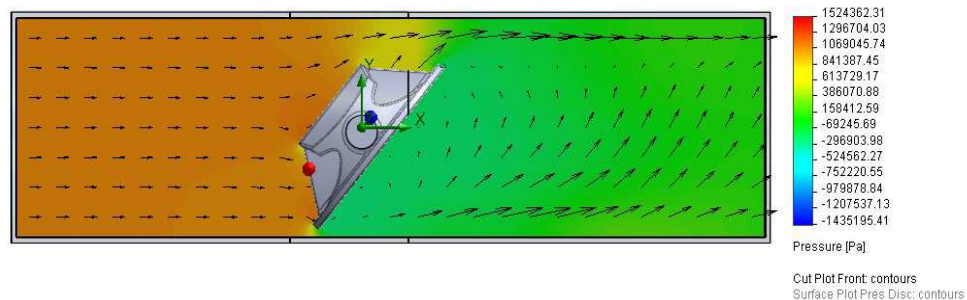


Fig.3.78 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

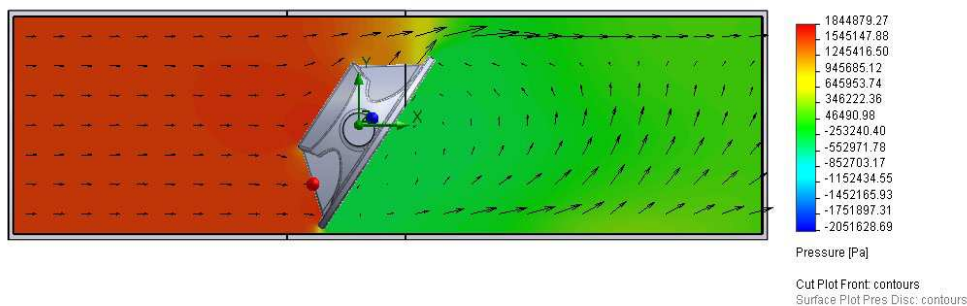


Fig.3.79 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

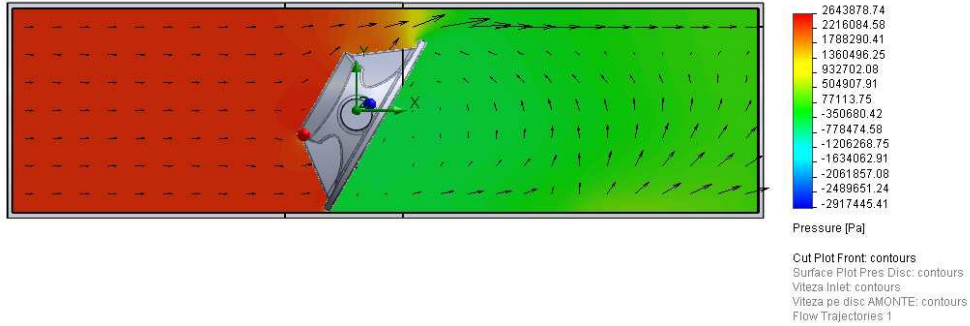


Fig.3.80 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

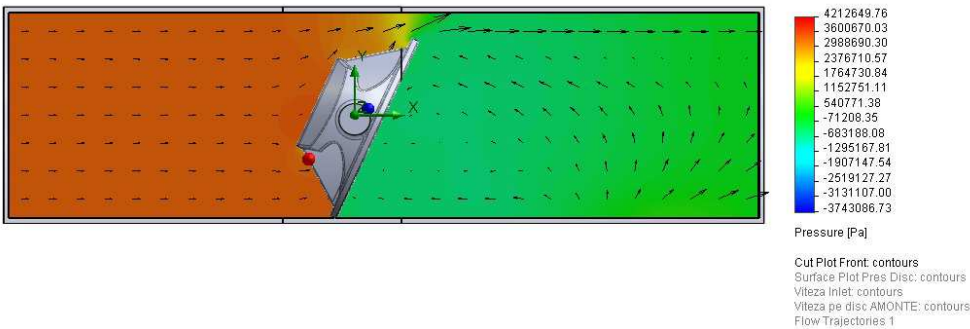


Fig.3.81 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

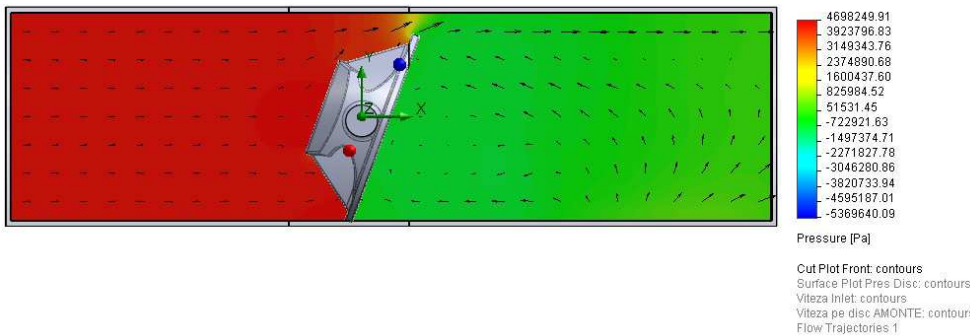


Fig.3.82 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$

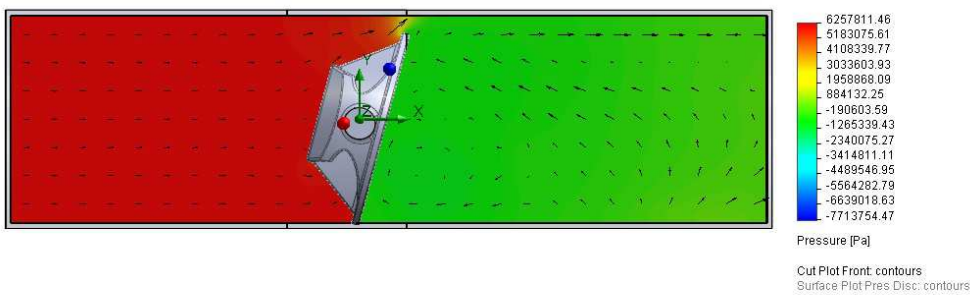


Fig.3.83 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$

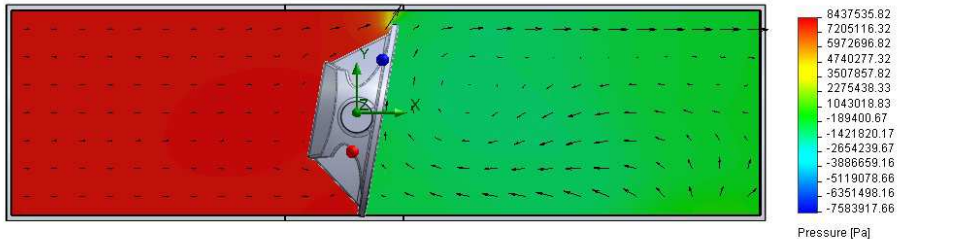


Fig.3.84 Distribuția presiunii pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

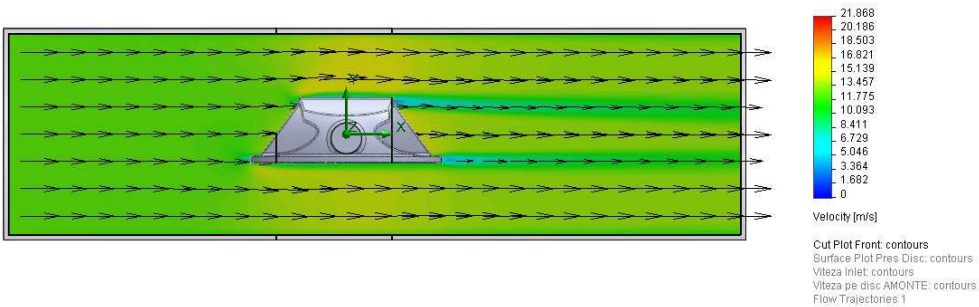


Fig.3.85 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

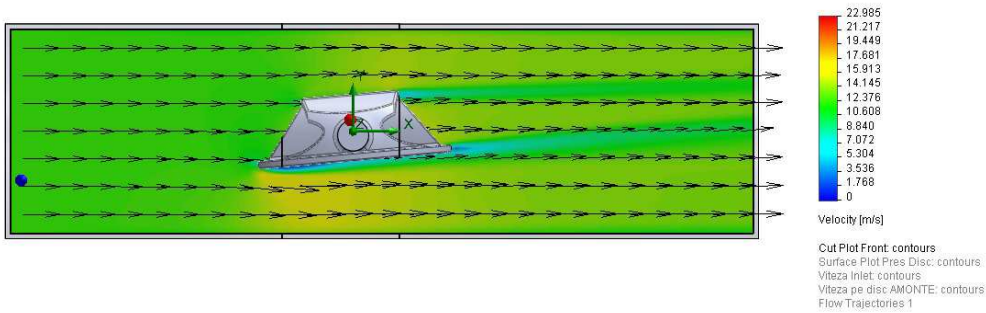


Fig.3.86 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

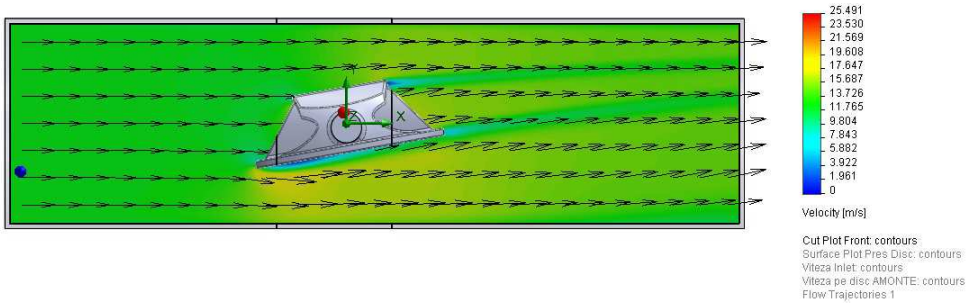


Fig.3.87 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

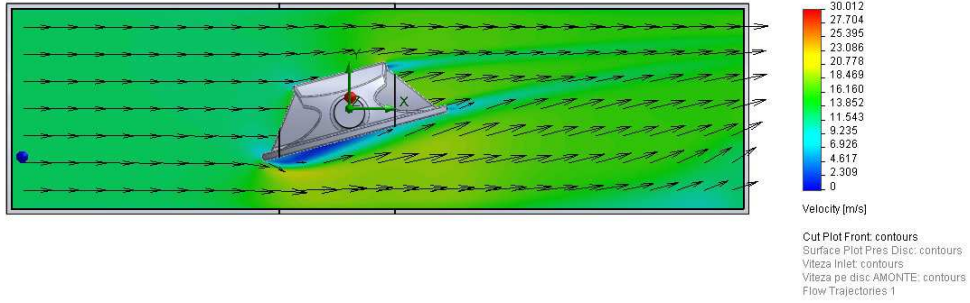


Fig.3.88 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$

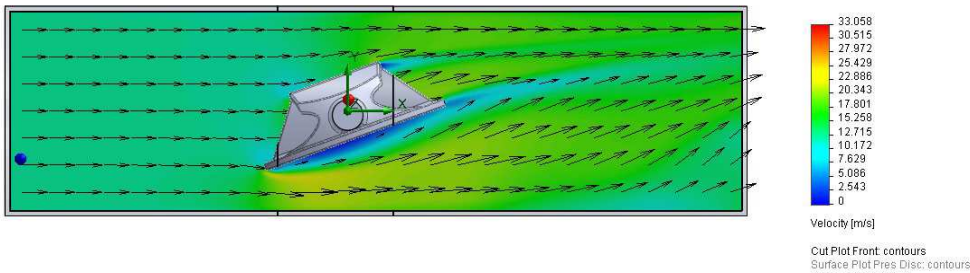


Fig.3.89 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

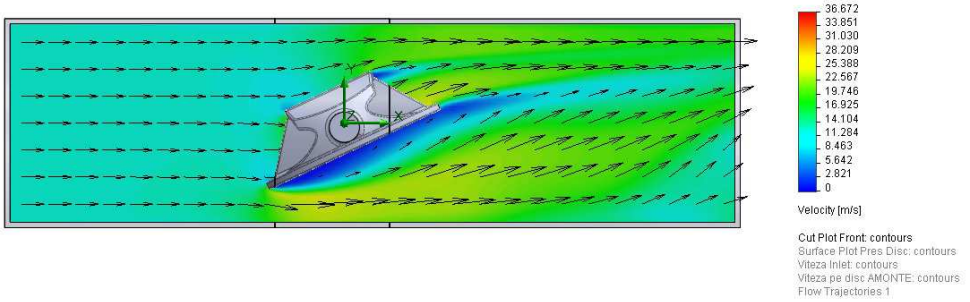


Fig.3.90 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$

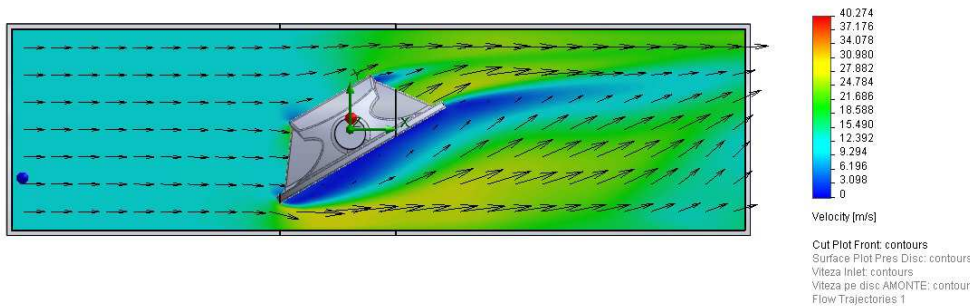


Fig.3.91 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

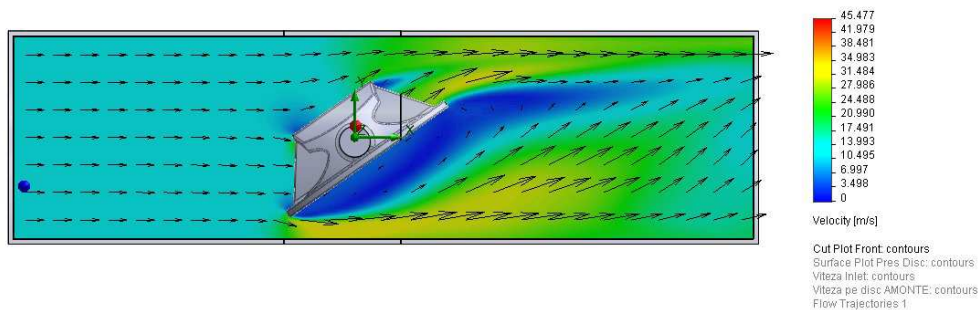


Fig.3.92 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$

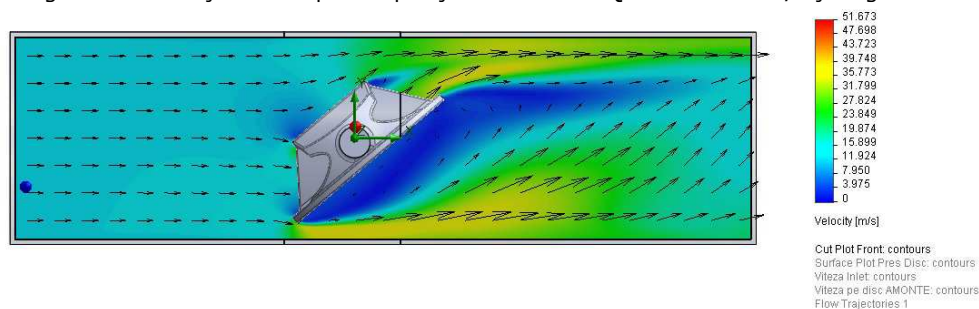


Fig.3.93 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

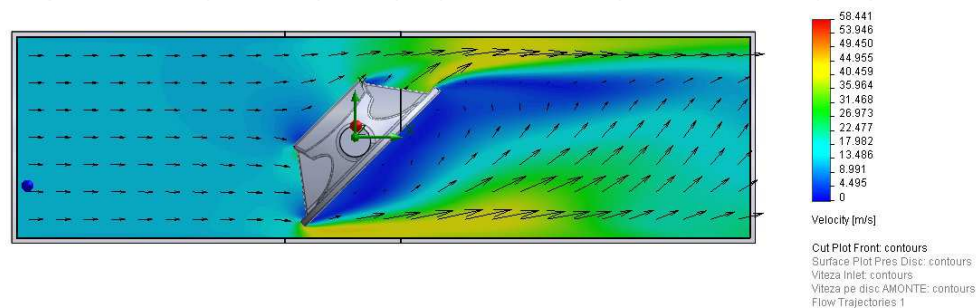


Fig.3.94 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

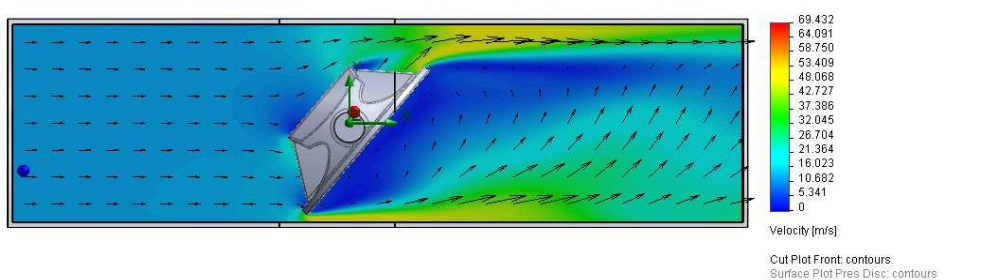


Fig.3.95 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

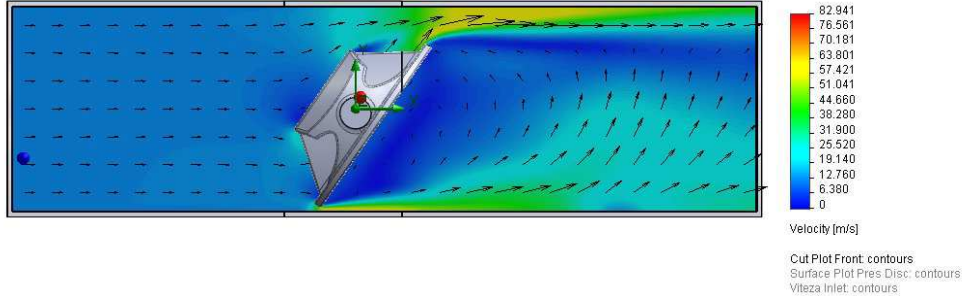


Fig.3.96 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

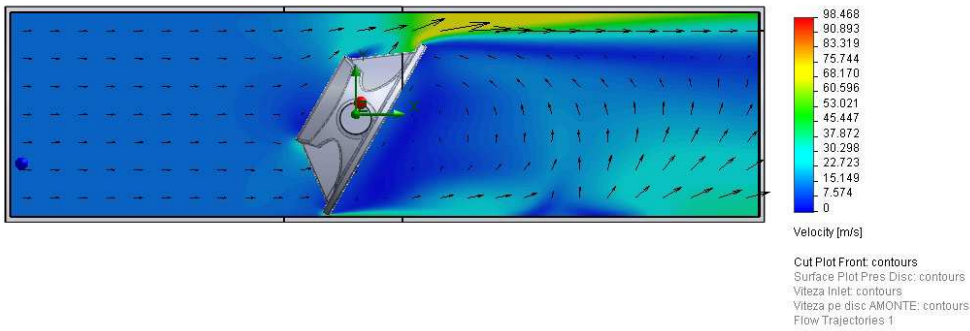


Fig.3.97 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

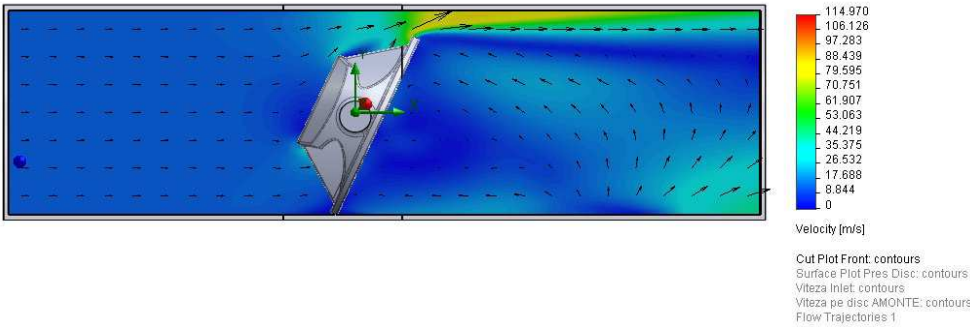


Fig.3.98 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

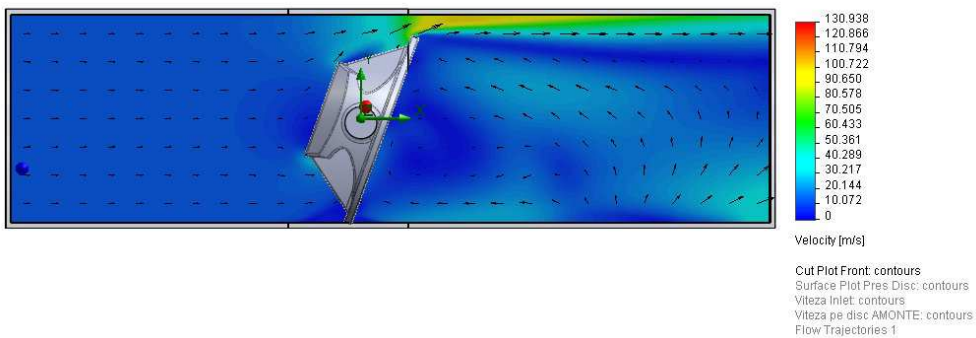


Fig.3.99 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$

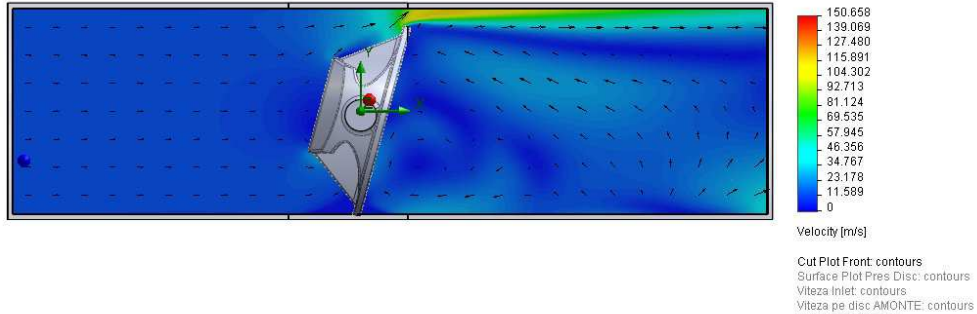


Fig.3.100 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$

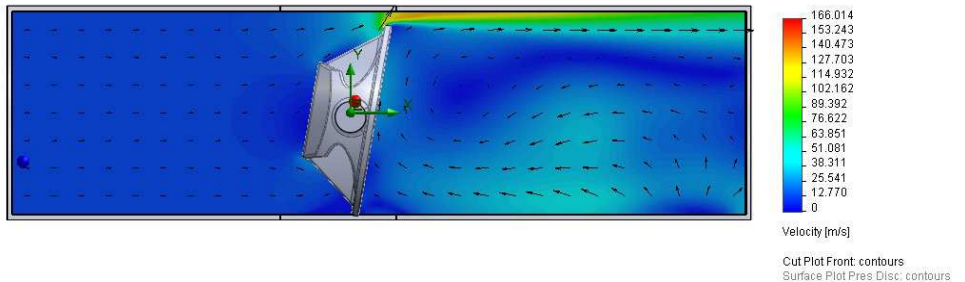


Fig.3.101 Distribuția vitezei pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$

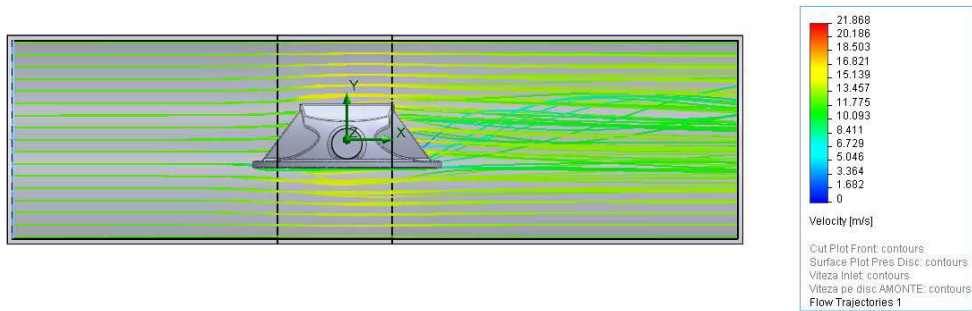


Fig.3.102 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $0^\circ$

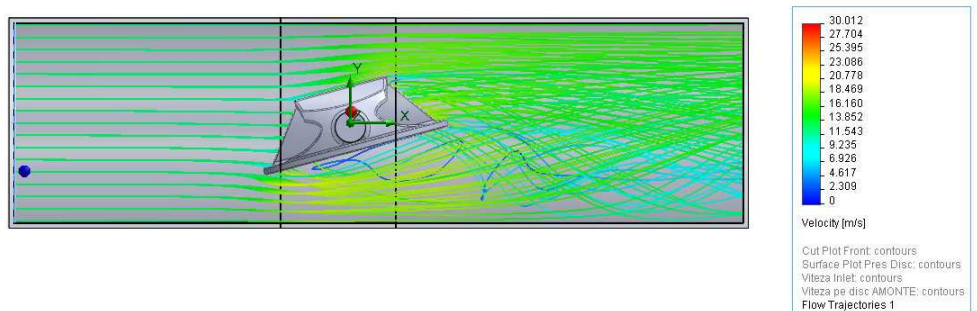


Fig.3.103 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $5^\circ$

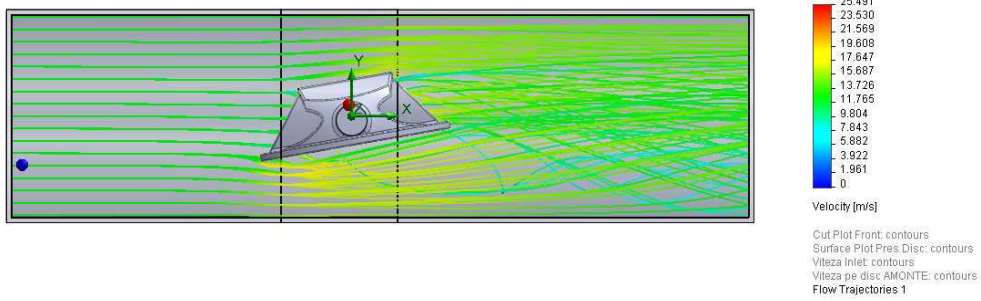


Fig.3.104 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $10^\circ$

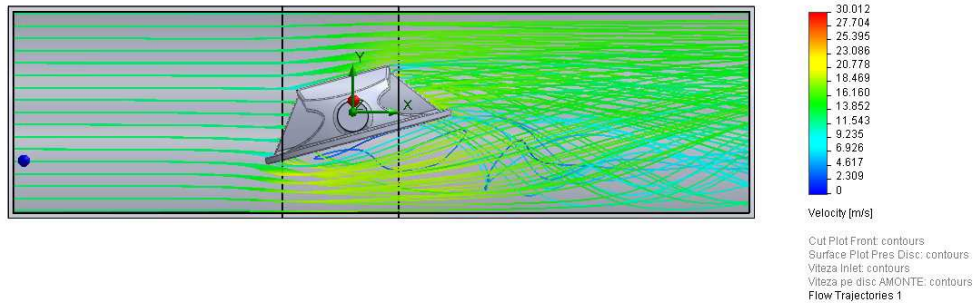


Fig.3.105 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $15^\circ$

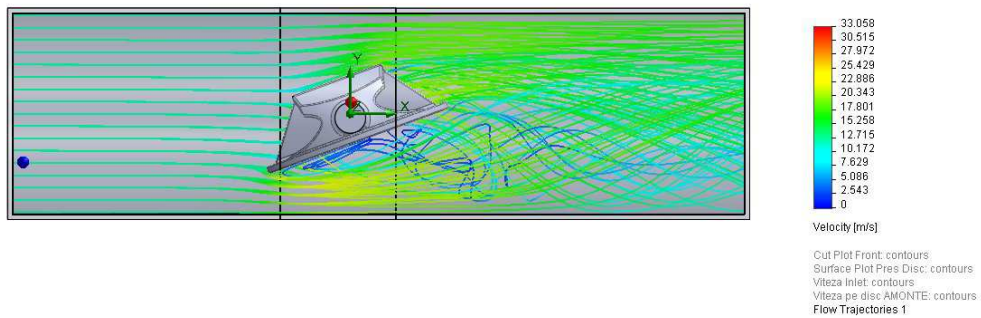


Fig.3.106 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $20^\circ$

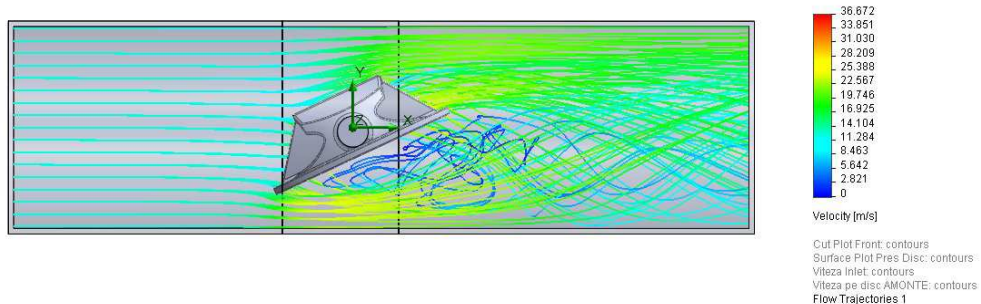


Fig.3.107 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $25^\circ$



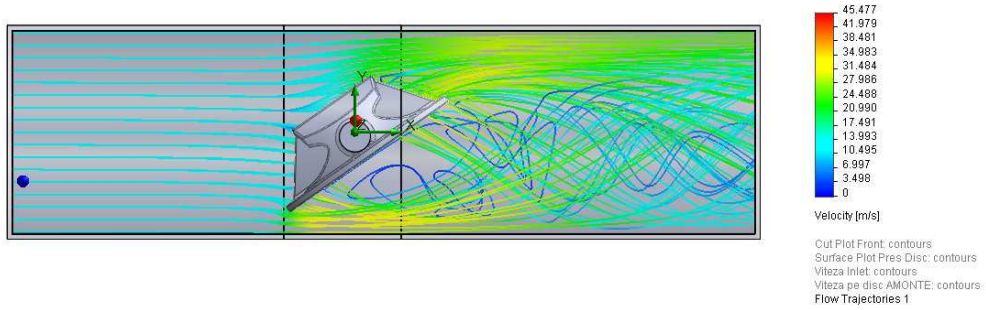


Fig.3.108 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $30^\circ$

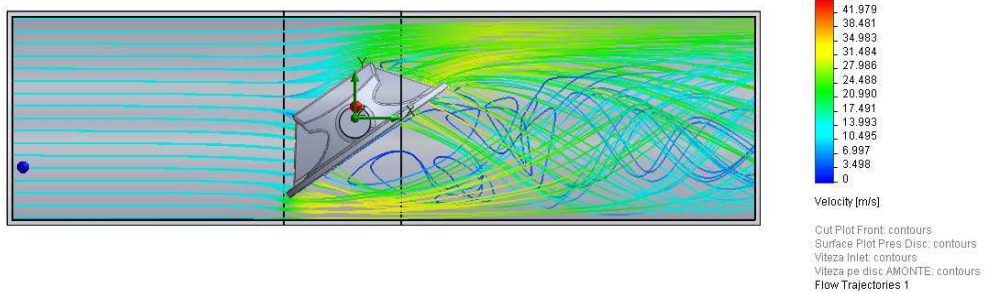


Fig.3.109 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $35^\circ$

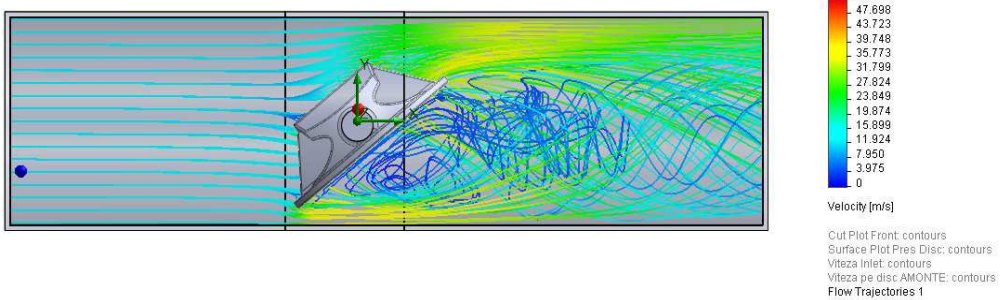


Fig.3.110 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $40^\circ$

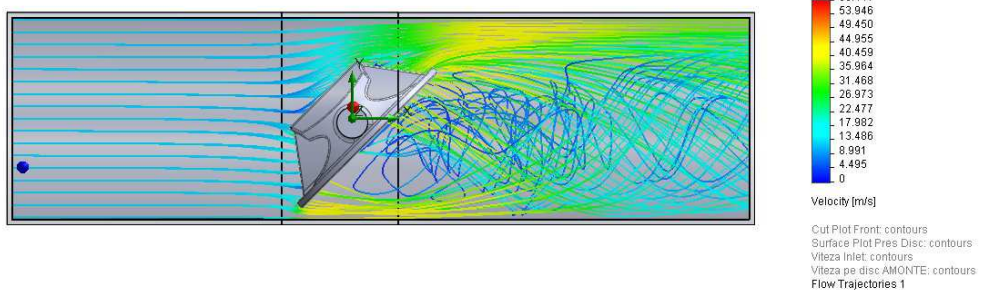


Fig.3.111 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $45^\circ$

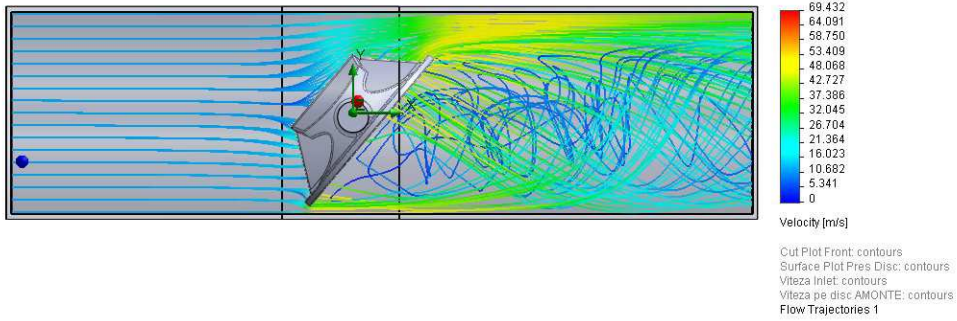


Fig.3.112 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $50^\circ$

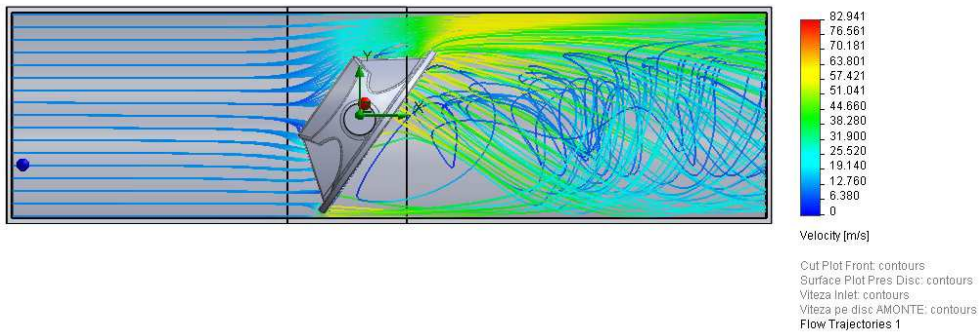


Fig.3.113 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $55^\circ$

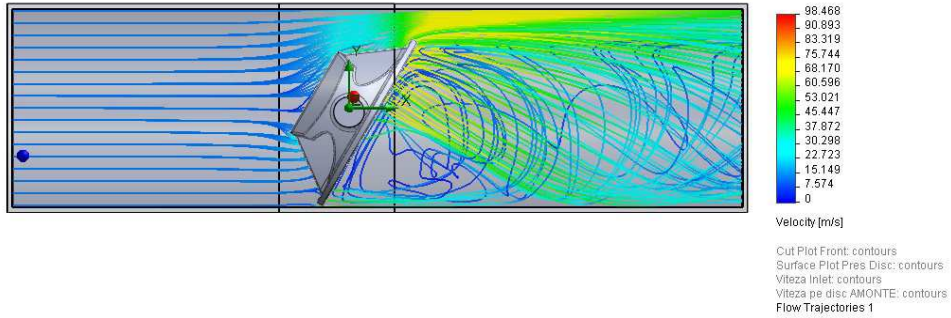


Fig.3.114 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $60^\circ$

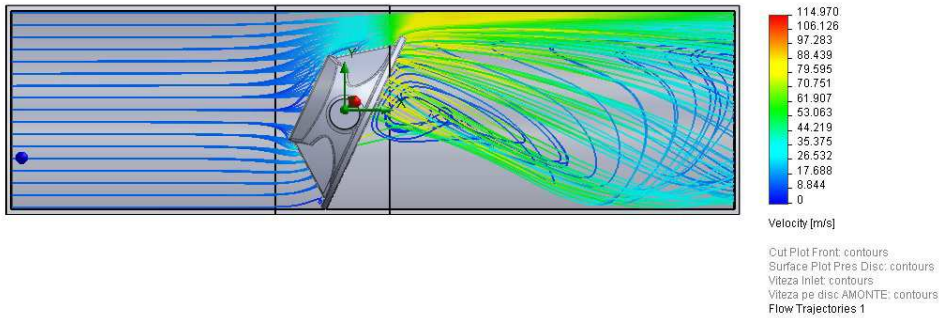
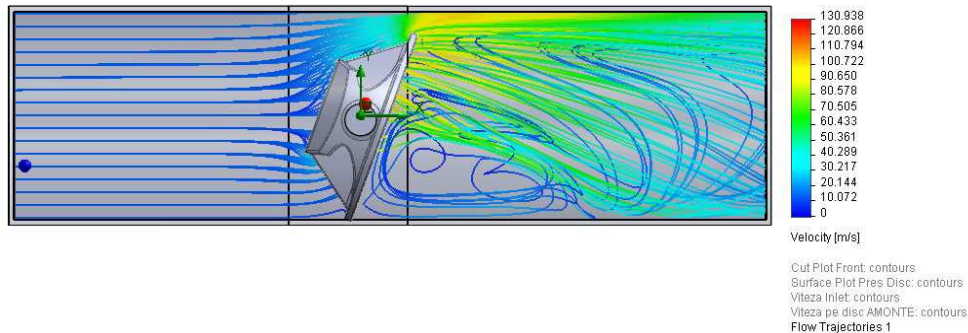
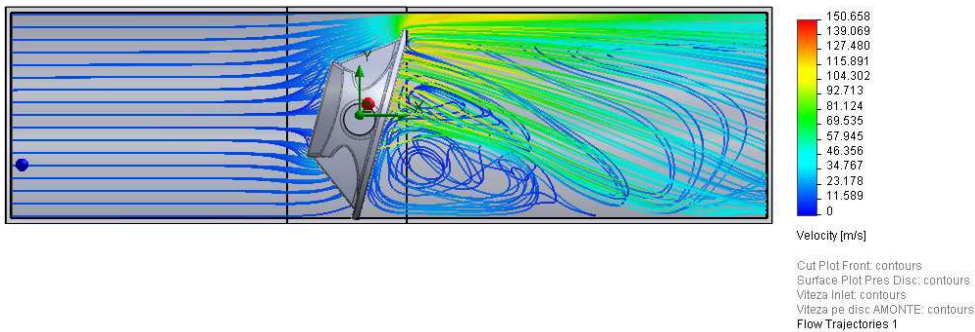
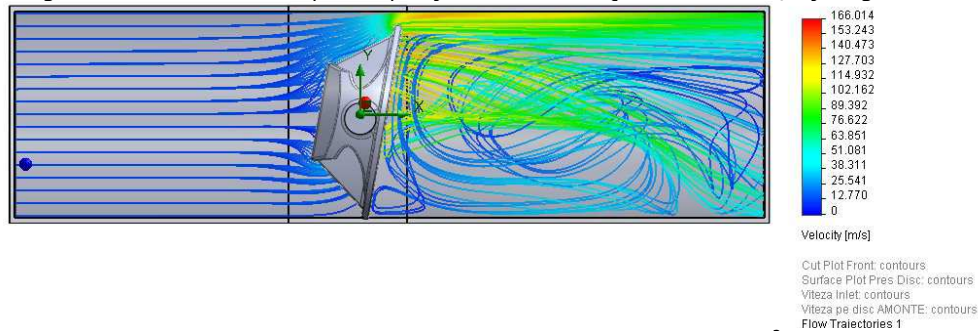


Fig.3.115 Liniile de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $65^\circ$

Fig.3.116 Linii de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $70^\circ$ Fig.3.117 Linii de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $75^\circ$ Fig.3.118 Linii de curent pentru poziție disc vană la  $Q_{\max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$  și unghiul  $80^\circ$ 

Figurile 3.119, 3.120, 3.121 prezintă comparația coeficienților de cavitație  $\sigma_{\text{Instalație}}$ ,  $\sigma_{\text{vana}}$ ,  $\sigma_{\text{rezerva}}$  funcție de unghi deschidere disc respectiv  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ . Figurile 3.122, 3.123, 3.124 prezintă comparația presiunilor Disc vană Amonte/Aval funcție de unghi deschidere disc respectiv  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ . Din aceste figuri și din tabelele 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 rezultă următoarele concluzii:

- Pentru debitul nominal  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  respectiv maxim  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , diferența între coeficientul de cavitație al vanei  $\sigma_{\text{vana}}$  este nesemnificativă, ceea ce conduce la concluzia că variația debitului nu influențează coeficientul de cavitație al vanei;
- Pentru debitul nominal  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  respectiv maxim  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , diferența între coeficientul de cavitație al instalației  $\sigma_{\text{instalație}}$  nu variază, ceea

- ce conduce la concluzia că variația debitului influențează coeficientul de cavitație al instalației cu aceeași valoare, la toate pozițiile discului vanei;
- Pentru debitul nominal  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  respectiv maxim  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , diferența între coeficientul de cavitație de rezervă  $\sigma_{\text{Rezervă}}$  nu variază, ceea ce conduce la concluzia că variația debitului influențează coeficientul de cavitație de rezervă cu aceeași valoare, la toate pozițiile discului vanei;
  - Pentru debitul nominal  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  respectiv maxim  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , diferența presiunilor Amonte și Aval de disc este semnificativă și variabilă cu pozițiile discului vanei.

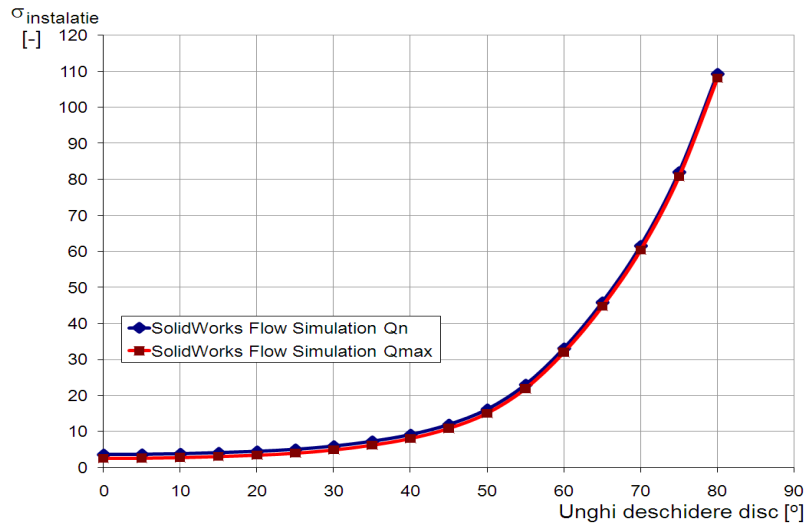


Fig.3.119 Comparație coeficient de cavitație  $\sigma_{\text{Instalatie}}$  funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

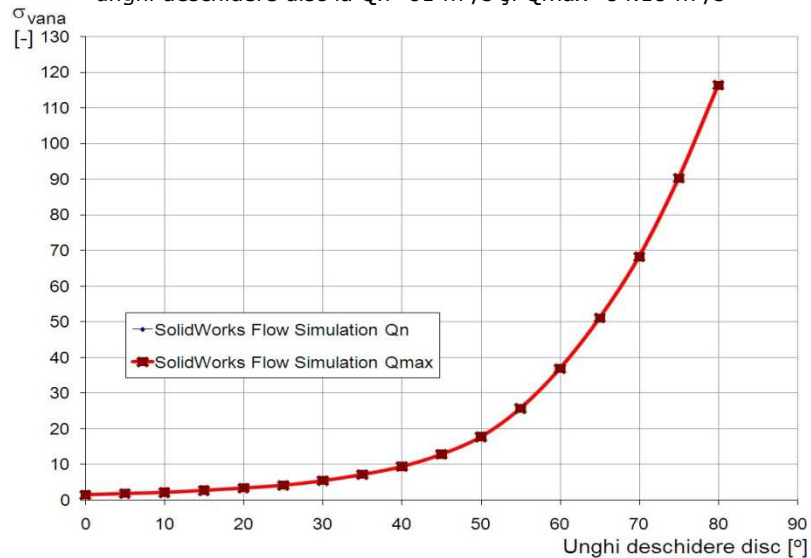


Fig.3.120 Comparație coeficient de cavitație  $\sigma_{\text{vana}}$  funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

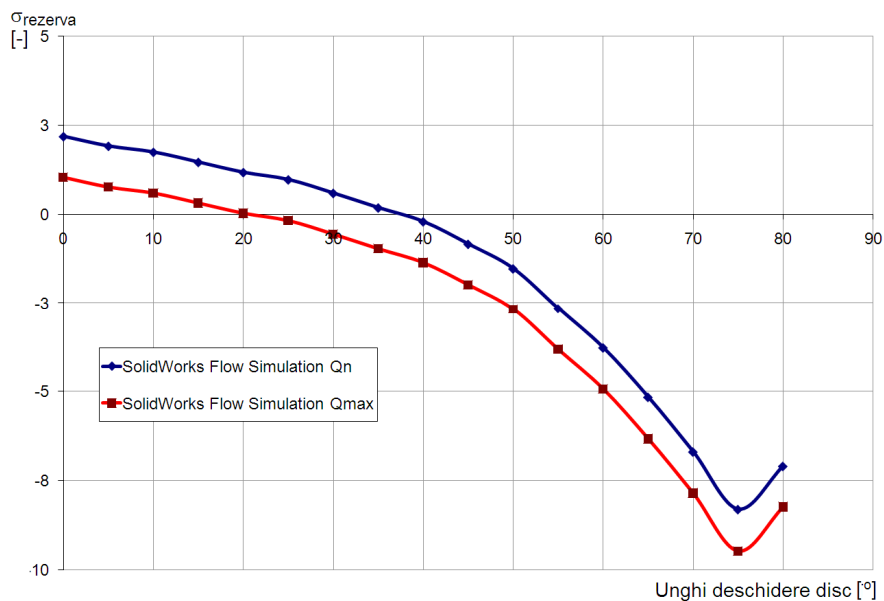


Fig.3.121 Comparație coeficient de cavitație  $\sigma_{Rezerva}$  funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

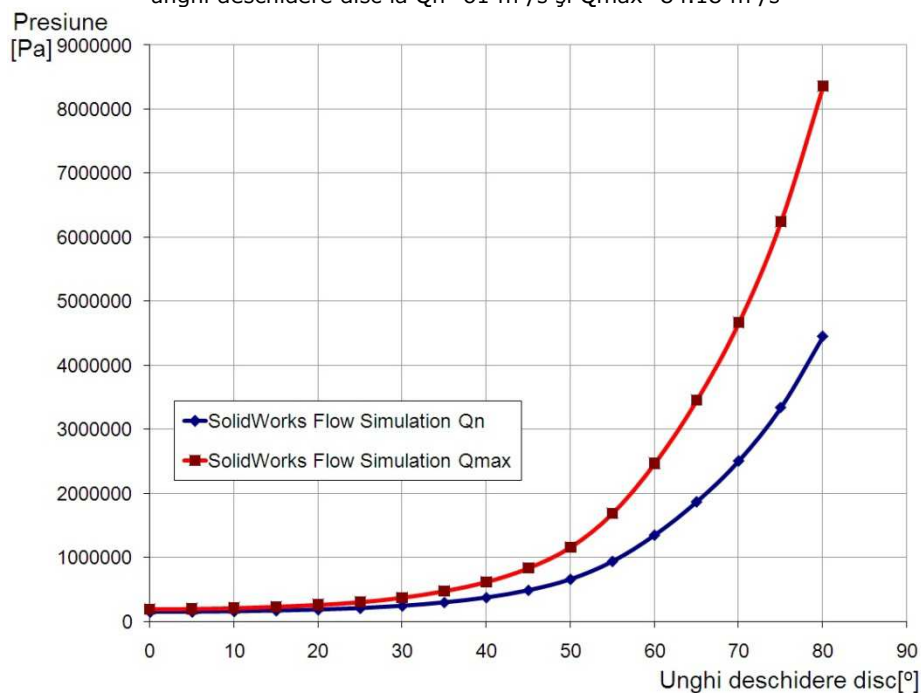


Fig.3.122 Comparație presiuni Disc vană - Amonte funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{max}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

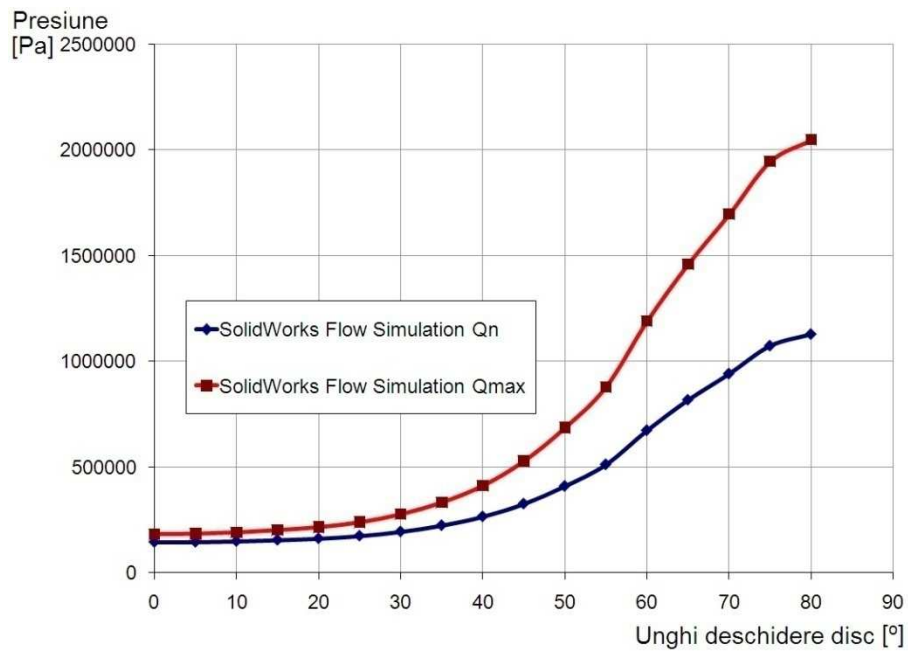


Fig.3.123 Comparație presiuni Disc vană Aval funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n=61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\text{max}}=84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

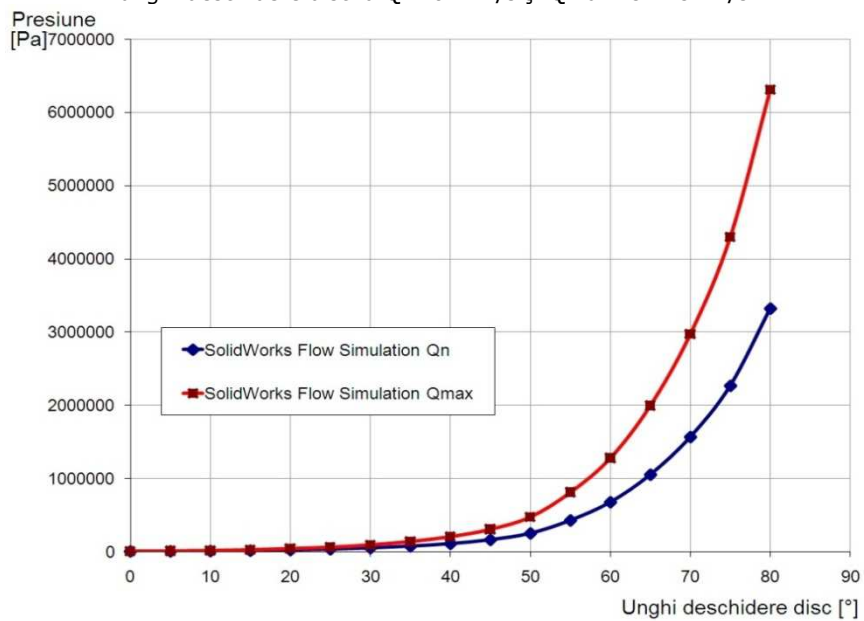


Fig.3.124 Comparație diferență presiuni Disc vană între Amonte-Aval funcție de unghi deschidere disc la  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$  și  $Q_{\text{max}} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$

### 3.4. Concluzii

- 1.** Rezultatele modelării curgerii arată că vana fluture cu disc biplan funcționează în regimuri cavitaționale de diverse intensități. Cum cele mai expuse piese sunt scaunul și inelele de fixare garnituri și reținere scaun, pentru creșterea duratei de exploatare se impune studierea tehnologiilor care să confere discului o rezistență cât mai mare la eroziunea prin cavitație;
- 2.** Studiul realizat arată că vana fluture cu disc biplan este tranzitată de curenți cavitaționali a căror intensitate este dependentă de debit și unghiul de deschidere (pentru debitul de  $61 \text{ m}^3/\text{s}$ , de la o deschidere a discului  $> 45^\circ$ , iar pentru un debit de  $84,18 \text{ m}^3/\text{s}$  de la o deschidere  $> 30^\circ$ );
- 3.** Funcție de debit condițiile hidrodinamice ale curentului cavitațional (debitul, respectiv viteza, presiunea) și unghiul de deschidere al discului vanei, intensitatea cavitației, exprimată de valoarea coeficientului  $\sigma_{\text{rezervă}}$ , poate să crească sau să scadă.

## **4. INFLUENȚA TRATAMENTELOR TERMICE VOLUMICE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE**

### **4.1. Generalități privind tratamentele termice volumice aplicate pieselor solificate la cavitație**

Aceste tipuri de tratamente termice asigură o rezistență mare față de coroziunea intercrystalină, fenomen care se produce în prezența carburilor de crom separate intergranular în jurul cărora conținutul în acest element al austenitei scade sub 12 %.

De multe ori acest tratament termic este denumit hipercălire, pentru a-l deosebi de cel aplicat aliajelor neferoase la care se aplică și îmbătrânirea. La oțelurile nestabilizate, temperatura de încălzire este cuprinsă între 1000...1100 °C, iar la cele stabilizate cu Ti sau Nb și la cele aliate suplimentar cu Mo se situează la 1050...1150 °C [106]. Totodată se recomandă efectuarea unei preîncălziri de 1...2 ore la cca. 600 °C, urmată de încălzirea rapidă până la temperatura de hipercălire. Durata de menținere se stabilește în funcție de grosimea piesei, fiind de (20 + g) minute, unde g este grosimea exprimată în mm. Pentru a menține dizolvat carbonul și cromul, răcirea trebuie efectuată cu viteză mare: astfel, la grosimi sub 10 mm se va utiliza aerul, la grosimi de 10...20 mm se va folosi uleiul, iar la grosimi mai mari, răcirea se face în apă rece [106].

Oțelurile nestabilizate cu titan, exploatate timp îndelungat la temperaturi mai mari de 350 °C suferă coroziune intercrystalină. Dacă conținutul în carbon nu depășește 0,03%, tratamentul de hipercălire asigură o exploatare mai îndelungată la 400...600 °C fără instalarea coroziunii intercrystaline [106].

La oțelurile stabilizate, titanul are afinitate mai mare față de carbon, astfel încât cromul rămâne în austenită în concentrație de peste 12% și pot fi utilizate timp îndelungat la temperaturi înalte în medii corozive. Pentru ca efectul de stabilizare să se mențină timp îndelungat, după hipercălire se aplică un tratament termic suplimentar numit recoacere pentru stabilizare, unde materialul este încălzit la temperaturi de 870...900 °C timp de 2...3 ore după care este răcit în aer. În cursul încălzirii și menținerii, carbonul se leagă în carbură de titan (sau niobiu), iar în cursul răcirii se formează o proporție redusă de carburi de crom [106].

### **4.2. Călirea volumică pentru punere în soluție**

Cercetările experimentale au fost derulate pe oțelul inoxidabil X5CrNi18-10, supus tratamentului termic de călire pentru punere în soluție.

Probele cilindrice, destinate cercetării la cavitația vibratoare, au fost prelevate din bare de oțel la dimensiunea de  $\Phi 25 \times 40$  mm. O parte din probe au fost supuse tratamentului termic de călire pentru punere în soluție la temperatură constantă, de 1050 °C, cu durată variabilă de menținere (5 min, 25 min și 50 min), iar altele au fost austenitizate la temperaturi variabile (1000 °C, 1050 °C și 1100°C) cu durată constantă de menținere, de 25 min (fig.4.1). De fiecare dată, răcirea s-a



făcut brusc, în apă, pentru fixare, la temperatura camerei, a stării structurale obținute în diverse condiții de încălzire pentru punere în soluție. Prin modificarea parametrilor temperatură – timp de încălzire s-a urmărit evidențierea influenței granulației și a gradului de dizolvare a carburilor precipitate și a celei mai mari părți din fazele intermetalice (de ex. faza  $\sigma$ , faza  $\chi$ , faza  $\Pi$ , etc.) asupra comportării la eroziunea prin cavitație.

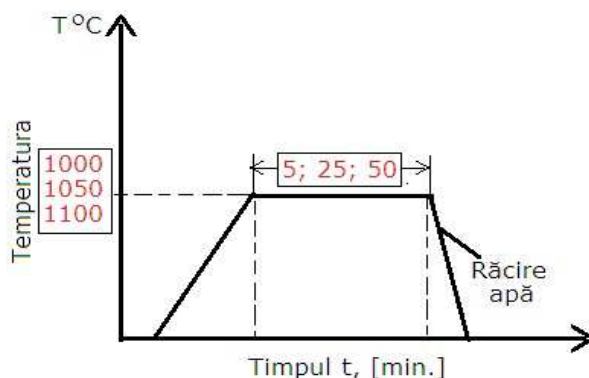


Fig.4.1 Ciclograma de tratament termic

Analizele realizate pe probele, astfel tratate, au arătat că, odată cu ridicarea temperaturii de încălzire, se intensifică fenomenele de difuzie a carbonului și a elementelor de aliere în matricea de austenită, crescând gradul de omogenitate chimică al acesteia, dar și dimensiunile grăunților cristalini. Întrucât duritatea este proprietatea mecanică cea mai sensibilă modificărilor structurale, înainte de a fi cavitate, probele austenitizate, la diverse temperaturi cu aceeași durată de menținere și călite în același mediu, au fost supuse măsurătorilor de duritate Vickers cu sarcina de 1 daN (tabelul 4.1a). Pentru a urmări tendința la ecruisare mecanică a probelor cavitate, pe secțiunea transversală a acestora, s-au făcut măsurători de microduritate cu o sarcina de 200 gf și un timp de 15 s, fig.4.18.

În tabelul 4.1b sunt date valorilor microdurității înregistrate pe probele austenitizate la aceeași temperatură de încălzire cu diferite durate de menținere.

Tabelul 4.1a Duritățile înregistrate în urma tratamentului termic aplicat (diferite temperaturi de austenitizare)

Duritatea Vickers (HV1) în funcție de tratamentul termic volumic (temperatura de încălzire)								
5 min/apă/1050 °C			25 min/apă/1050 °C			50 min/apă/1050 °C		
Diagona la [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV	Diagona la [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV	Diagona la [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV
85.5	254	224.8	89.5	231	198	92	219	187.2
88	239		96	201		97.5	195	
91	224		97.5	195		98	193	
91	224		97.5	195		99	189	
91	224		98	193		101,5	178	
92	219		98.5	191		102	178	
94	210		98.5	191		103	175	
95	205		99.5	187		103	171	

Tabelul 4.1b Duritățile înregistrate în urma tratamentului termic aplicat (diferite durate de menținere)

Duritatea Vickers (HV1) în funcție de tratamentul termic volumic (durata de menținere)								
25 min/apă/1000 °C			25 min/apă/1050 °C			25 min/apă/1100 °C		
Diagonala [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV	Diagonala [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV	Diagonala [μm]	HV [daN/mm <sup>2</sup> ]	Media HV
99	189	175.5	89.5	231	198	102	178	171.8
100	185		96	201		102	178	
101	182		97.5	195		102.5	175	
101	182		97.5	195		103	175	
104	171		98	193		104	171	
104.5	168		98.5	191		104.5	168	
106	165		98.5	191		105	168	
107	162		99.5	187		107	162	

Din tabelul 4.1a,b se constată că cea mai mare valoare de duritate s-a obținut pentru călirea de la temperatura de 1050 °C, cu o durată de menținere de 5 minute. Duritatea este cu circa 12 % mai mare față de cea obținută pentru o durată de menținere de 25 minute, cu circa 17 %, pentru tratamentul cu durată de menținere de 50 minute, cu circa 24 % pentru cel cu durată de menținere de 25 minute la o temperatură de 1100 °C și cu circa 22% pentru cel cu o durată de menținere de 25 minute la o temperatură de 1000 °C. Aceste diferențe pun în evidență necesitatea corelării duratelor de menținere cu temperaturile de încălzire, ce determină atât gradul de omogenitate chimică a austenitei, și de uniformitate dimensională a grăunților de austenită, cât și modificări importante ale caracteristicilor mecanice, cu efect semnificativ asupra rezistenței la eroziunea cavitației, conform cercetărilor realizate de [10, 49, 54, 70, 78, 83, 120, 125, 142].

#### 4.2.1. Călirea pentru punere în soluție cu temperaturi diferite de încălzire

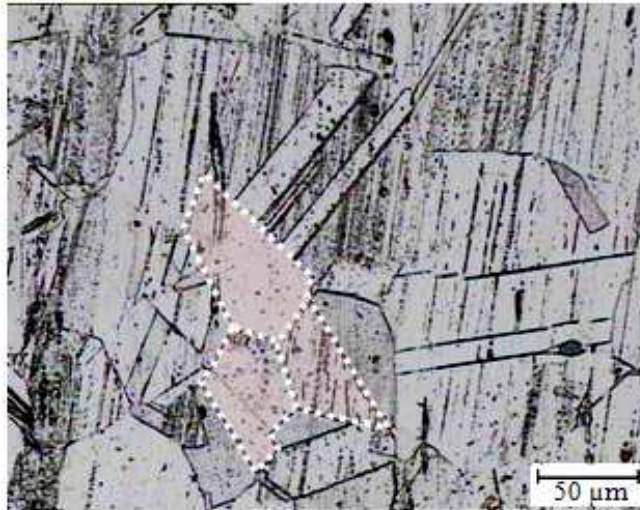
Cercetarea rezistenței la eroziunea cavitației s-a făcut, pe aparatul vibrator cu cristale piezoceramice standard T2, după procedurile definite de normele internaționale ASTM G32-2010 și cu respectarea cutumelor Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica din Timișoara privind durata totală de atac al cavitației, de 165 min, divizată în 12 perioade intermediare de 5, 10 și 15 minute, precum și modalitatea de pregătire și păstrare a probelor experimentale [114, 158].

Pentru fiecare tip de tratament au fost testate câte trei probe. Valorile experimentale, pentru fiecare durată intermediară de atac al cavitației, din diagramele specifice testului de cavitație, sunt medii ale valorilor înregistrate pentru cele trei probe.

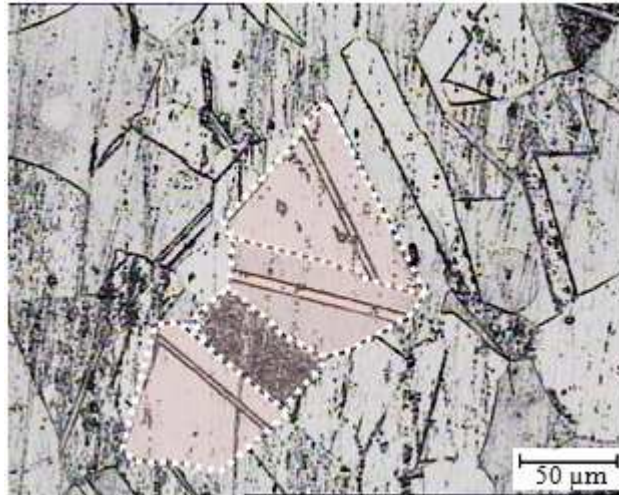
La începutul și finalul fiecărei perioade intermediare, de atac al cavitației, probele au fost cântărite, la balanța analitică Zatkłady, pentru determinarea masei de material pierdută prin eroziunea cavitației. De asemenea, la finalul perioadelor intermediare și al testului (165 minute) suprafețele expuse cavitației au fost fotografiate cu aparatul Canon și analizate la microscopul optic (OPTIKA, TESCAN VEGA 3 LMU Bruker EDX Quantax și OPLIMPUS SYX7), cu scopul urmăririi comportării și rezistenței la cavitație a microstructurii rezultate în urma tratamentului termic aplicat.

Se face mențiunea că, pe toată perioada de cercetare, parametrii funcționali ai aparatului, care determină intensitatea eroziunii cavitației, au fost menținuți la valorile prescrise de normele ASTM (frecvența vibrațiilor =  $20000 \pm 1$  % Hz, amplitudinea dubla a vibrațiilor =  $50 \mu\text{m}$ , temperatura apei distilate =  $22 \pm 1$  °C, puterea generatorului electronic de ultrasunete = 500 W).

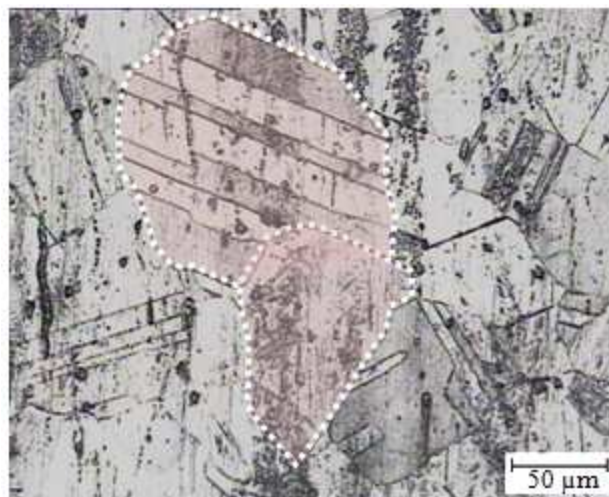
Figura 4.2a,b,c, exemplifică microstructura acestui oțel după aplicarea tratamentului de austenitizare la diferite temperaturi și durată constantă de încălzire urmată de o călire în apă. Ridicarea temperaturii de încălzire, de la 1000 °C la 1100 °C cu păstrarea constantă a duratei de menținere, antrenează, pe de o parte, dizolvarea în mare parte a carburilor și a fazelor intermetalice în austenită, respectiv o îmbogățire în carbon și în elemente de aliere a acestei faze, iar pe de altă parte, o creștere a dimensiunii grăunților cristalini de la  $45 \mu\text{m}$ , la  $80 \mu\text{m}$  (fig.4.7a,b,c).



a)



b)



c)

Fig.4.2 Microstructura probelor austenitizate la temperaturi diferite cu durată constantă de menținere: a) 1000 °C/25 min/apă; b) 1050 °C/25 min/apă; c)1100 °C/25 min/apă (Creșterea grăunților este marcată prin liniile întrerupte care-i delimitează)

În fig.4.3-4.5 sunt prezentate rezultatele testelor de cavitație, realizate pe cele trei variante ale regimului de călire volumică pentru punere în soluție (la temperaturi diferite de încălzire și aceeași durată de menținere). Acestea sunt reliefate prin punctele experimentale ale celor trei probe, testate pentru fiecare temperatură de încălzire și curba de mediere, care sugerează efectul temperaturii asupra comportamentului și rezistenței la cavitația generată de aparatul vibrator. Conform uzanței, curba a fost construită cu relațiile stabilite statistic, în cadrul laboratorului [15, 78, 83,120 ] (vezi procedura de determinare a valorilor și relațiile statistice prezentate în capitolul 2).

În fig.4.3a, 4.4a și 4.5a sunt date variațiile adâncimilor medii de eroziune cu durata atacului cavitației,  $MDE(t)$ , iar în fig.4.3b, 4.4b și 4.5b sunt redată vitezele experimentale, exprimate prin viteza de pătrundere a eroziunii,  $MDER$ , la diverse durate de atac al cavitației, conform normelor ASTM G32-2010 și curbele specifice de mediere,  $MDER(t)$ .

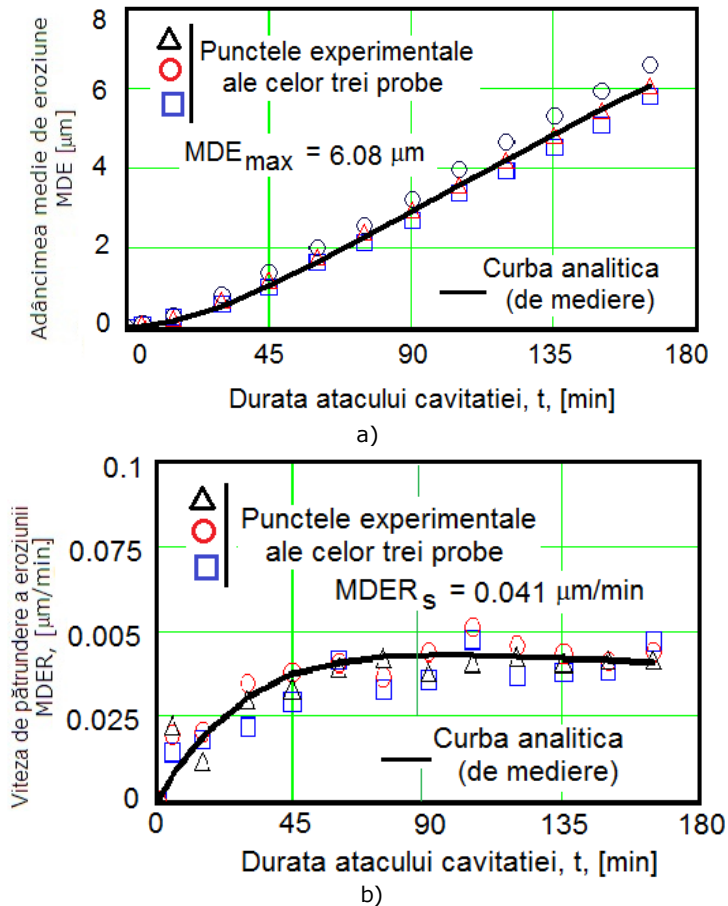
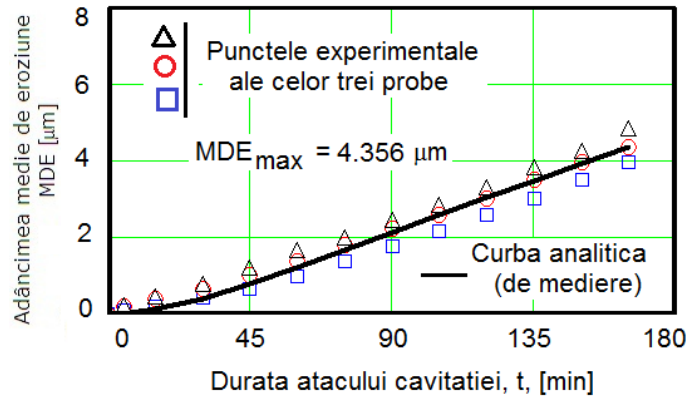
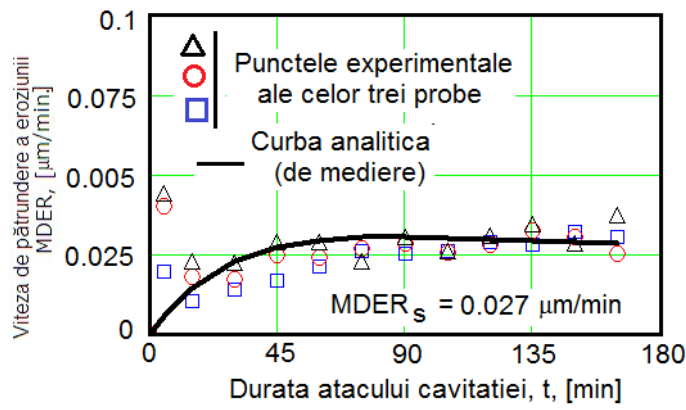


Fig.4.3 Curbele specifice de cavitație (1000 °C/25 min):

- variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației



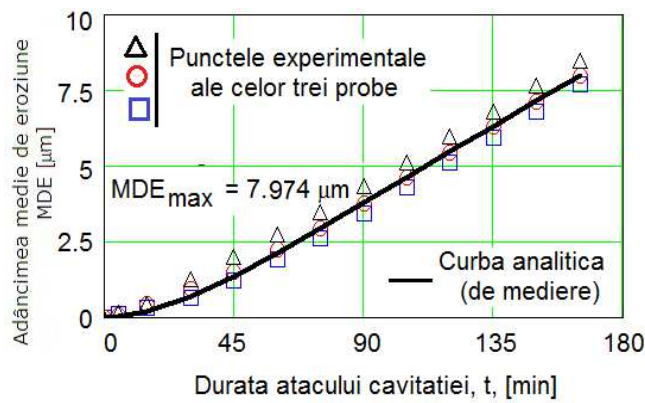
a)



b)

Fig.4.4 Curbele specifice de cavitație (1050 °C/25 min):

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavităției
- b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavităției



a)

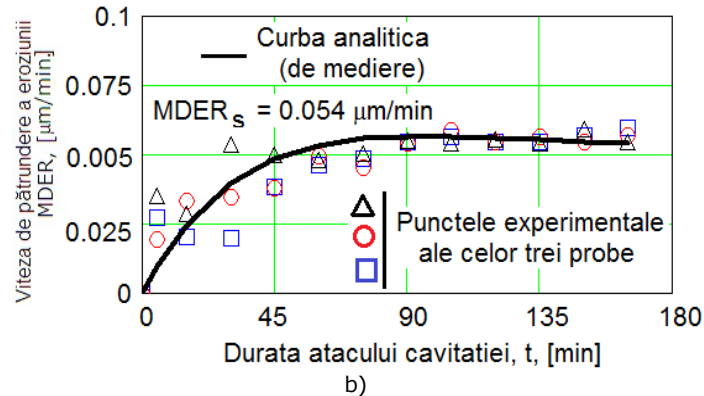


Fig.4.5 Curbele specifice de cavitație (1100 °C/25 min):

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Dispersiile reduse ale punctelor experimentale față de curbele MDE(t) și MDER(t), din diagramele prezentate în cele trei fig.4.3-4.5 arată că cele trei tratamente aplicate au condus la o omogenitate și creștere a proprietăților mecanice în suprafața expusă la cavitație, specifice materialelor cu foarte bună rezistență la eroziunea cavitației [15, 49, 70]. De asemenea, în diagramele vitezelor de pătrundere a eroziunii se observă o suprapunere a punctele experimentale la anumite durate de expunere (minutele 90, 105 și 120 pentru călirea la 1100 °C/25 min; minutele 105, 120 pentru călirea la 1050 °C/25 min; minutele 60 și 150 pentru călirea la 1000 °C/25 min) care arată comportarea aproape similară, la anumite durate de atac al cavitației. Atât dispersia punctelor experimentale, cât și modul de evoluție al curbelor de mediere, conform datelor furnizate de literatură, cu privire la comportarea oțelurilor inoxidabile la atacul cavitației [15, 54, 70, 83, 120, 125, 135, 142], arată că structura pe care o dobândește oțelul cercetat X5CrNi18-10, prin cele trei regimuri de călire, este una benefică pieselor solicitate la cavitație, mai ales pentru discul vanei fluture unde cavitația este mai redusă decât în rotoarele mașinilor hidraulice, contribuind, astfel, la creșterea substanțială a duratei de exploatare. Evident, după valorile de stabilizare a vitezelor adâncimilor de pătrundere a eroziunii MDERs și ale adâncimilor medii ale eroziunii MDEmax, la finalul cavitației (165 minute) - vezi datele din figuri - temperatura de 1050 °C oferă cea mai mare rezistență la cavitație, după cum se observă și din fig.4.6.

În fig.4.6 sunt prezentate, comparativ, curbele caracteristice de eroziune cavitațională, ce indică variația parametrilor MDE (adâncimea medie de pătrundere a eroziunii) și MDER (viteza medie de pătrundere a eroziunii) cu durata atacului cavitației vibratoare, pentru tratamentul termic caracterizat de valori diferite ale temperaturii de încălzire, aceleași valori pentru duratele de menținere și același mediu de răcire.

În aceste diagrame, așa cum s-a menționat anterior, valorile experimentale sunt medii ale celor trei probe testate, pentru fiecare tip de tratament termic. Curbele de mediere a punctelor experimentale, sunt construite cu relațiile analitice descrise la capitolul 2, construite în scopul caracterizării comportamentului și rezistenței la cavitație [15, 78, 83, 120].

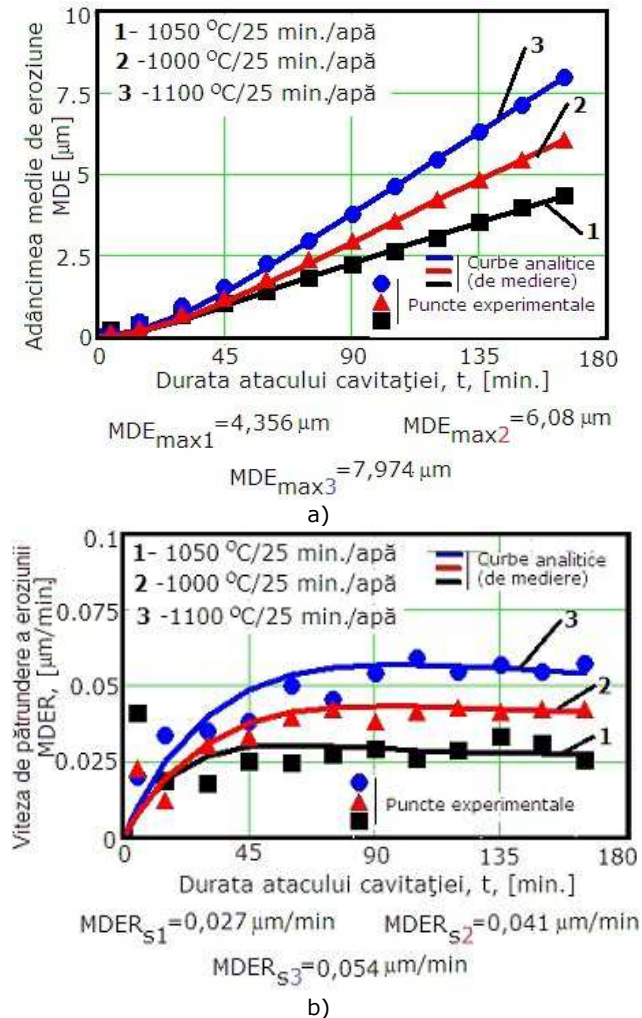


Fig.4.6 Curbele specifice de cavitație:

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Din modul de evoluție a curbelor de aproximare și a dispersiei punctelor experimentale se constată un comportament constant al suprafețelor la atacul cavitației, indiferent de temperatura de încălzire folosită la tratamentul termic. Conform rezultatelor obținute anterior și experienței de peste 70 ani ai cercetărilor în domeniu, se poate afirma că, prin regimurile de tratament aplicat, rezistența suprafeței la atacul cavitației vibratoare (reliefață prin stabilizarea vitezei de eroziune la valoarea maximă, fig.4.6b și prin variația liniară a curbelor MDE( $t$ ), de la circa 45 minute de atac până la finalizarea testării, fig.4.6a) este specifică materialelor cu o bună rezistență la cavitație.

Totuși, după dispersia punctelor experimentale față de curbele specifice, bine pusă în evidență prin diagrama din fig.4.6a, regimul cu temperatura de încălzire de 1050 °C oferă cea mai bună rezistență la eroziunea cavitației. După



valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza MDER (valoarea de final - la 165 minute), creșterea de rezistență la cavitație, obținută pentru regimul cu 1050 °C, este de circa 2 ori față de cea încălzită la 1100 °C și de circa 1,5 ori față de cea încălzită la 1000 °C.

După valoarea finală a lui MDE(t) - la 165 minute - creșterea de rezistență la cavitație, obținută pentru regimul cu 1050 °C, este de circa 1,8 ori față de cea încălzită la 1100 °C și de circa 1,4 ori față de cea încălzită la 1000 °C.

Investigarea, prin microscopie optică, a secțiunilor transversale prin suprafețele probelor astfel tratate termic și testate la cavitație (fig.4.7-4.9) alături de topografiile tipice ale suprafețelor probelor testate cavitațional timp de 165 minute (fig.4.10-4.11) au condus la următoarele observații:

- pierderile de material, respectiv cavernele produse la impactul dintre microjeturi/undele de șoc și suprafața expusă, se explică prin mecanismul ruperii ductile la toate cele 3 regimuri de austenitizare, fig.4.7-4.9);
- cele mai fine ondulații ale suprafețelor degradate, care demonstrează că atacul cavitațional s-a declanșat pe limitele grăunților și pe benzile de alunecare, apar la probele încălzite pentru austenitizare la 1050 °C, fig.4.7;
- deși temperatura de încălzire de 1000 °C asigură o granulație fină, păstrarea unei anumite proporții de carburi nedizolvate în soluția solidă (vizibile pe suprafața de rupere din fig.4.9) face ca degradarea suprafeței să fie ceva mai pronunțată comparativ cu probele tratate la 1050 °C;
- creșterea ușoară a granulației prin ridicarea temperaturii de încălzire la 1100 °C (fig.4.8) favorizează inițierea și dezvoltarea atacului cavitațional, deoarece suprafața limitelor dintre grăunți devine mai mică, rezistența la deformare plastică scade și viteza de eroziune prin cavitație se mărește;
- alături de o granulație fină, valorile mai mari de duritate favorizează creșterea rezistenței la inițierea și dezvoltarea fisurilor sub impactul microjeturilor și undelor de șoc create la implozia bulelor cavitaționale;
- o ecruisare mecanică și fazică a stratului de suprafață, (cu o grosime de 60...90 μm), determinată de acțiunea mecanică a imploziei bulelor cavitaționale, prin microjeturi și undele de șoc, respectiv de inducerea unei transformări martensitice.



Fig.4.7 Imagine microscopică a degradării structurii în secțiune transversală (x 200; Călire 1000 °C/25 min/apă)

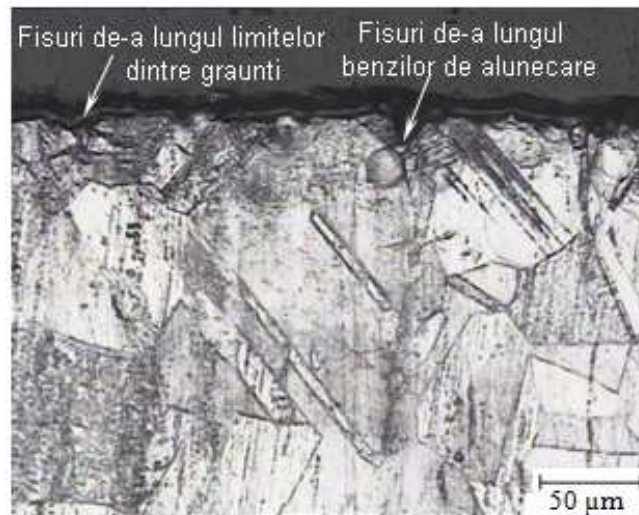


Fig.4.8 Imagine microscopică a degradării structurii în secțiune transversală (x 200; Călire 1050 °C/25 min/apă)



Fig.4.9 Imagine microscopică a degradării structurii în secțiune transversală (x200; Călire 1100 °C/25 min/apă)

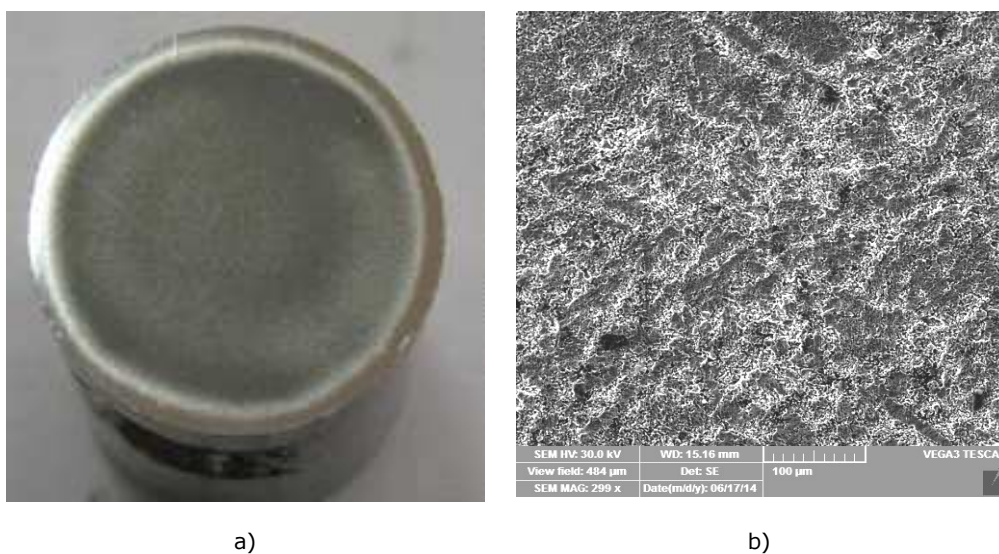


Fig.4.10 Imagini ale distrugerilor produse în structura suprafeței expuse atacului cavitației, timp de 165 minute (călire 1050 °C/25 min/apă): a) macrografia suprafeței erodate; b) microscopie electronică scanning x300

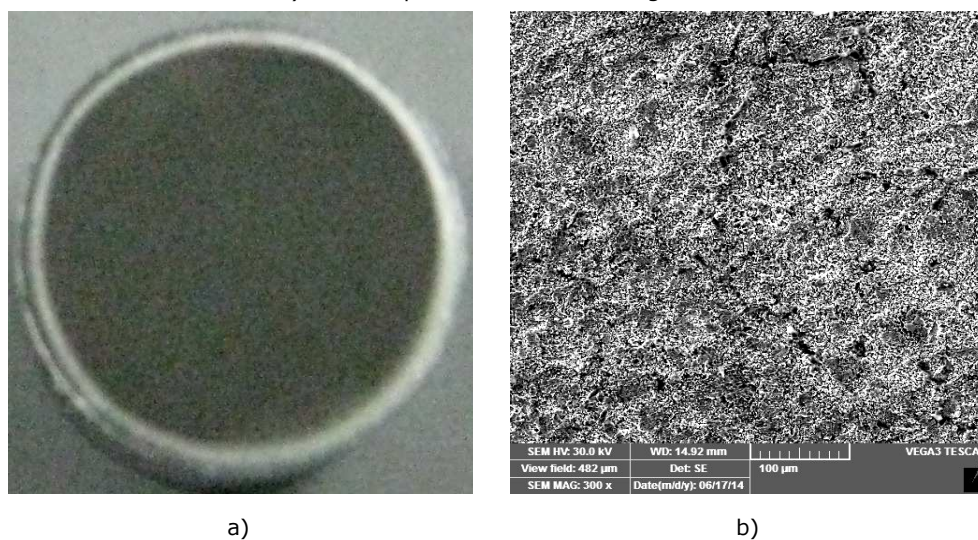


Fig.4.11 Imagini ale distrugerilor produse în structura suprafeței expuse atacului cavitației, timp de 165 minute (călire 1100 °C/25 min/apă): a) macrografia suprafeței erodate; b) microscopie electronică scanning, x 300

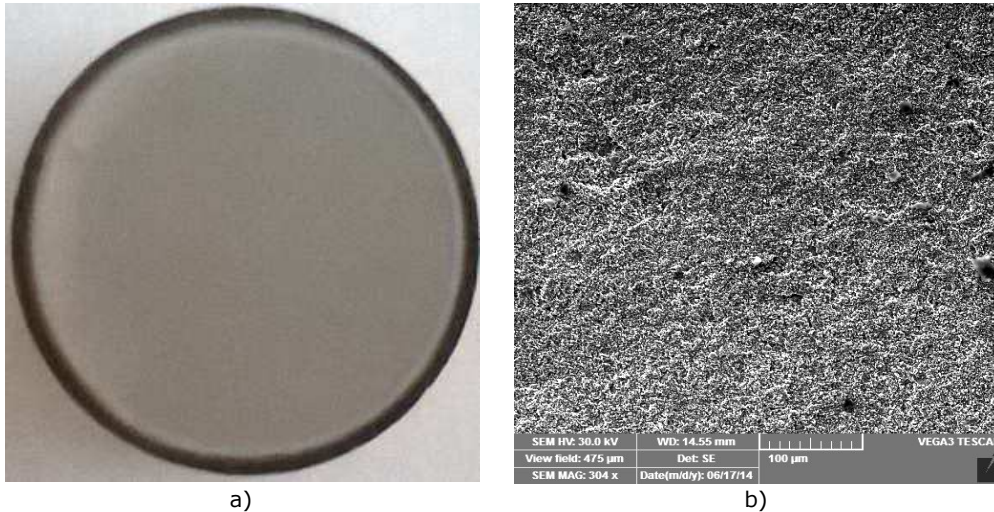


Fig.4.12 Imagini ale distrugerilor produse în structura suprafeței expuse atacului cavitației, timp de 165 minute (călire 1000 °C/25 min/apă): a) macrografia suprafeței erodate; b) microscopie electronic scanning, x 300

Conform unor date din literatura [106, 110, 111, 112], la unele oțeluri inoxidabile care au un grad de aliere ceva mai scăzut, austenita poate fi transformată în martensită atunci când temperatura  $M_s$  este mai mică, dar  $M_d$  este mai mare de 20 °C încât faza martensitică se formează prin deformare. Valoarea punctului  $M_s$  depinde de compoziția chimică a oțelului și poate fi apreciată cu relația [111]:

$$M_s = 1302 - 42 \times (\%Cr) - 61 \times (\%Ni) - 33 \times (\%Mn) - 28 \times (\%Si) - 1667 \times (\%C + \%N), \text{ } ^\circ\text{C} \approx - 96 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.1)$$

Această relație empirică este valabilă pentru următoarele limite de concentrație a elementelor prezente în compoziția chimică [111]: 10-18%Cr; 6-12%Ni; 0,6-5,0%Mn; 0,3-2,69%Si; 0,004-0,12%C; 0,01-0,06%N. Temperatura  $M_d$ , la care 50% din martensită este produsă sub acțiunea unei deformări de 30% se determină cu relația [111]:

$$M_d = 413 - 462 \times (\%C + \%N) - 9,2 \times (\%Si) - 8,1 \times (\%Mn) - 13,7 \times (\%Cr) - 9,5 \times (\%Ni) - 18,5 \times (\%Mo), \text{ } ^\circ\text{C} \approx 49 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

La anumite oțeluri inoxidabile austenitice se poate forma martensita hexagonală  $\epsilon$ , care poate conduce la formarea martensitei convenționale  $\alpha'$ . Cercetările anterioare [106, 110, 111] au arătat că aplicarea unor grade mici de deformare la rece conduce la formarea mai întâi a fazei  $\epsilon$  și apoi a fazei  $\alpha'$ , iar o deformare cu un grad ridicat, provoacă apariția prima dată a fazei  $\alpha'$  (fig.4.13). Martensita  $\alpha'$  este faza cea mai stabilă.

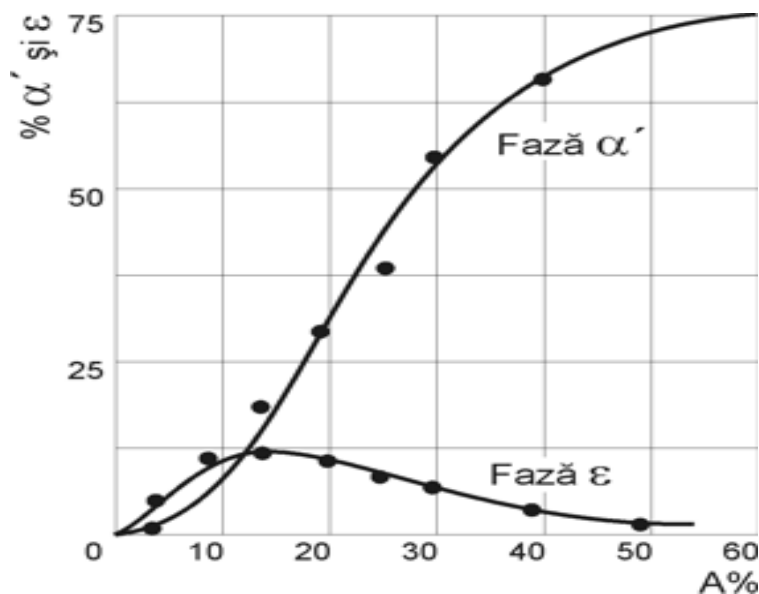


Fig.4.13 Influența deformării plastice asupra proporției de ε și α' formată într-un oțel 18/8 (18%Cr/8%Ni) cu conținut redus în carbon [95]

Tendința de formare a martensitei induse prin deformare se poate estima pe baza indicelui S de stabilitate a austenitei, calculat cu relația [106, 110, 111]:

$$S = E_{Cr} + E_{Ni} \quad (4.3)$$

în care:

$$E_{Cr} = \%Cr + 2 \times (\%Mo) + 0,5 \times (\%Si) = 18,39 \quad (4.4)$$

$$E_{Ni} = \%Ni + 30 \times (\%C + \%N) + 0,5 \times (\%Mn) + \%Cu = 10,49 \quad (4.5)$$

$$S = 18,39 + 10,49 = 28,88 \quad (4.6)$$

Austenita este stabilă la transformare numai dacă  $S > 33$ .

În consecință, stratul de suprafață ecruizat prin cavitație are o structură martensitică. Faza martensitică ε, nemagnetică, se formează în oțelurile inoxidabile austenitice care au o energie scăzută a defectelor de împachetare, sub 30–43 mJ/m<sup>2</sup> [106, 110, 111]. Ea se poate calcula cu relația:

$$E = 25,7 + 2 \times (\%Ni) + 410 \times (\%C) - 0,9 \times (\%Cr) - 77 \times (\%N) - 13 \times (\%Si) - 1,2 \times (\%Mn) = 31,3 \text{ mJ/m}^2 \quad (4.7)$$

Dacă  $M_d > T_{camerei}$ , la oțelurile 18-8, se formează prima dată faza ε, care ulterior tinde să dispară prin transformarea:  $\gamma \rightarrow \varepsilon \rightarrow \alpha'$ . Transformarea directă  $\gamma \rightarrow \alpha'$  continuă să se producă prin creșterea germeilor α' formați în urma reacției precedente.

Pe baza celor de mai sus, se poate concluziona că în urma alunecării atomilor la deformarea plastică prin cavitație se declanșează următoarele fenomene:

- formarea fazei hexagonale ε;

- formarea maclelor mecanice;
  - formarea martensitei  $\alpha'$  prin unul din următoarele mecanisme:  $\gamma \rightarrow \epsilon \rightarrow \alpha'$  sau  $\gamma \rightarrow \alpha'$ .
- Aceste două mecanisme pot coexista, preponderența unuia asupra altuia fiind strâns legată de parametrii reali și cei teoretici ai fazei  $\epsilon$ .

### Concluzii

Temperatura de încălzire de 1050 °C asigură condiții optime de austenitizare (dizolvarea fazelor secundare și o granulație fină), care justifică obținerea celei mai bune rezistențe la eroziune prin cavitație.

Viteza medie de pătrundere a eroziunii, MDER, pentru probele austenitizate la 1050 °C este de cca. 2 ori mai mică față de cea a probelor austenitizate la 1100 °C și de circa 1,5 ori mai mică comparativ cu a probelor tratate la 1000 °C.

Indiferent de valoarea temperaturii de austenitizare, atacul cavitațional se declanșează pe limitele grăunților cristalini și pe benzile de alunecare, iar pierderea de material se produce prin rupere ductilă.

### 4.2.2. Călirea pentru punere în soluție cu durate diferite de încălzire

Variația duratei de menținere între 5 min și 50 min la temperatură constantă de austenitizare (1050 °C) se manifestă în special prin creșterea dimensiunii grăunților cristalini de la 35  $\mu\text{m}$ , la 60  $\mu\text{m}$  (fig.4.14, fig.4.7b și fig. 4.10b), ca urmare a intensificării fenomenelor de difuzie a carbonului și a elementelor de aliere.

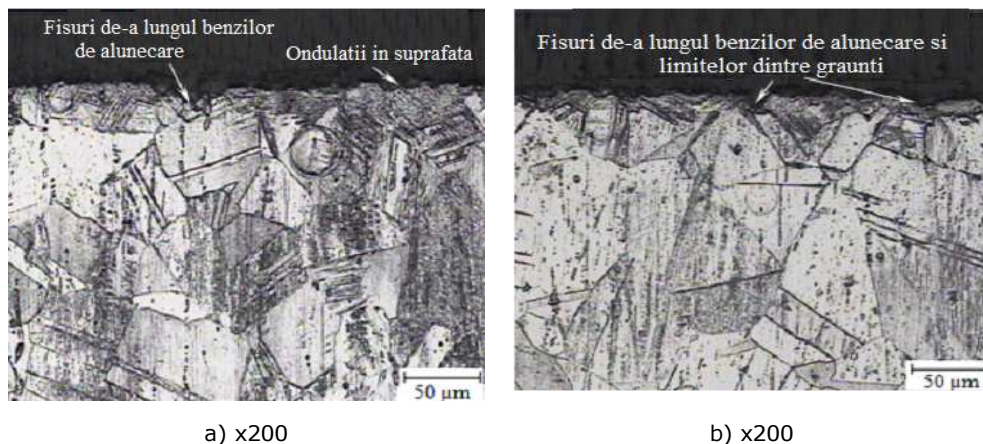
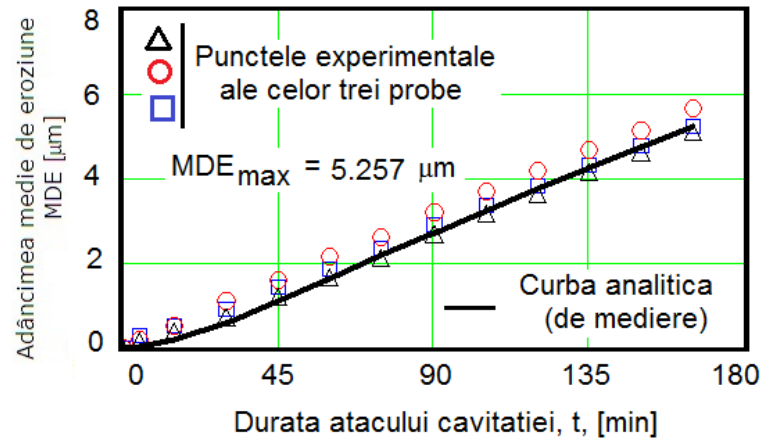
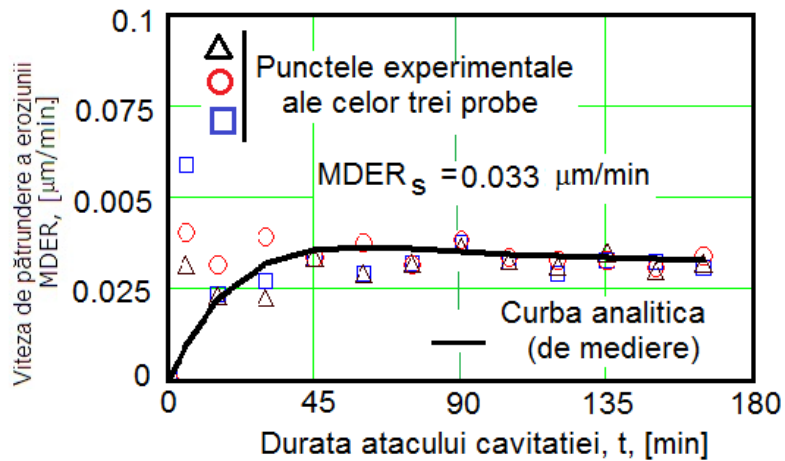


Fig.4.14 Microstructura probelor austenitizate la temperatură constantă și durate variabile de menținere: a) 1050 °C/5 min/apă; b) 1050 °C/50 min/apă

În fig.4.15 și 4.16 sunt redade rezultatele experimentale, ale testului de cavitație, sub formă de puncte experimentale și cube specifice, ale adâncimii medii de eroziune MDE, respectiv vitezei medii de pătrundere a eroziunii MDER.



a)



b)

Fig.4.15 Curbele specifice de cavitație (1050 °C/5 min):

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitatiei  
b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitatiei

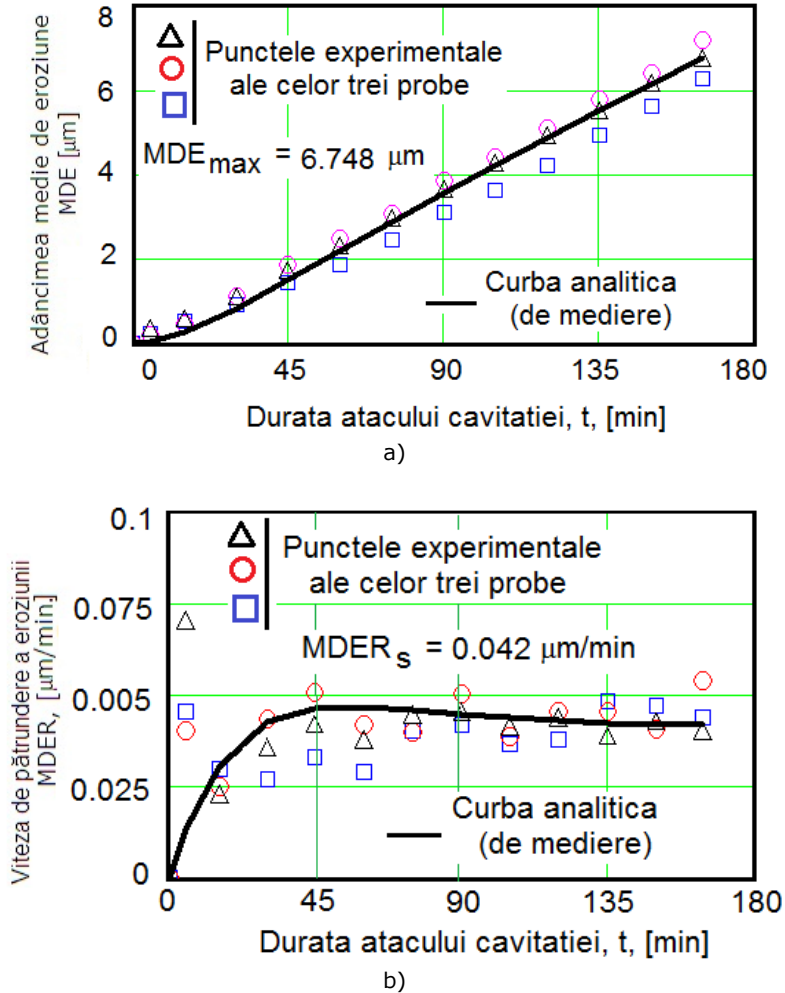


Fig.4.16 Curbele specifice de cavitație (1050 °C/50 min):  
 a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Dispersia punctelor experimentale ale celor trei probe, pentru fiecare procedeu de tratament, indiferent de durata de încălzire, față de curbele de mediere, precum și evoluția în timp a curbelor  $MDER(t)$ , cu tendință de stabilizare la valoarea maximului vitezei, sunt elemente care arată că suprafețele cavitate au o comportare și rezistență ridicate la cavitație. Similar analizei realizate pe rezultatele de cavitație, din fig.4.3-4.5, se observă că și prin călirea volumică cu punere în soluție la 1050 °C/5 min, la anumite perioade de atac al cavitației (minutele 75, 90, 105 și 135), vitezele de eroziune  $MDER$ , pentru cele trei probe sunt identice. Acest aspect confirmă acuratețea tratamentului, dar și omogenitatea proprietăților mecanice în suprafața cavitată.

Și în acest caz, dispersia redusă a punctelor experimentale, față de curbele de mediere, precum și suprapunerea valorilor  $MDER$ , în anumite momente ale atacului cavitației vibratoare, sunt elemente ce arată că structura rezultată prin



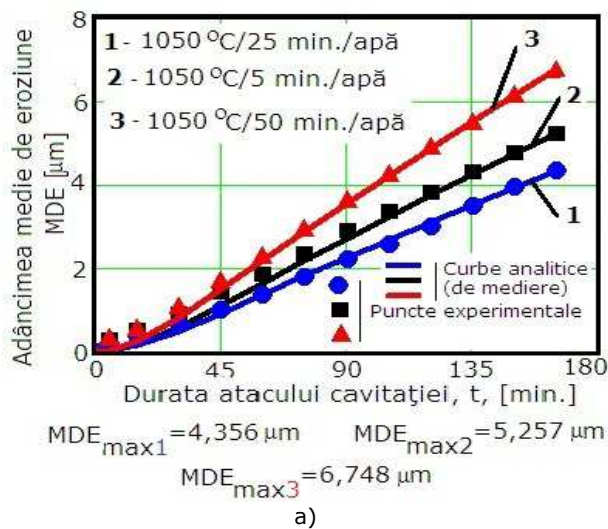
tratamentele aplicate, cu durate diferite de încălzire (5 sau 50 minute), la temperatura de 1050 °C, este una fină cu legături puternice între grăunții constituenților structurali.

După valorile de stabilizare a vitezelor medii de pătrundere a eroziunii MDERs și ale adâncimilor medii ale eroziunii MDEmax, la finalul cavitației (165 minute) - vezi datele din fig.4.15 și 4.16- durata de 5 minute oferă o rezistență la cavitație mai mare decât durata de 50 minute (MDEmax = 5,257 μm față de 6,748 μm, respectiv MDERs = 0,033 μm/min față de 0,042 μm/min).

Prin urmare și aceste tratamente se recomandă aplicării pieselor solicitate la cavitație.

Pentru evidențierea diferenței de rezistență la cavitație, între suprafețele călite la 1050 °C, dar cu durate diferite de încălzire (5 min, 25 min, 50 min), în fig.4.17 sunt comparate curbele caracteristice de eroziune cavitațională, ce indică variația parametrilor MDE și MDER cu durata atacului cavitației vibratoare.

Similar procedurii de construire a acestor curbe descrisă la subcapitolul 4.3.1, conform cutumei laboratorului, în strictă conformitate cu recomandările normelor ASTM G32-2010 [158], valorile experimentale sunt medii ale celor trei probe testate, pentru fiecare tip de tratament termic.



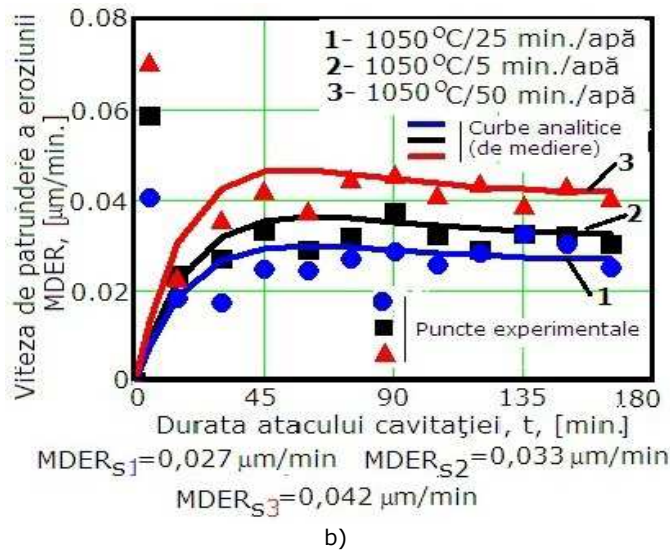


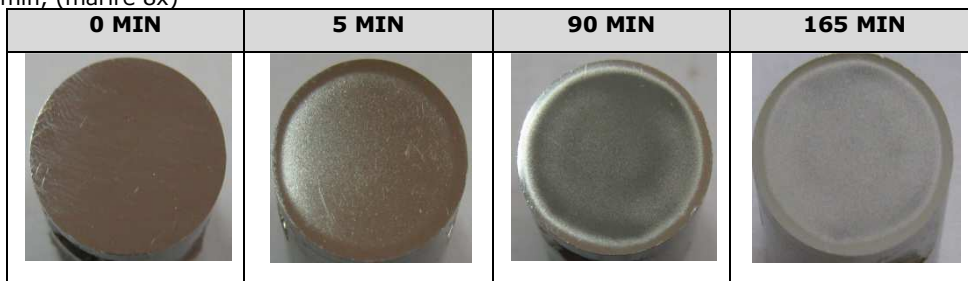
Fig.4.17 Curbele specifice de cavitație:

- c) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației
- d) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

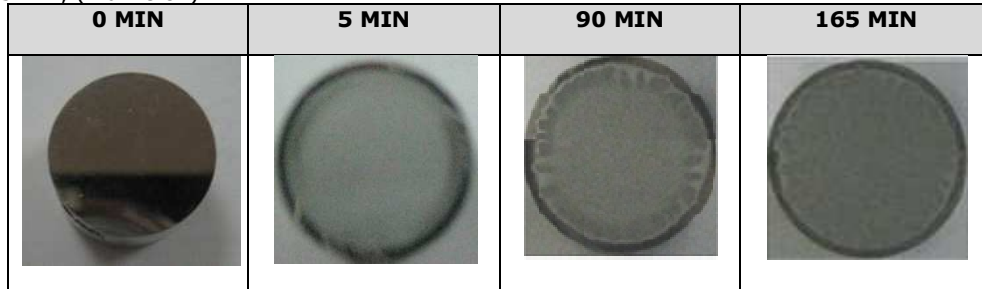
Din fig.4.17a, se constată că adâncimea medie de pătrundere a eroziunii pentru probele austenitizate la 1050 °C pe o perioadă de 50 minute, este de cca. 1.5 ori mai mare față de cea a probelor austenitizate la 1050 °C pe o perioada de 25 minute și de cca. 1.3 ori mai mare comparativ cu probele tratate la 1050 °C timp de 5 min. Din fig.4.17b, se constată că valoarea spre care tinde să se stabilizeze parametrul MDER (viteza medie de pătrundere a eroziunii), pentru probele austenitizate la 1050 °C pe o perioadă de 50 minute, este de cca. 1,6 ori mai mare față de cea a probelor austenitizate la 1050 °C pe o perioada de 25 minute și de cca. 1.3 ori mai mare comparativ cu probele tratate la 1050 °C timp de 5 min.

De asemenea, se constată că, indiferent de curba specifică, este o diferență redusă între evoluțiile curbelor MDE (t), fig.4.17a și MDER (t), fig.4.17b, pentru probele austenitizate timp de 25 minute și 5 minute. Explicația constă în mecanismul transformărilor realizate prin tratament și distrugerea, aproape identică, a suprafeței expuse, așa cum rezultă din fotografiile realizate cu aparatul fotografic și la microscopul optic, din imaginile din tabelele 4.2-4.5.

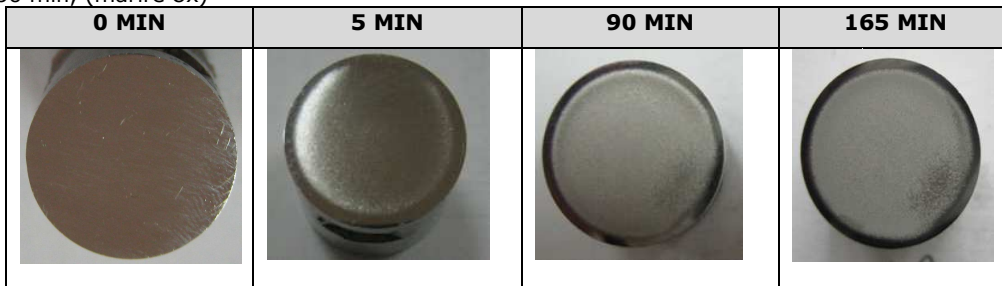
Tabelul 4.2 Macrografia suprafeței erodate pentru proba călită la 1050 °C – timp de menținere 5 min, (marire 8x)



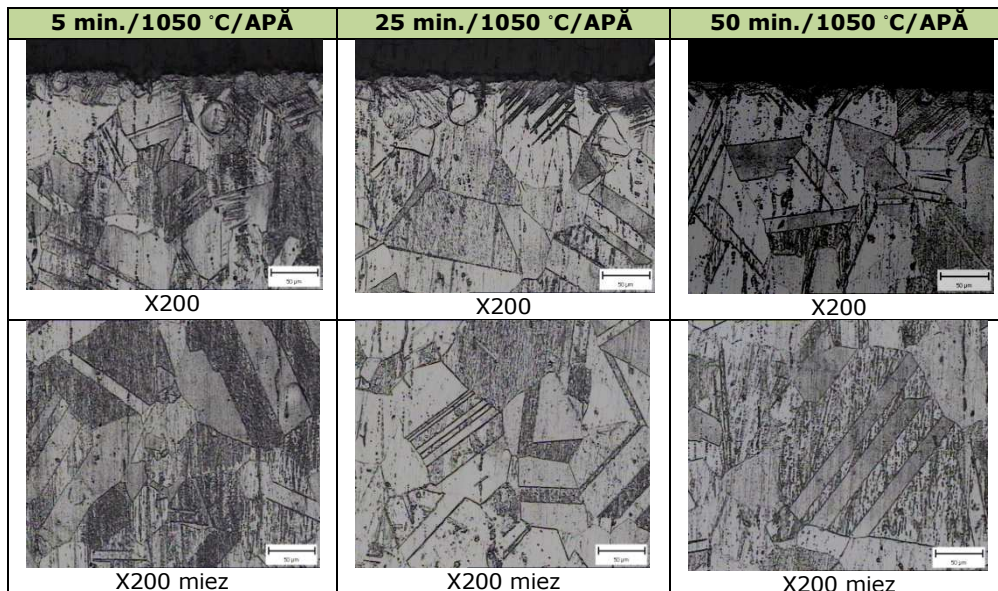
Tabelul 4.3 Macrografia suprafeței erodate pentru proba călită la 1050 °C – timp de menținere 25 min, (marire 8x)



Tabelul 4.4 Macrografia suprafeței erodate pentru proba călită la 1050 °C – timp de menținere 50 min, (marire 8x)



Tabelul 4.5 Microscopia optică pentru probele călite de la 1050 °C



În imaginile din tabelele (4.3 - 4.5) se pun în evidență aspectele suprafeței erodate cavitațional. Se constată că, indiferent de durata de menținere, eroziunea produsă este uniformă în întreaga suprafață expusă, cu evoluții ale adâncimilor în concordanță cu rezultatele testelor efectuate.

De asemenea, se observă că pentru ambele durate de austenizare considerate, suprafața probelor cavitate prezintă o degradare aproximativ uniformă. Comportările ușor diferite exprimate prin pittingurile din structura suprafețelor, sunt explicate, pe de o parte, prin diferențele apărute în privința gradului de punere în soluție a carburilor de crom și de faze intermetalice, iar pe de altă parte, prin schimbări ale dimensiunii grăunților cristalini; ambele fenomene determinând mici variații ale durezzații Vickers.

Curbele de distribuție a microdurezzații pe secțiunea transversală a stratului afectat de atacul cavitațional (fig.4.18) vin să confirme rezultatele investigațiilor anterioare în privința ecrusării mecanice și fizice a acestuia. Ele reliefează următoarele aspecte:

- microdurezzația maximă a suprafeței are valori de 380...400 daN/mm<sup>2</sup>;
- adâncimea stratului ecrusat este cuprinsă între 60 și 90 μm ;
- microdurezzația miezului este influențată în mai mică măsură de temperatura de încălzire pentru punere în soluție.

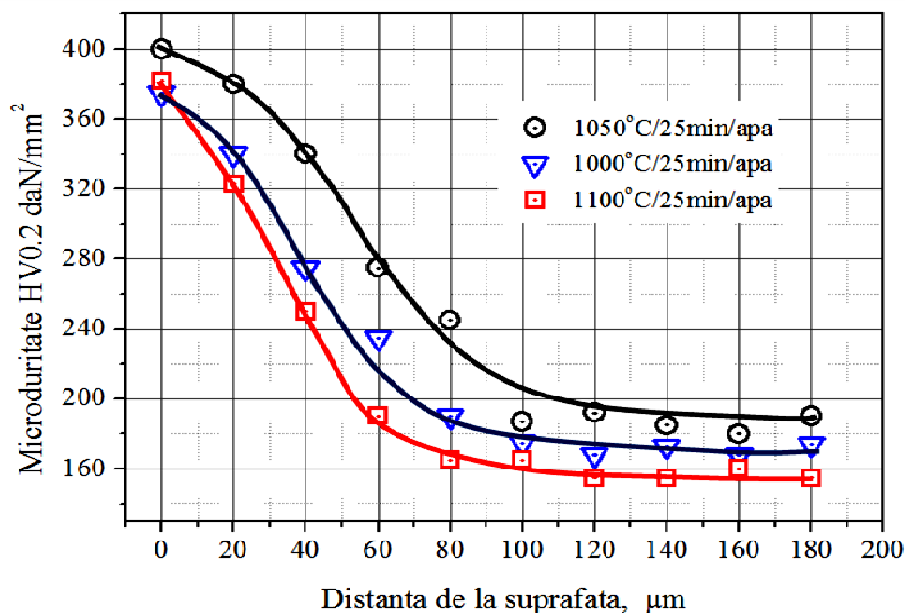


Fig.4.18 Curbe gradient de duritate pe secțiunea transversală a suprafeței probei testate cavitațional

#### 4.2.3. Corelarea parametrilor de rugozitate cu rezistența la eroziunea prin cavitație

Măsurarea rugozităților s-a efectuat pe aparatul Mitutoyo SJ 201 P, de la Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Sudură și Încercări de Materiale, din Timișoara. Rezistența la cavitație este dată de parametrul  $R_{cav}$ , și reprezintă

inversul vitezei de pătrundere a eroziunii în structura materialului, MDER, definită de normele ASTM [158] și calculată cu relațiile stabilite în [15].

În diagramele din fig.4.19-4.23 sunt redată profilogramele rugozităților, înregistrate în zone, din suprafața cavitată timp de 165 minute, arbitrar alese pe o lungime de 4 mm.

Profilograma rugozităților din aceste figuri, alături de imaginile microscopice ale degradării structurii, din fig.4.10-4.12 - pentru călire volumică la temperatură constantă a încălzirii cu durate diferite de menținere, respectiv imaginile din tabelul 4.5, confirmă nivelul adâncimilor de pătrundere a eroziunii, dar și modul diferit de dispersie a punctelor experimentale, față de curbele de mediere, din digramele MDER(t)- fig.4.6b și 4.17b. Totodată, aceste profilograme sugerează și efectul durificării stratului cavitat, ușor vizibil în imaginile microscopice care dau degradarea structurală.

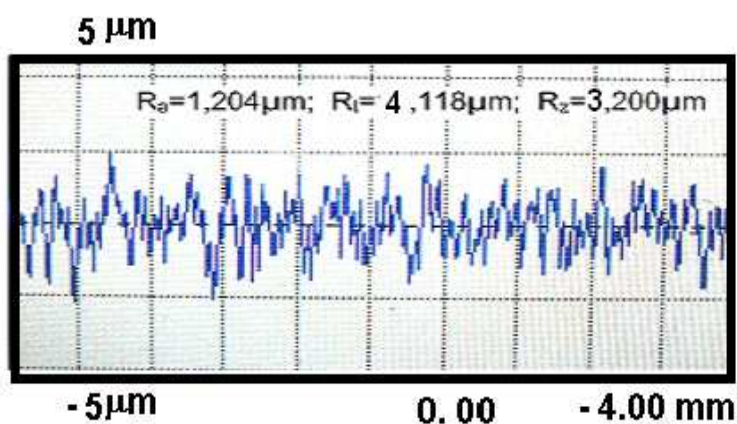


Fig.4.19 Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație timp de 165 minute (Călire 1050 °C/5 min/apă)

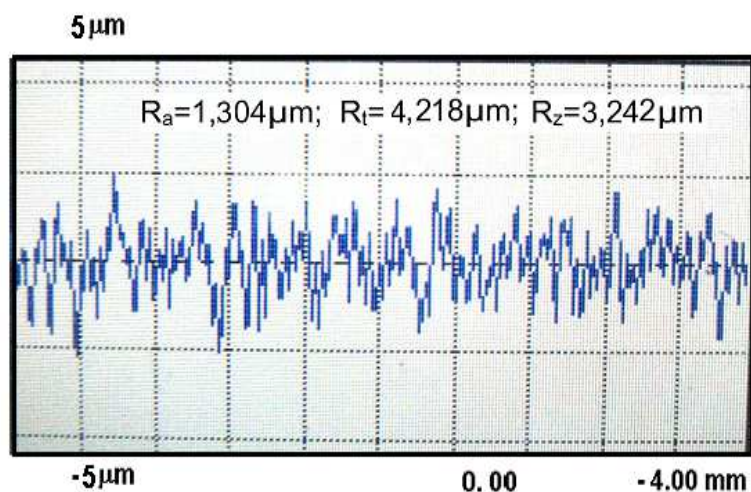


Fig.4.20 Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație timp de 165 minute (Călire 1050 °C/25 min/apă)

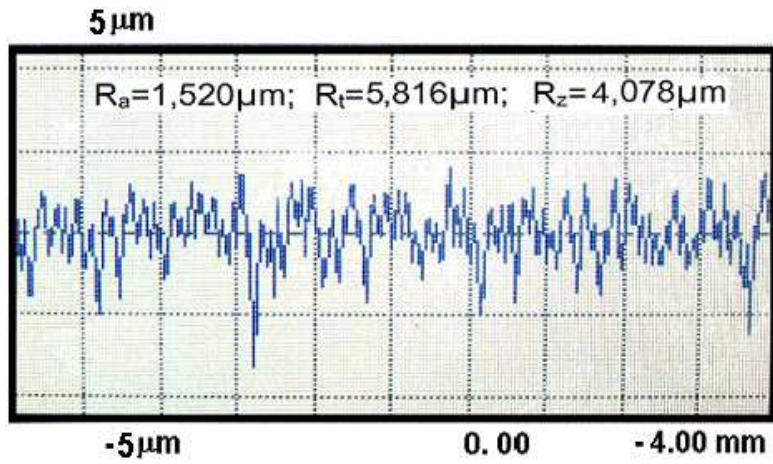


Fig.4.21 Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație timp de 165 minute (Călire 1050 °C/50 min/apă)

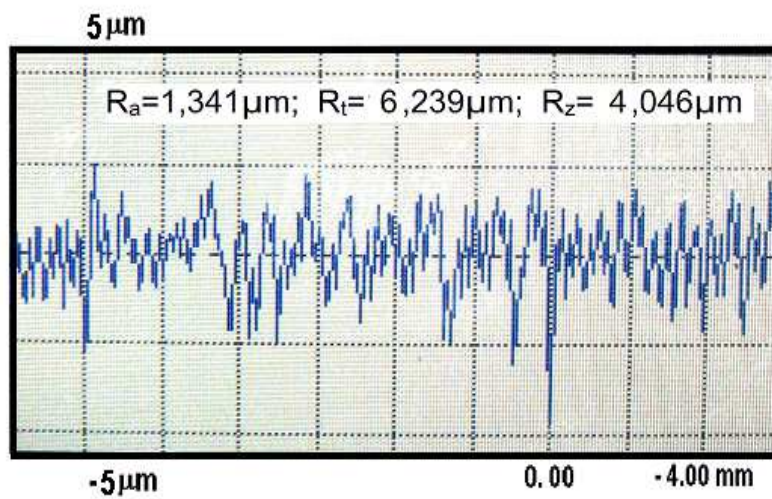


Fig.4.22 Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație timp de 165 minute (Călire 1100 °C/25 min/apă)

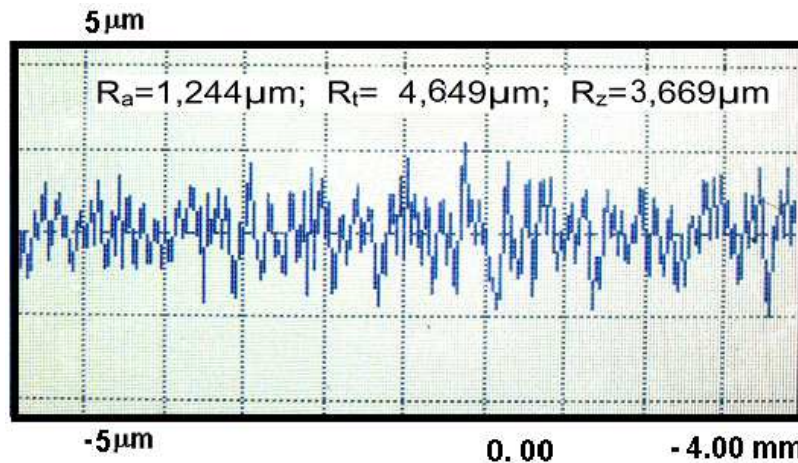


Fig.4.23 Măsurarea rugozităților pe suprafața erodată prin cavitație timp de 165 minute (Călire 1000 °C/25 min/apă)

Din fig.4.19-4.23 se constată că cele mai mici valori ale parametrilor rugozității  $R_a$ ,  $R_t$  și  $R_z$  apar la probele călite în apă de la temperatura de 1050 °C cu durate de menținere de 25 min.

În fig.4.24 sunt comparate valorile principalilor parametri ai rugozității ( $R_z$  și  $R_t$ ) cu ale adâncimii medii de pătrundere a eroziunii, după 165 minute de atac al cavitație și ale rezistenței la cavitație, calculată ca invers al valorii spre care tinde să se stabilizeze viteza medie de pătrundere a eroziunii (conform relației  $R_{cav} = 1/MDERS$ - unde  $s$  se semnifică stabilizarea).

Parametrul  $R_z$ , conform procedurii de calcul, prin forțare, având în vedere lungimea mică de măsurare cu aparatul Mitutoyo, poate fi asimilat parametrului eroziunii cavitației MDE, pe lungimea respectivă. Diferențele firești, din fig.4.23, sunt date de alegerea arbitrară a locului în care s-a înregistrat profilograma rugozității și de modul de calcul al parametrului MDE (care ia în considerare suprafața probei expusă la cavitație, de diametru  $d = 15,8$  mm-vezi capitolul 2).

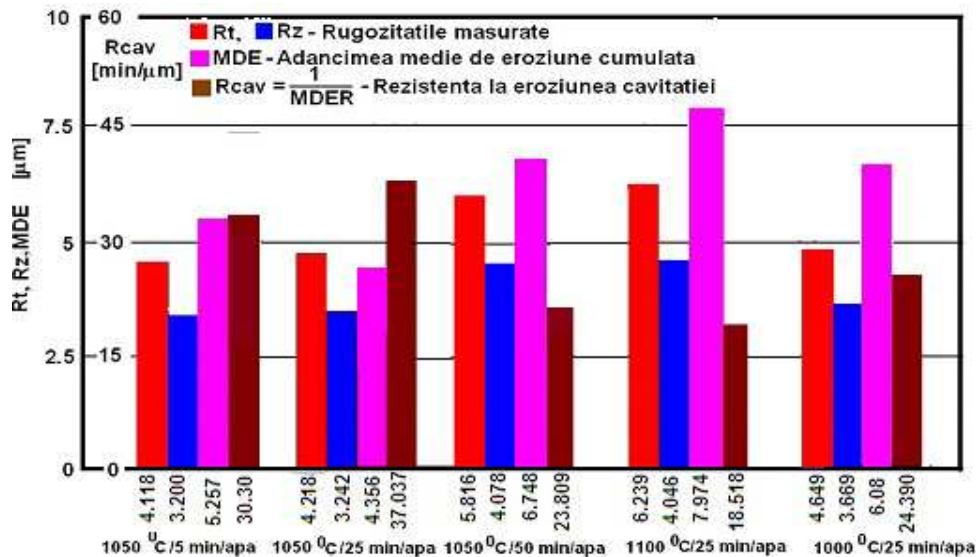


Fig.4.24 Corelarea parametrilor de rugozitate cu cei caracteristici eroziunii prin cavitație

Comparația din fig.4.24 arată că datele experimentale obținute atestă că rugozitatea suprafeței este o mărime fizică sensibilă rezistenței la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile austenitice, existând o bună corelație cu rezultatele testelor de cavitație. Printre cele mai mici valori ale rugozității Ra, Rt și Rz apar la probele călite în apă la temperatura de 1050 °C cu durate de menținere de 25 min. Astfel, rugozitatea Rz este similară practic cu cea a probelor călite de la 1050 °C timp de 5 min, care au cea mai mare duritate determinată de prezența carburilor rămase nedizolvate în matricea austenitică și mai mare cu circa 20 % la probele călite de la 1100 °C, care au cea mai mică duritate, întrucât austenita este mai omogenă și cu granulație mărită.

### 4.3. Compararea cu oțelul etalon OH12NDL

Pentru evaluarea comportării și rezistenței la cavitație, cu realizarea unei imagini de aplicație practică, rezultatele obținute sunt comparate cu ale oțelului inoxidabil OH12NDL, de referință pentru cercetările realizate în Laboratorul de Cavitație al UP Timișoara. Acest oțel, folosit la paletel turbinelor Kaplan și bulb de la CHE Porțile de Fier I și II, este considerat ca fiind cu bună rezistență la cavitația vibratoare, datorită performanțelor sale, dovedite de durata mare de exploatare [1, 2, 15].

În tabelul 4.6 este prezentată compoziția chimică a oțelului etalon, iar în tabelul 4.7 valorile principalelor caracteristici de rezistență mecanică.

Tabelul 4.6 Compoziția chimică a oțelului etalon OH12NDL [15]

Material	Compoziție chimică %								
	C	Si	Mn	S	Cr	Fe	Ni	P	Cu
OH12NDL	0.1	0.3	0.4	0.03	12.8	rest	1.25	0.09	0.9



Tabelul 4.7 Caracteristicile mecanice al oțelului etalon OH12NDL [15]

$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_{p0.2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	HB[daN/mm <sup>2</sup> ]
650	400	225

În fig.4.25 sunt comparate curbele caracteristice de eroziune cavitațională MDE(t) și MDER(t).

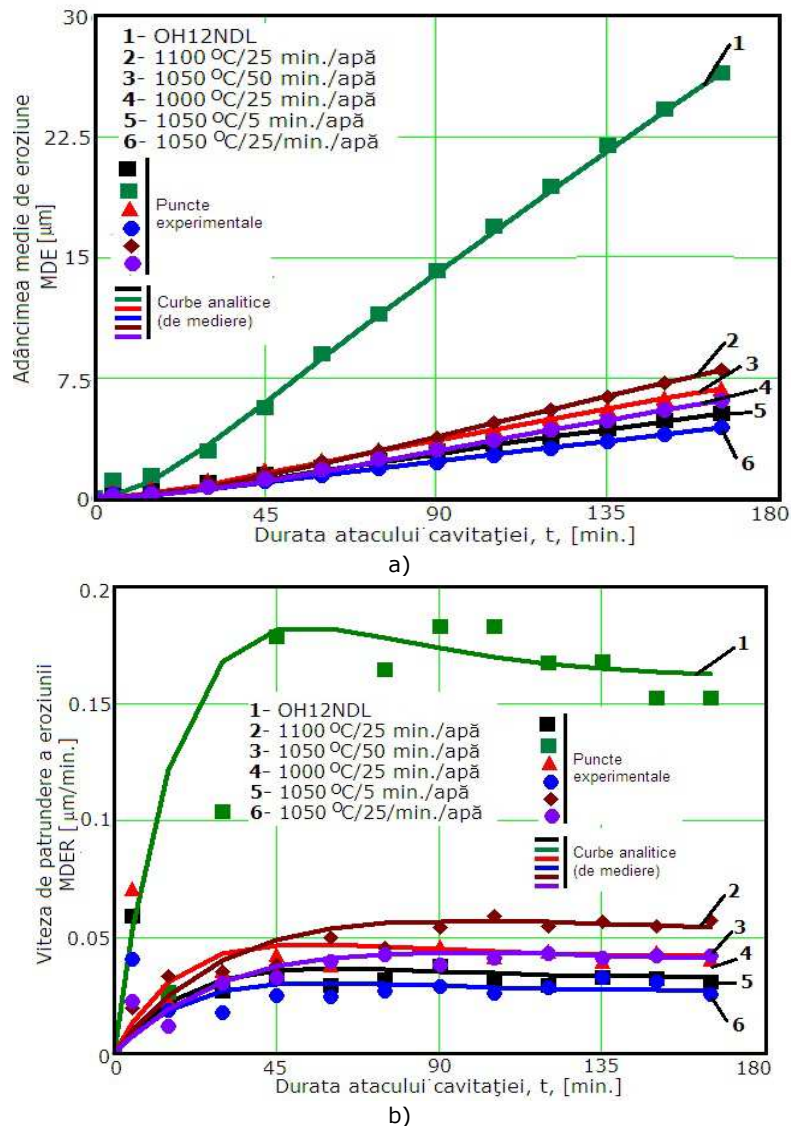


Fig.4.25 Curbele specifice de cavitație:

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Din diagramele prezentate în fig.4.25 rezultă că, indiferent de duratele de menținere și temperaturile de încălzire ale tratamentului termic volumic de călire prin punere în soluție, oțelul X5CrNi18-10 are o rezistență mai mare la eroziunea prin cavitație decât oțelul OH12NDL. Efectul este determinat atât de compoziția chimică (proporții mai mari de crom și nichel) cât și de nivelul caracteristicilor mecanice, în special al durității. De asemenea prezența sulfurii, în procent mai mare la oțelul etalon, înrăutățește proprietățile mecanice și în special tenacitatea (KCU, KV) și ductilitatea (A, Z) [110, 111], vizibile în rezistența la eroziunea cavitațională [10, 78, 83, 125].

Astfel:

- viteza medie de pătrundere a eroziunii, MDER, pentru oțelul etalon OH12NDL este de cca. 6 ori mai mare față de cea a probelor probele austenitizate la 1050 °C pe o perioada de 25 min și de cca. 3 ori mai mare comparativ cu probele tratate la 1100 °C timp de 25 min;

- oțelul cercetat, cu oricare dintre tratamentele termice de călire studiate, poate fi utilizat la fabricarea diverselor echipamente exploatate în regim de cavitație dezvoltată.

#### 4.4. Concluzii

**1.** Pentru oțelurile inoxidabile austenitice, tratamentul termic de călire pentru punere în soluție reprezintă o modalitate eficientă de îmbunătățire a rezistenței pieselor solicitate la eroziunea prin cavitație, așa cum sunt echipamentele hidromecanice.

**2.** Efectuarea acestui tratament termic, oțelului inoxidabil austenitic X5CrNi18-10, la temperatura de 1050 °C cu durată de menținere de 25 min și răcire bruscă în apă, asigură o creștere a rezistenței la eroziunea cavitației de circa 1,5 ori față de cea încălzită timp de 50 min și de circa 1,2 ori față de cea încălzită timp de 5 min, după valoarea adâncimii de eroziune, calculată la final de atac al cavitației, respectiv de circa 1,5...1,3 ori, după valoarea lui MDER, din zona de stabilizare.

**3.** Variația temperaturii de încălzire pentru punere în soluție (1000 °C, 1050 °C, 1100 °C) cu păstrarea constantă a duratei de menținere (25 min), se manifestă printr-o schimbare nesemnificativă a rezistenței la degradare prin cavitație dacă temperatura este la limita inferioară (1000 °C) și devine importantă, dacă temperatura de austenitizare se află la limita superioară (1100 °C).

**4.** Rezultatele cercetărilor prezentate arată că oțelul austenitic X5CrNi18-10, prin tratamentul termic aplicat dobândește o rezistență, la eroziunea prin cavitație, mai mare decât oțelul etalon martensitic OH12NDL, de referință pentru paletetele și rotoarele turbinelor hidraulice din hidrocentralele românești și rusești.

**5.** Intensificarea fenomenelor de difuzie a carbonului și a elementelor de aliere odată cu ridicarea îndeosebi a temperaturii de încălzire și în mai mică măsură a duratei de menținere, provoacă schimbări ale gradului de omogenitate chimică și ale dimensiunii grăunților de austenită, ambele fenomene justificând modificarea rezistenței la eroziune prin cavitație.

**6.** Fisurile de cavitație sunt localizate cu preponderență pe limitele grăunților și de-a lungul maclelor de recoacere, iar mecanismul de degradare este cel al ruperii ductile.

**7.** Adâncimea stratului ecrusat mecanic și fazic are valori de 60...90 μm, iar microduritatea maximă atinsă la suprafață, HV0.2 = 380-400 daN/mm<sup>2</sup>.

## 5. INFLUENȚA TRATAMENTULUI TERMOCHIMIC DE NITRURARE ASUPRA REZISTENȚEI LA CAVITAȚIE

### 5.1. Introducere

Tratamentele termochimice sunt procese de îmbogățire a suprafeței pieselor într-un anumit element chimic (cel mai des C, N, Br, Al), prin difuzia acestuia în stare atomică pornind de la un mediu exterior aflat la temperatură înaltă. Ele constau în încălzirea pieselor la o temperatură dată, într-un mediu solid, lichid sau gazos care eliberează ușor atomii elementului de îmbogățire urmată de o menținere la temperatura stabilită și de o răcire ulterioară [39, 112].

Comparativ cu tratamentele termice, tratamentele termochimice provoacă, în straturile de suprafață ale pieselor, atât modificări de structură cât și modificări de compoziție chimică [42]. În acest fel se creează o diferență netă de structură și proprietăți între stratul de suprafață și miezul piesei, care uneori poate fi accentuată prin aplicarea ulterioară a unor tratamente termice [39].

Piesele la care se aplică sunt de o largă diversitate dimensională și constructivă.

Dintre multiplele avantaje [39, 112] pe care le prezintă utilizarea tratamentelor termochimice, cele care vizează mărirea duratei de exploatare în condițiile unor solicitări cavitaționale sunt:

- creșterea durtății suprafeței și implicit a rezistenței la uzare;
- mărirea rezistenței la oboseală;
- creșterea rezistenței la solicitările de contact și la smulgerea stratului;
- menținerea unor valori ridicate ale caracteristicilor de ductilitate și tenacitate, care fac ca miezul să poată prelua solicitările dinamice din funcționare.

Literatura de specialitate [39], funcție de elementul de îmbogățire și scopul urmărit, menționează 11 tipuri de tratamente termochimice, des folosite: cementarea (carburarea), nitrurarea, cianizarea, aluminizarea, cromizarea, brunarea, borizarea, feroxarea, silicizarea, sulfizarea, zincarea. Dintre acestea, doar patru sunt vizate/folosite în aplicațiile ce vizează creșterea rezistenței suprafețelor la eroziunea produsă de atacul cavitației, și anume:

- 1. cementarea (numită și carburare)** - constă în îmbogățirea stratului superficial în carbon (0,7...1,1 %) și se aplică oțelurilor cu un conținut în carbon de 0,1...0,25 %. Grosimea stratului carburat este de (0,5)1...2 mm, și se caracterizează printr-o durtate ridicată, cu rezistență sporită la solicitările de uzare, oboseală și la cele create de presiunea de contact, dar cu rezistență scăzută la șoc. Este foarte des aplicată oțelurilor folosite la fabricarea supapelor și sertarelor aparatelor de comandă, distribuire și reglare din cadrul sistemelor hidraulice de acționare, [131];
- 2. carbonitrurarea (numit și cianizare)** - constă în îmbogățirea simultană a stratului superficial în carbon și azot, astfel încât după tratament stratul ajunge la 0,8...0,9 % carbon și 0,3...0,4 % azot, cu o durtate de peste 700 HV, ce conferă suprafeței o bună rezistență la uzare, la presiunea de contact, la

oboseală și la șocuri. Se aplică oțelurilor folosite la fabricarea supapelor, scaunelor de supape, sertarelor aparatelor de comandă, distribuție și reglare ale sistemelor hidraulice de acționare [39, 131];

3. **borizarea** – constă în îmbogățirea stratului superficial în bor, cu realizarea unei grosimi de maxim 0,15 mm și a unei duriții ridicate, de 1600...2000 HV0.1. Din acest motiv, cel mai des, se aplică la piesele solicitate la uzare abrazivă. Din literatura parcursă nu s-a remarcat folosirea expresă a acestui tratament la piesele solicitate la cavitație, chiar dacă rezultatele de rezistență la solicitările abrazive sunt satisfăcătoare [9];
4. **nitrurarea** – constă în îmbogățirea stratului superficial în azot. Este des folosit la piesele din oțel de tip palete, supape, sertare aparate hidraulice de distribuție, comandă și reglare [12, 39].

Din tratamentele prezentate mai sus, în cadrul acestui capitol se studiază doar cel de nitrurare realizat prin pentru tehnica nitrurării în gaz și cu fascicul laser.

## 5.2. Nitrurarea în gaz

Ca procedeu, nitrurarea în mediul gazos reprezintă un tratament termochimic de îmbogățire în azot a straturilor superficiale ale pieselor, având ca rezultat formarea de nitruri, ce favorizează creșterea semnificativă a duriții [112].

Avantajul nitrurării în gaz îl reprezintă grosimea stratului, de ordinul zecimilor de milimetru, caracterizat de o duriitate de până la 1100 HV, rezistență mare de contact, la uzare și oboseală, precum și o foarte bună capacitate de preluare a șocurilor [39]; calități foarte importante pentru suprafețele solicitate la cavitație. Un alt mare avantaj al nitrurării în gaz îl reprezintă păstrarea caracteristicilor mecanice din miez (tenacitate mare), la fel de importante pentru piesele supuse solicitărilor mecanice ale curgerii cavitaționale.

### 5.2.1. Cercetări experimentale

#### 5.2.1.1. Procedura de tratament

Experiențele practice și rezultatele cercetărilor din laboratoarele de specialitate [15, 27, 70, 125] arată ca oțelurile inoxidabile, datorită caracteristicilor mecanice și structurale, sunt materialele care conferă o rezistență importantă la cavitație, ce se îmbunătățește substanțial prin tratamente termochimice, cum este **nitrurarea în mediu gazos**. Astfel, în conformitate cu obiectivele tezei, oțelul inoxidabil austenitic X5CrNi18-10 fost supus tratamentului de nitrurare, cu durata de menținere de 40 ore, în mediu gazos pentru a crește rezistența și comportarea la cavitație. Acesta a fost realizat în conformitate cu ciclograma din fig.5.1 și a constat din încălzirea probelor într-un cuptor cu atmosferă controlată de azot, la temperatura de 560°C. Prin această tehnică, azotul aflat în stare atomică în atmosfera cuptorului, a pătruns prin difuzie în straturile superficiale ale probelor, combinându-se chimic atât cu fierul, cât și cu elementele de aliere, dând naștere unor nitruri. Răcirea s-a făcut odată cu cuptorul de tratament, în atmosferă de amoniac până la circa 150°C, după care s-a continuat în aer. Înainte de nitrurarea în gaz, suprafețele probelor, care urmau a fi solicitate la cavitație, au fost rectificat plan la o rugozitate  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$  (vezi imaginea macro din fig.5.2).

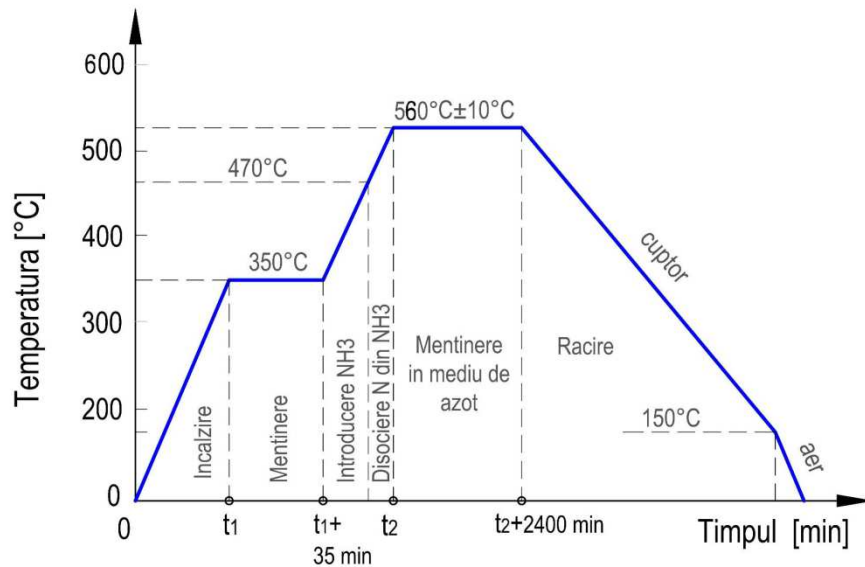


Fig.5.1 Ciclogramă tratament termochimic de nitrurare in gaz

Fig.5.2 Imaginea suprafeței probei înainte de începerea atacului cavitației (minutul 0;  $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ )

Întrucât prin nitrurare, crește duritatea stratului, au fost făcute măsurători de microduritate, conform schemei din fig.5.3. În fig.5.4 este redată curba de variație a microdurității pe secțiunea transversală a probelor nitrurate, care arată că la suprafață valoarea este semnificativ crescută. Explicația este dată de prezența cromului ca element principal de aliere, formator de nitruri, care provoacă această creștere pronunțată a durității, până la valori de cca. 860 – 880 HV0.05. Adâncimea stratului nitrurat, definită ca fiind distanța de la suprafață până la punctul în care duritatea depășește pe cea a miezului cu 50 HV, are valori de 0,14 mm.

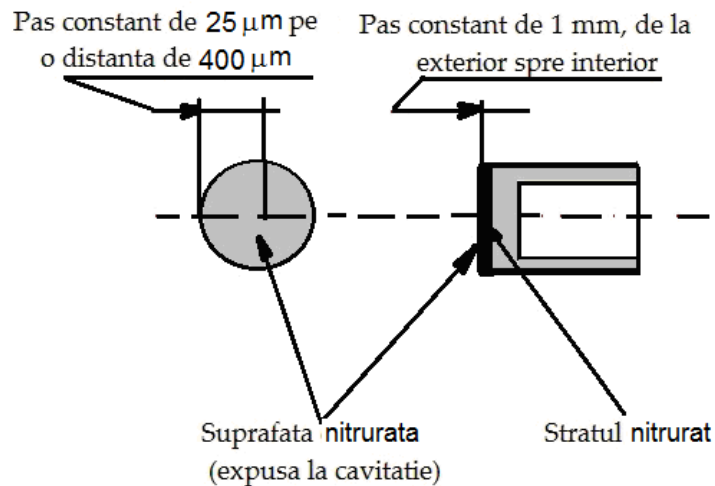


Fig.5.3 Schema măsurării durității stratului nitrurat

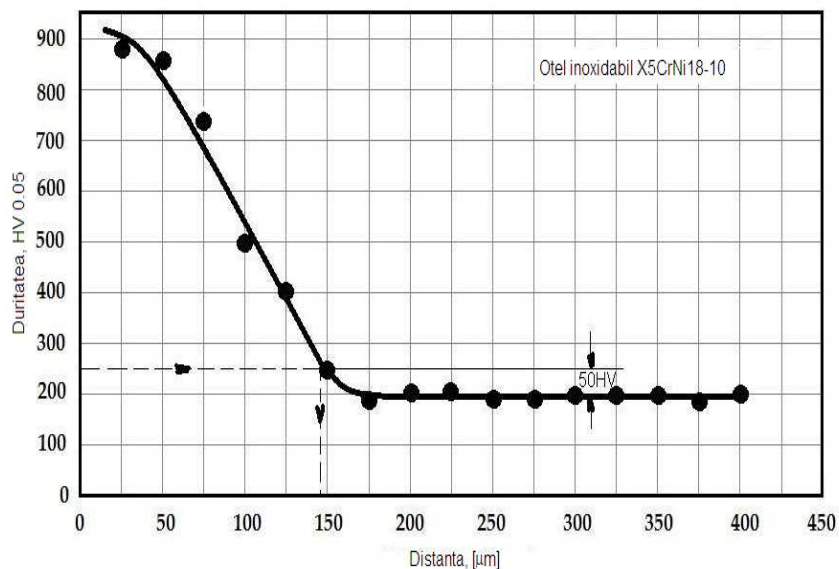


Fig.5.4 Curba gradient de duritate pe secțiunea stratului nitrurat în gaz

### 5.2.1.2. Rezultatele testului de cavitație

Cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației a fost realizată pe trei probe, în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, pe aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, în condițiile descrise la capitolul 4, cu privire la procedura de pregătire, testare și înregistrare, evaluare și prelucrare a rezultatelor.

### a) Rezultate experimentale

Pentru analiza comportării au fost construite diagramele din fig.5.5 în care sunt redate valorile experimentale înregistrate la timpii intermediari de testare și curbele de mediere ale acestora, ce exprimă variația în timp a adâncimii medii de pătrundere a eroziunii  $MDE(t)$ , fig.5.5a, respectiv a vitezei medii de pătrundere a eroziunii  $MDER(t)$ , fig.5.5b. Curbele de mediere a punctelor experimentale au fost construite cu relațiile analitice, prezentate în capitolul 2.

Pentru evidențierea evoluției eroziunii cavitației, ca indicator al comportării stratului nitrurat la impactul cu microjeturile și undele de șoc, rezultate din implozia bulelor cavitaționale, în tabelul 5.1 sunt prezentate imaginile macro la patru durate ale atacului cavitațional, realizate cu un aparat de fotografiat, tip Canon Power Shot, de rezoluție ridicată (16 pixeli).

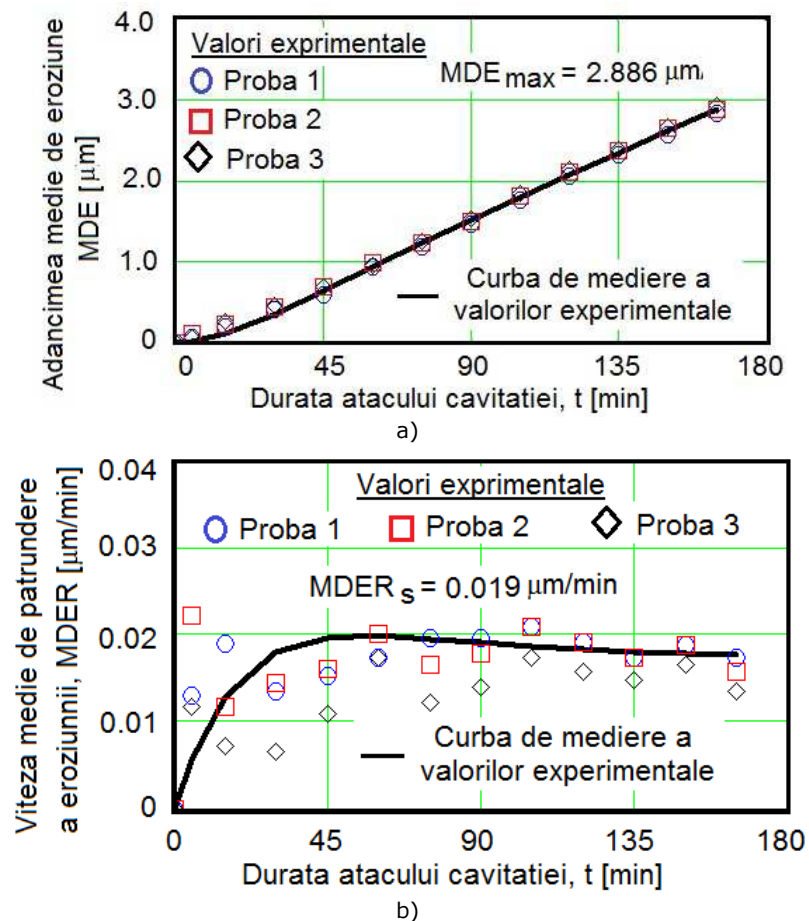



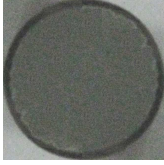



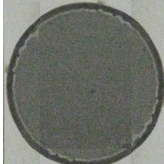



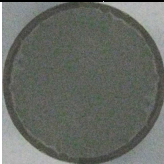


Fig.5.5 Curbele specifice ale eroziunii prin cavitație  
a) Variația adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației  
b) Variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Figura 5.5a arată o variație liniară a curbei  $MDE(t)$ , începând cu minutul 15, ceea ce sugerează că stratul nitrurat are o rezistență foarte mare la distrugerea prin

cavitație, cauzată de duritatea ridicată pe care o are (860... 880 HV<sub>0.05</sub>, fig.5.4). De asemenea, se observă că după 45 de minute ale atacului cavitației, diferențele dintre valorile MDE, ale celor trei probe testate, rezultate din măsurători, sunt nesemnificative. Acest mod de comportare sugerează comportări similare, ale celor trei probe, la atacul cavitației vibratoare. Însă, diagrama din fig.5.5b, arată o dispersie aleatoare a valorilor experimentale față de curba MDER(t). Prin urmare, există diferențe între rezistențele pe care straturile nitrurate ale celor trei probe le au față de solicitările mecanice, rezultate din impactul cu undele de șoc și microjeturile. După modul de suprapunere a valorilor experimentale, probele 1 și 2, în anumite momente ale atacului (minutetele 30, 45, 105, 120, 135 și 150), se comportă aproape identic, spre deosebire de proba 3 care se comportă total diferit. Aceste dispersii ale valorilor experimentale, față de curba de mediere MDER(t), sunt în concordanță cu evoluțiile eroziunii în stratul nitrurat, reliefat de imaginile din tabelul 5.1.

Tabelul 5.1 Imagini macro ale evoluției degradării suprafeței (stratului nitrurat)

Durata atacului cavitației [minute]			
45	90	135	165
Proba 1			
			
Proba 2			
			
Proba 3			
			

Imaginile de la minutele 90 și 135 arată o distrugere, aproape identică a suprafețelor probelor 1 și 2. Imaginile de la finalul atacului (minutul 165) arată că eroziunea cavitației s-a extins pe întreaga suprafață a celor trei probelor. Diferențele sunt reduse, nesemnificative. Acest aspect este confirmat și de apropierea valorii MDER a probei 3, de valorile înregistrate pentru probele 1 și 2, începând cu minutul 150.

Forma florală, spre periferie, pe care suprafețele cavitate o au, din primele minute atacului cavitației până aproape de final (165 minute) arată o dispersie neuniformă a durității pe suprafața plană a stratului nitrurat.

Cu toate acestea, diferența redusă dintre valoarea maximă a parametrului MDER și cea spre care tinde să se stabilizeze MDER<sub>s</sub>, arată că nitrurarea în gaz a



oțelului inoxidabil X5CrNi18-10, cu structură preponderent austenitică, este o soluție de creștere a rezistenței sale la efectul distructiv al cavitației.

### b) Rezultatele examinărilor de rugozitate

Analiza, chiar și cu ochiul liber, a suprafeței cavitate arată o degradare care poate fi evaluată și pe baza parametrilor rugozității. În acest scop, utilizând aparatul Mitutoyo SJ 210, fig.5.6, pe fiecare din cele trei probe s-au realizat înregistrări ale profilogramei suprafeței cavitate.

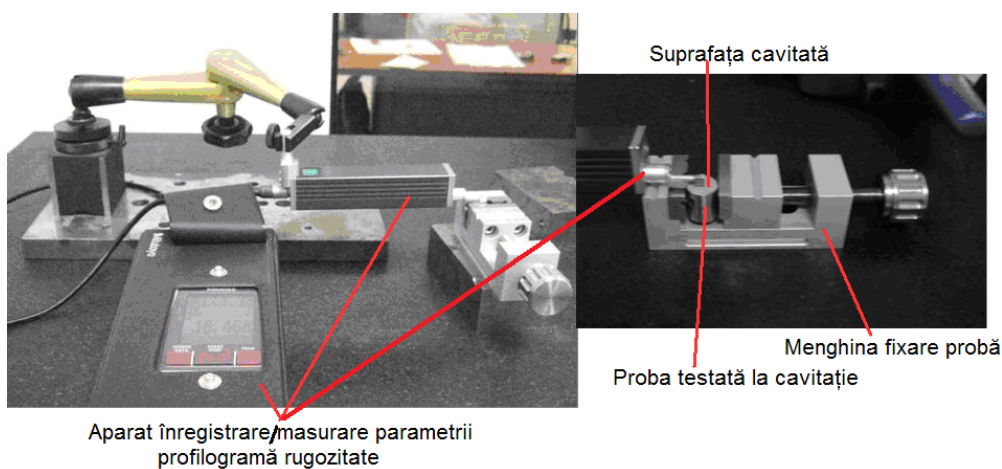
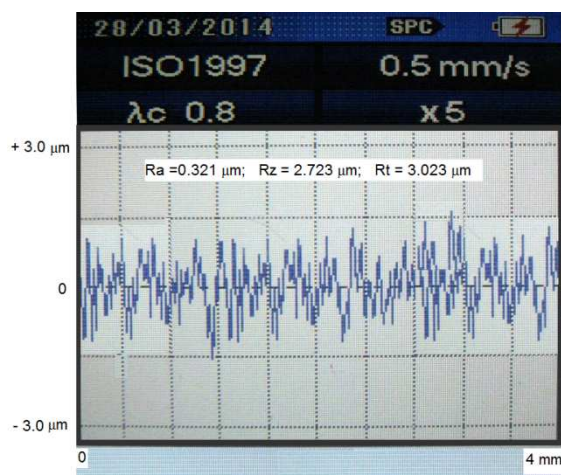


Fig.5.6 Aparatul MITUTOYO SJ 210 (ISIM)

În fig.5.7-5.9 sunt date profilogramele înregistrate pe lungimi de 4 mm, în zone arbitrare alese, respectiv valorile parametrului Rz, măsurate pe trei raze dispuse la aproximativ 120° una față de cealaltă.



Profilograma rugozității

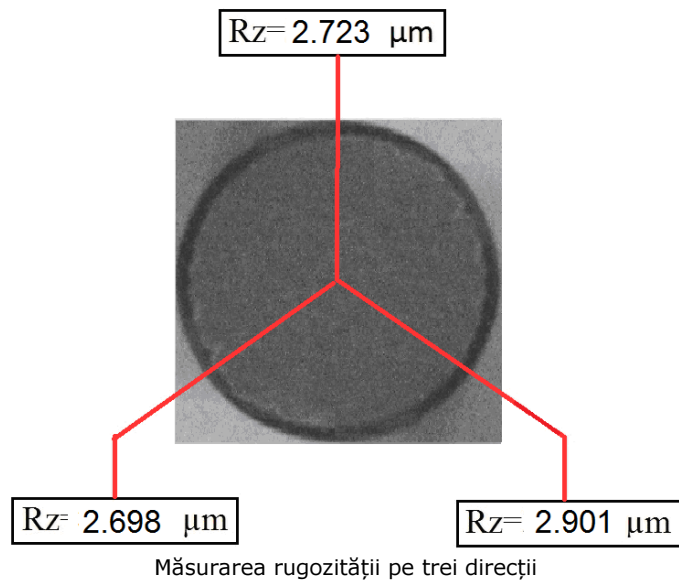
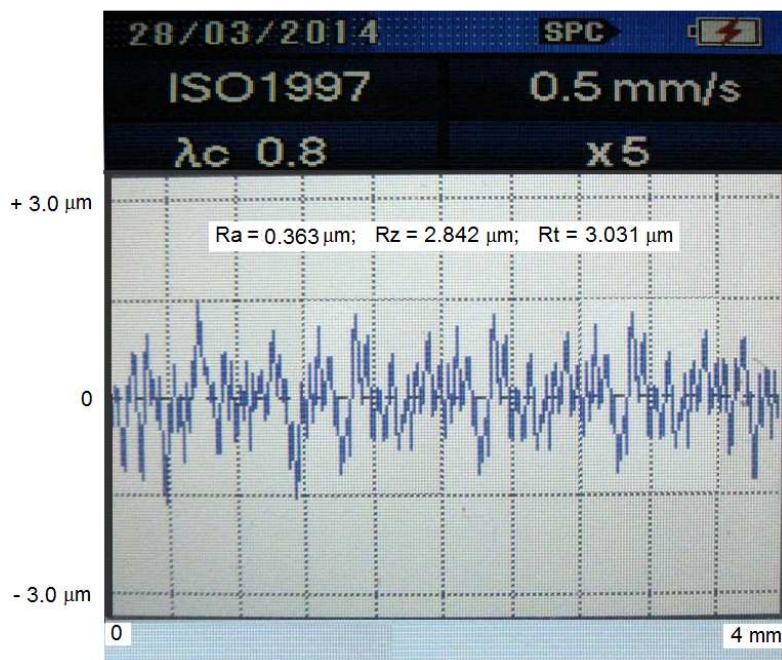
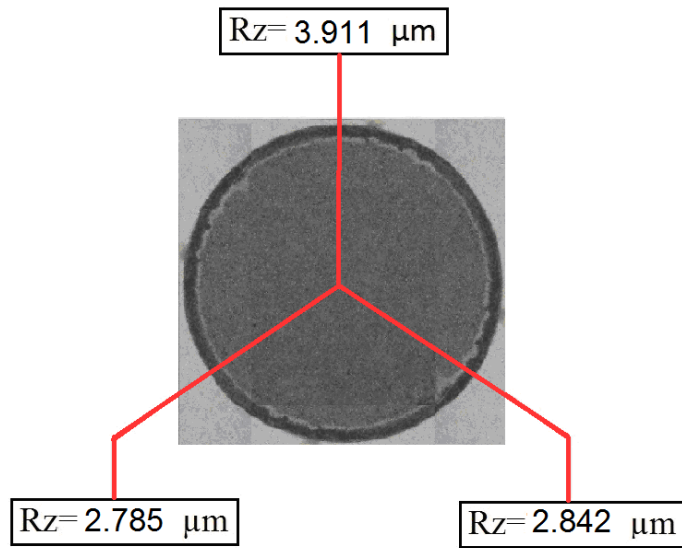


Fig.5.7 Valorile rugozității înregistrate pe suprafața erodată de cavitație timp de 165 minute (Proba 1)

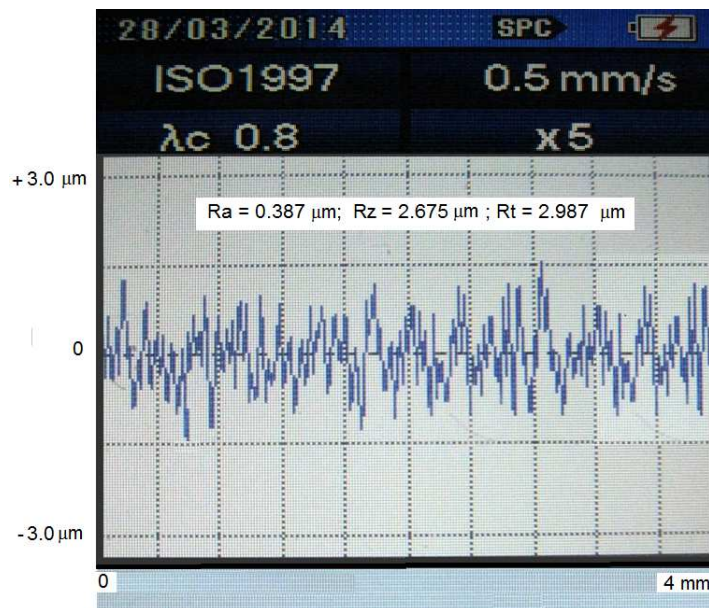


Profilograma rugozității



Măsurarea rugozității pe trei direcții

Fig.5.8 Valorile rugozității înregistrate pe suprafața erodată de cavitație timp de 165 minute (Proba 2)



Profilograma rugozității

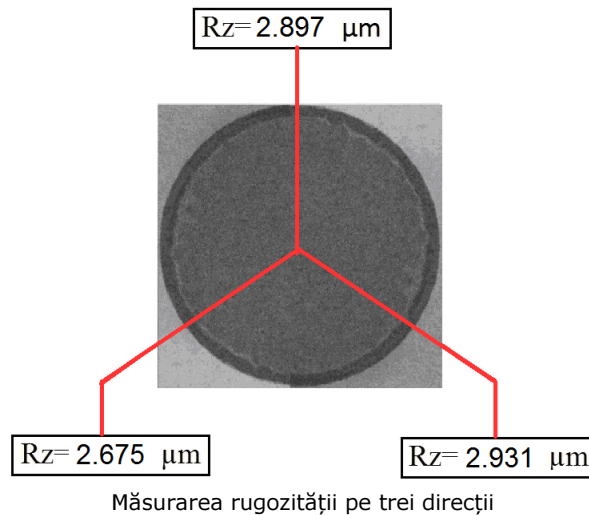


Fig.5.9 Valorile rugozității înregistrate pe suprafața erodată de cavitație timp de 165 minute (Proba 3)

Se constată că valorile parametrului Rz, înregistrate pe profilogramele celor trei probe (2,723  $\mu\text{m}$ , pentru proba 1; 2,842  $\mu\text{m}$  pentru proba 2; 2,675  $\mu\text{m}$ , pentru proba 3), prezintă diferențe față de valoarea medie a adâncimii maxime de eroziune  $MDE_{\text{max}} = 2,886 \mu\text{m}$  (fig.5.5). Acestea sunt firești, pentru că cele înregistrate pot fi considerate ca fiind mărimi reale (singura eroare posibilă fiind doar cea de măsurare a aparatului Mitutoyo), în timp ce valoarea lui  $MDE_{\text{max}}$  este dată de curba de mediere a valorilor experimentale ale celor trei probe, la 165 minute, care în mod evident introduce mai multe erori, având în vedere modul de calcul, plecând de la determinarea masei erodate, pentru fiecare probă și utilizarea întregii arii a suprafeței expuse la cavitație (vezi capitolul 2). Însă diferențele foarte mici (0,044...0,211 $\mu\text{m}$ ) sunt o expresie a acurateții derulării experimentului.

Diferențele care apar între valorile parametrului Rz, înregistrate după cele trei direcții, la fiecare dintre probe, este un indicator al distribuției neuniforme a durității (ca valoare) în stratul nitrurat. Acest lucru este în concordanță cu dispersiile valorilor experimentale față de curba  $MDER(t)$ , fig.5.5b și forma florală a evoluției distrugerii de către cavitația vibratoare a suprafeței nitrurate (revedi imaginile fotografice din tabelul 4.1).

### c) Evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

Pentru evidențierea rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil X5CrNi18-10, rezultată ca urmare a nitrurării în gaz, în diagramele din fig.5.10 sunt comparate curbele specifice  $MDE(t)$  și  $MDER(t)$  cu ale oțelului inoxidabil etalon OH12NDL și ale aceluiași oțel, supus tratamentului termic de călire pentru punere în soluție la 1050  $^{\circ}\text{C}$ , cu o durată de menținere de 25 minute și cu răcire în apă.

**Precizare:** în aceste digrame valorile experimentale sunt medii ale valorilor înregistrate pentru cele trei probe, analizate mai sus.

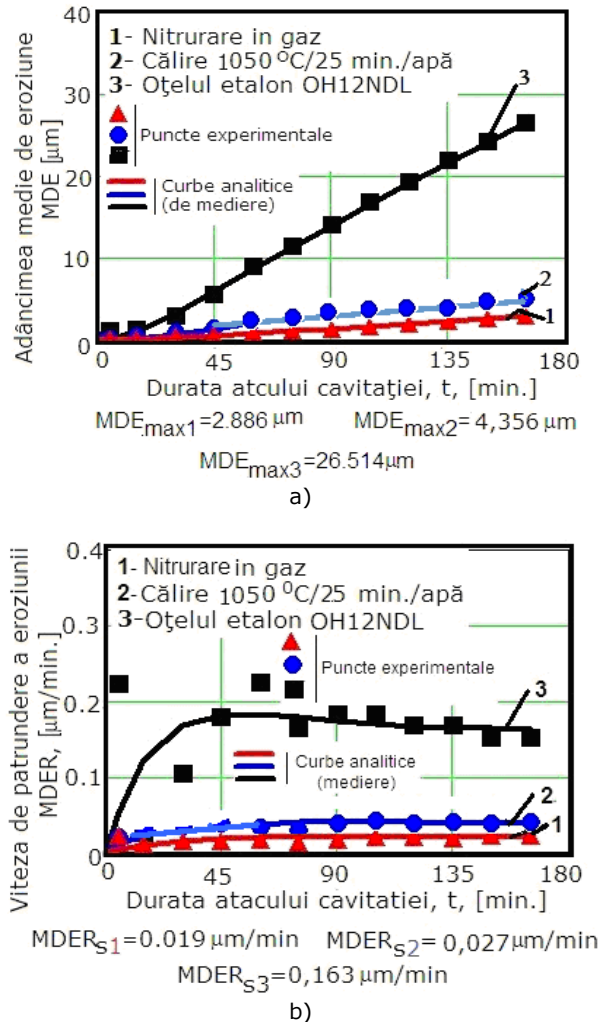


Fig.5.10 Curbele specifice de cavitație:

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

După modul de evoluție, indiferent că facem referire la  $MDE(t)$  sau  $MDER(t)$ , se constată comportarea și rezistența net superioare ale suprafeței nitrurate în gaz, în raport cu cele ale oțelului etalon OH12NDL și cu cea obținută prin călire pentru punere în soluție la 1050 °C/25 min/apă.

Din punct de vedere cantitativ sporul de rezistență, față de a oțelului OH12NDL, de referință pentru turbinele hidraulice [2, 15, 33, 139], este de peste 9,18 ori mai mare, după valorile adâncimilor medii de eroziune,  $MDE_{max}$  și de peste 8,57 ori, după valorile spre care tind să se stabilizeze vitezele medii de pătrundere a eroziunii,  $MDERs$ .

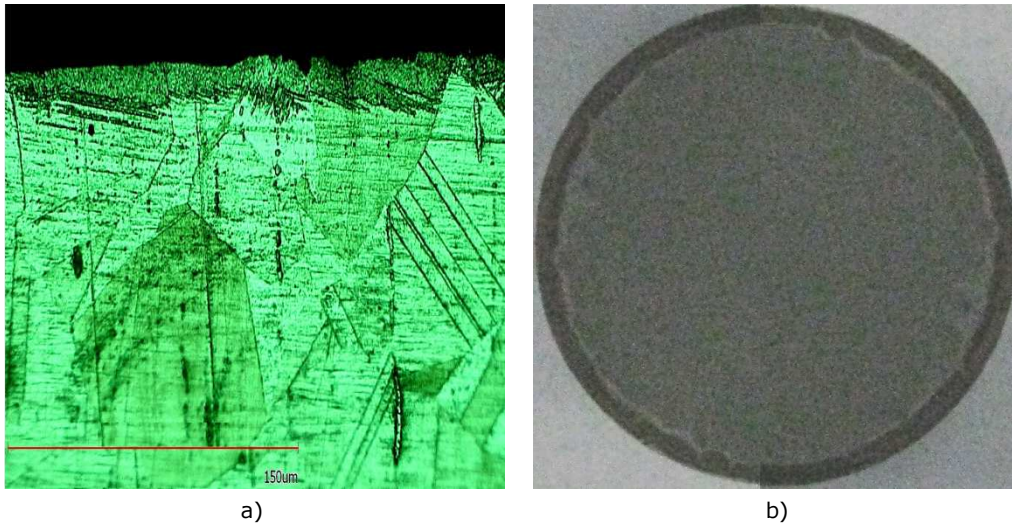
În raport cu rezistența conferită de tratamentul termic de călire pentru punere în soluție la 1050 °C/25 min/apă, creșterea realizată prin nitruare în gaz

este de peste 1,57 ori, după valorile adâncimilor medii de eroziune,  $MDE_{max}$  și de peste 1,42 ori, după valorile spre care tind să se stabilizeze vitezele medii de pătrundere a eroziunii,  $MDERs$ .

Aceste sporuri de rezistență la cavitație, cu efect evident asupra creșterii duratei de exploatare, recomandă utilizarea procedurii termochimic de nitrurare în gaz a oțelurilor, cu structuri similare celui cercetat, la piese intens solificate la cavitație, așa cum sunt echipamentele hidromecanice.

### 5.2.2. Investigarea microscopică a structurii erodate

În fig.5.11 și 5.12 se prezintă microstructura suprafeței probei nitrurată în gaz, iar în fig.5.13, comparativ structural, se prezintă microstructura pentru proba supusă tratamentului termic de călire pentru punere în soluție.



a) b)  
Fig.5.11 Imagini ale distrugerilor produse în structura suprafeței expuse atacului cavitației, timp de 165 minute (nitrurare în gaz): a) microscopie optică; b) macrografia suprafeței erodate

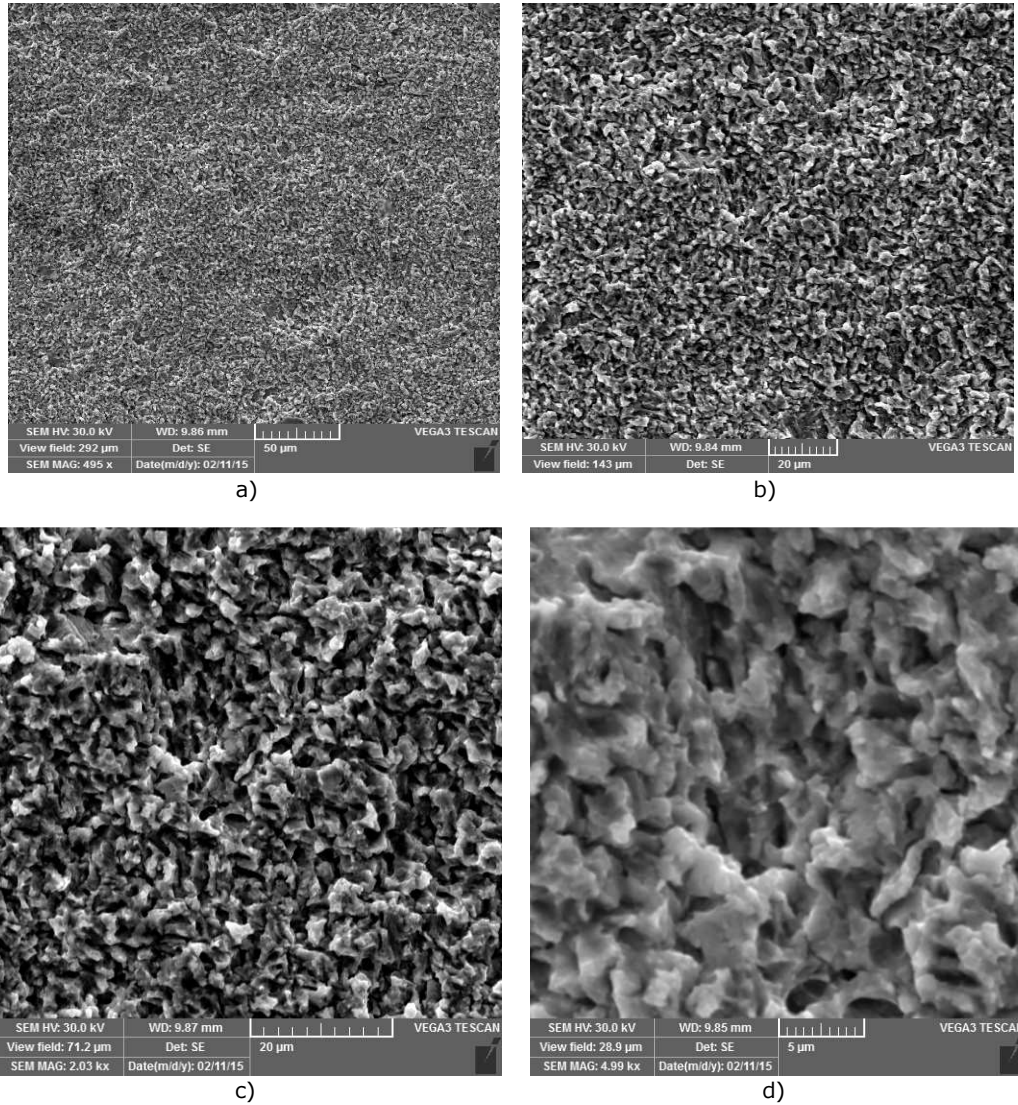


Fig.5.12 Topografia suprafeței nitrurate în gaz și cavitată timp de 165 min:  
a) SEM x 500; b) SEM x 1000; c) SEM x 2000; d) SEM x 5000

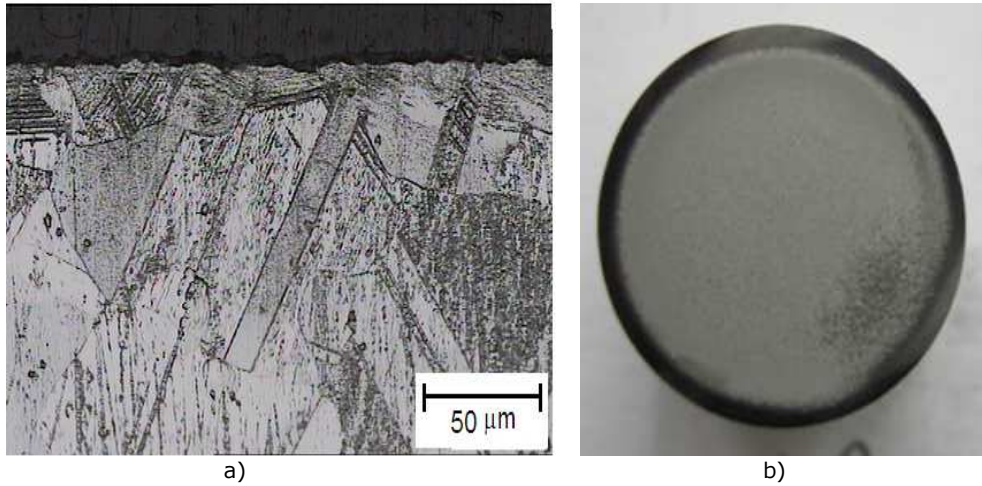


Fig.5.13 Imagini ale distrugerilor produse în structura suprafeței expuse atacului cavitației, timp de 165 minute (călire 1050 °C/25 min/răcire în apă): a) microscopie optică; b) macrografia suprafeței erodate

Din ambele imagini rezultă că miezul probelor are o microstructură alcătuită din austenită cu macule de recoacere, o anumită proporție de ferită  $\delta$  și mici cantități de carburi, M23C6 [112]. Degradarea suprafeței probelor nitrurate este uniformă (fig.5.11), iar cea a probelor călite pentru punere în soluție se inițiază în principal pe limitele de separație dintre grăunții cristalini (fig.5.13).

### 5.2.3. Concluzii parțiale

Aplicarea tratamentului termochimic de nitrurare în gaz la oțelul inoxidabil X5CrNi18-10, cu structură preponderent de austenită, nu modifică semnificativ compoziția chimică a oțelului și asigură o creștere importantă a rezistenței la cavitație, mult superioară oțelului OH12NDL, de referință pentru turbinele hidraulice din România și semnificativ mai mare decât cea obținută prin tratamentul termic de călire pentru punere în soluție la 1050 °C/25 min/apă.

Având în vedere intensitatea ridicată de distrugere prin eroziune, pe care o are aparatul vibrator standard, folosit în experiment, mult peste cea creată de curgerea cavitațională din rotoarele mașinilor hidraulice, sau de vârtejul elicelor navale și cel din vanele fluture, care afectează inelul de reținere scaun, rezultatele experimentale, obținute în acest subcapitol cu acest aparat, recomandă utilizarea tratamentului termochimic de nitrurare studiat ca procedeu de tratament a suprafețelor pieselor realizate din acest tip de oțel, intens solicitate la cavitație.

Singura problemă care trebuie rezolvată, este cea dată de dimensiunea piesei, pentru că sporul de rezistență la cavitație va duce la creșterea duratei de exploatare, cu amortizarea costului tratamentului termochimic.



### **5.3. Niturarea cu laser**

#### **5.3.1. Considerații generale**

Folosirea laserului în procesele industriale de tratare a suprafețelor pieselor supuse la diferite solicitări este tot mai frecventă, datorită simplității și creării unor straturi funcționale cu o duritate crescută, fără să afecteze substanțial materialul de bază [45, 60-62, 87, 120, 153]. Una din utilizările curente o reprezintă cea de niturare [87, 104, 132, 156], datorită îmbunătățirii proprietăților tribologice și rezistenței la coroziune a diferitelor substraturi, esențiale pentru suprafețele supuse unor solicitări ciclice de oboseală, cum sunt cele produse de microjeturile și undele de șoc, rezultate la implozia bulelor cavitaționale. Acest avantaj pe care îl oferă folosirea laserului este dat de viteza transversală de cca. 100 mm/s [44, 159] care duce la o puternică dizolvare a azotului în stratul marginal topit, cu formarea unei zone de material îmbogățit în azot.

Cercetările realizate în cadrul Universității Politehnica Timișoara, pe oțeluri inoxidabile duplex [104] și pe oțeluri cu transformare martensitică indirectă (controlată) [87], și datele din literatură [131, 158] arată că obținerea unui strat nitrurat de calitate ridicată, prin folosirea fasciculului laser, depinde de corelarea parametrilor de proces ai acestuia (puterea, frecvența pulsului, diametrul spotului razei pe suprafața piesei de prelucrat, viteza transversală a piesei sau a radiației laser) și de cei ai azotului (presiunea, puritatea și debitul). În pas cu aceste tendințe de utilizare a laserului, în cadrul acestui capitol se cercetează influența nitrurării laser cu gaz asupra comportării și rezistenței oțelului X5CrNi18-10 la cavitația generată de aparatul vibrator standard din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara.

#### **5.3.2. Cercetarea experimentală**

##### **a) Tehnica nitrurării cu laser**

Tratamentul de niturare cu fascicul laser, folosit în cadrul experimentului, a constat în trei regimuri diferite, cu menținerea constantă a duratei pulsului. Tratamentul s-a realizat cu ajutorul unui laser pulsant programabil Nd-YAG, ce dotează standul Trumpf HL 124 P LCU (fig.5.14).

Parametrii de proces, specifici razei laserului sunt:

- durata puls: 8 ms;
- puterea în impuls: 120 W, 180 W, 240 W.

În fig.5.15 sunt prezentate imaginile macro ale suprafețelor nitrurate cu laser, pentru cele trei puteri ale impulsului, realizate cu aparatul Canon Power Shot, folosit și la fotografierea suprafețelor nitrurate în gaz, de la subcapitolul anterior.



Fig.5.14 Standul Trumph HL 124 P LCU dotat cu laser pulsat programabil Nd-YAG (foto de la ISIM - Timișoara)

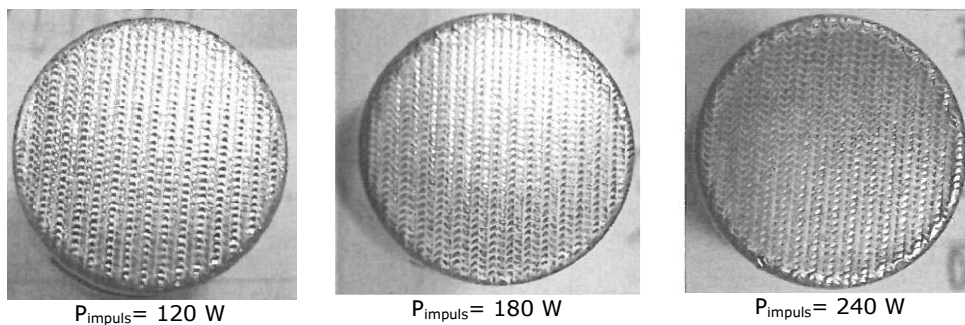


Fig.5.15 Aspectul suprafețelor nitrurate cu laser

Imaginile din fig.5.15 arată că stratul nitrurat, obținut prin folosirea razei laser, are o formă velurată, cu striiațiuni după direcția de deplasare a razei laser, a cărei finețe crește cu puterea în impuls și care, după cum se va constata mai jos, influențează comportarea și rezistența la cavitația vibratoare.

Măsurătorile de microduritate, realizate în secțiune transversală, conform schemei din fig.5.16, arată, o scădere, pe grosimea stratului nitrurat de 55  $\mu\text{m}$ , de la circa (550 ... 600) HV0.3, valori măsurate la suprafață, până la circa 200 HV0.3 în zona de trecere spre metalul de bază, fig.5.17.

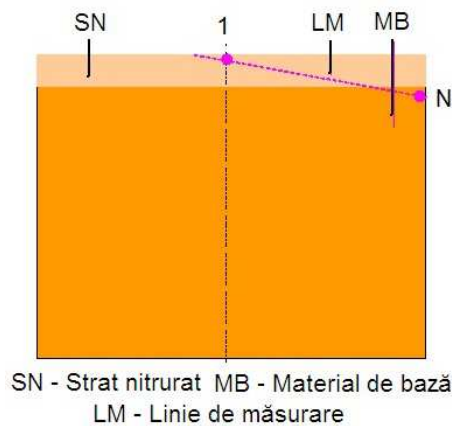


Fig.5.16 Măsurarea durtății în stratul nitrurat cu laser

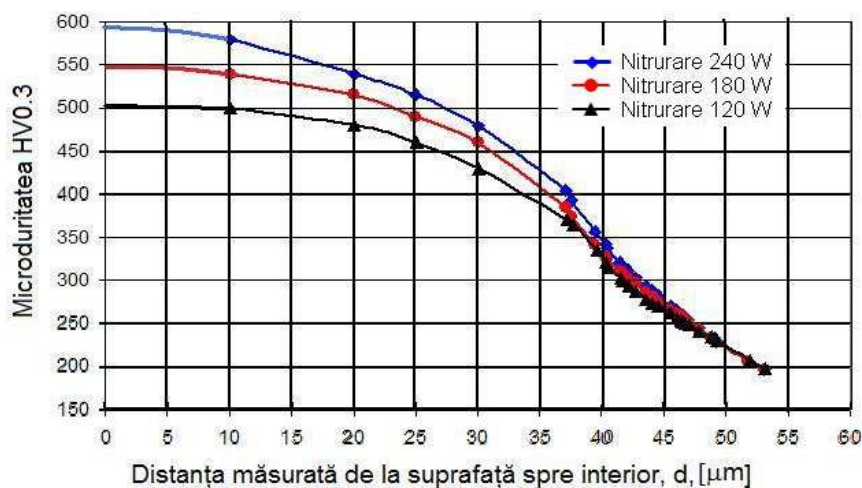


Fig.5.17 Curba gradient de duritate pe secțiunea stratului nitrurat laser

Întrucât cercetările realizate de Garcia și Hammitt [54, 68, 69, 71], Hosmani a.o [74] și Huang a.o[64] arată că duritatea este principala proprietate mecanică ce influențează rezistența la cavitație, datorită valorilor ridicate ale straturilor nitrurate cu laser, realizate prin cele trei regimuri, diferența de comportare și rezistență la cavitația vibratoare, în acest studiu, va fi făcută de gradul de finețe al striatiunilor.

#### **b) Rezultatele testului de cavitație**

Conform cutumei Laboratorului de Cavitație, detaliată în capitolul 4, pentru fiecare regim de tratament sau testat câte trei probe, cu respectarea procedurilor de pregătire, testare, înregistrare, evaluare și prelucrare a rezultatelor.

În fig.5.18-5.20 sunt prezentate rezultatele testului de cavitație, exprimate prin valorile experimentale ale adâncimii medii de eroziune, respectiv ale vitezei medii de pătrundere a eroziunii, de la diferite perioade de atac al cavitației,

mediate/aproximate de curbele MDE(t), respectiv MDER(t), construite cu relațiile analitice prezentate în capitolul 2.

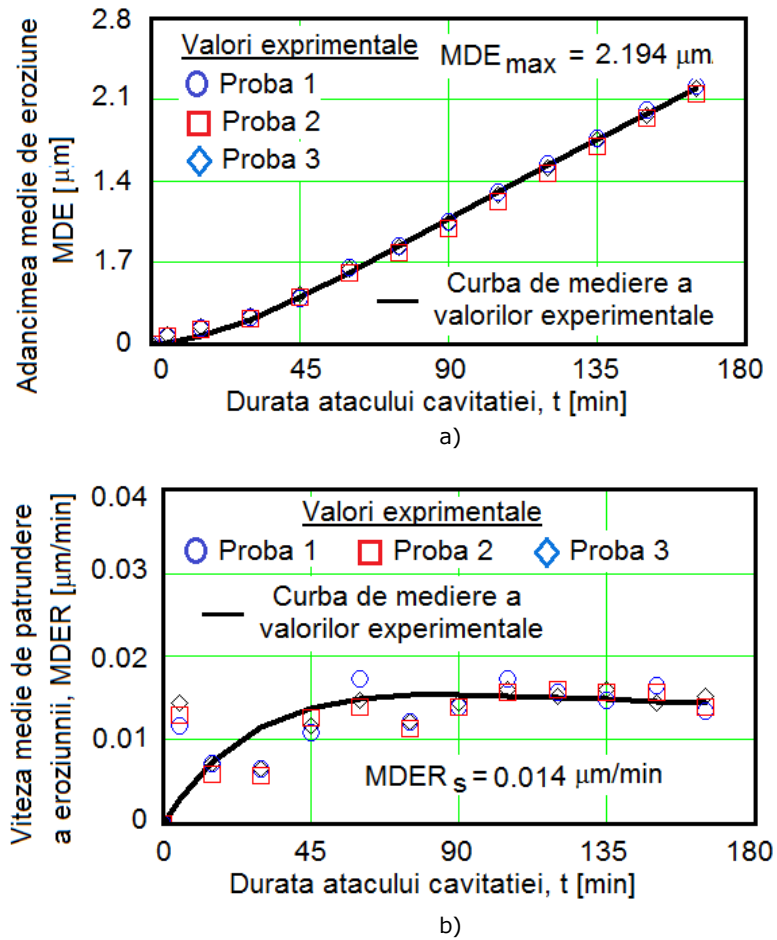
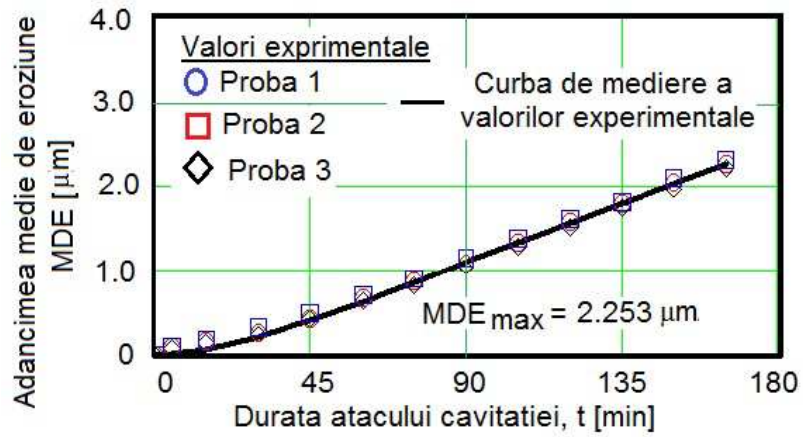
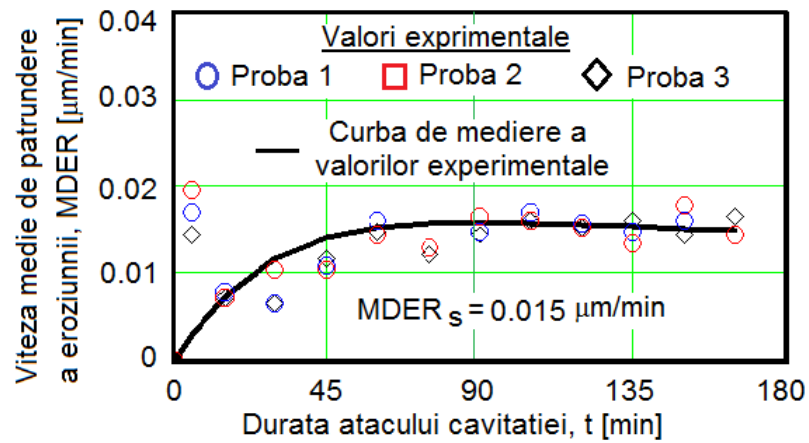


Fig.5.18 Curbele specifice ale eroziunii prin cavitație (240 W)  
 a) Variația adâncimii medii de eroziune cu durata cavitației  
 b) Variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

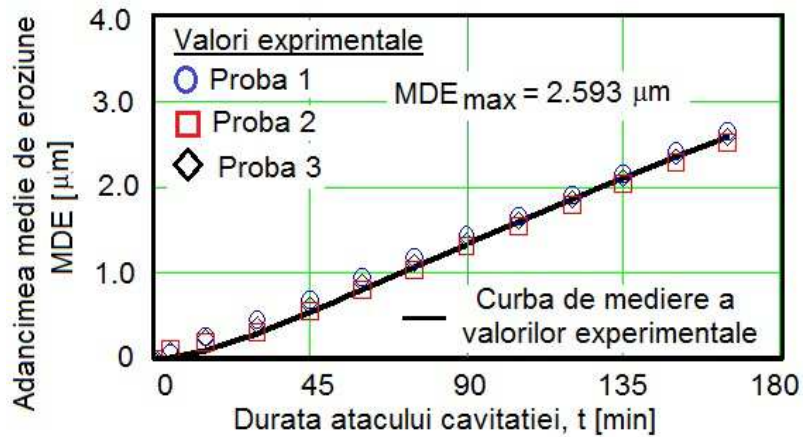


a)

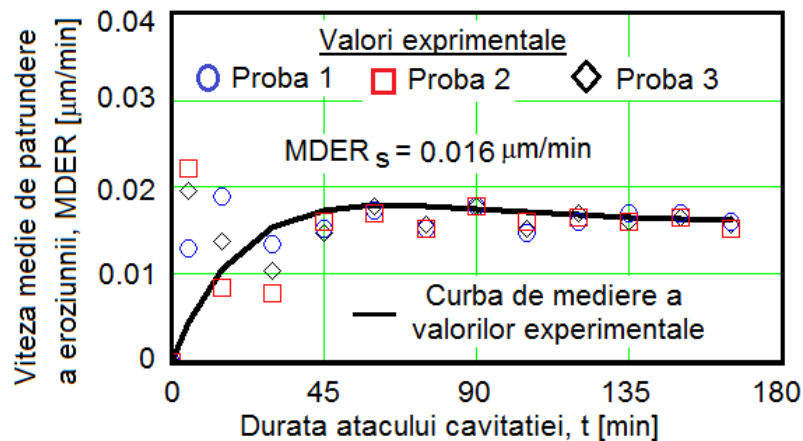


b)

Fig.5.19 Curbele specifice ale eroziunii prin cavitatie (180 W)  
 a) Variatia adancimii medii de eroziune cu durata cavitatiei  
 b) Variatia vitezei medii de patrundere a eroziunii cu durata cavitatiei



a)



b)

Fig.5.20 Curbele specifice ale eroziunii prin cavitație (120 W)

- a) Variația adancimii medii de eroziune cu durată cavitatiei  
b) Variația vitezei medii de patrundere a eroziunii cu durată cavitatiei

Forma de evoluție a curbelor MDE(t) și MDER(t) și dispersia redusă a valorilor experimentale, de la diverși timpi de atac față de aceste curbe, indiferent de regimul de tratament, duc la următoarele concluzii:

- în primele 15-30 minute ale cavitatiei vibratoare, suprafețele nitrurate ale celor trei probe, pentru oricare dintre regimurile de tratament, se comportă diferit și, după valorile parametrului MDER (fig.5.18b, 5.19b, 5.20b), creează falsa impresia că stratul nitrurat are o slabă rezistență la cavitație. Pe baza experienței dobândite în cadrul cercetărilor realizate, de peste 70 ani, pe aparatul vibrator standard, în Laboratorul de Cavitație, făcută cunoscută prin tezele de doctorat [10, 15, 55, 78, 83, 87, 104, 120, 125] și lucrările publicate [30, 33, 139], acest interval de atac nu este considerat ca fiind caracteristic aprecierii comportării și rezistenței la cavitația vibratoare. Motivul este expulzarea de oxizi și cruste dure, formate inerent prin

- procedura de tratament și care nu au putut fi îndepărtate prin procesul de pregătire și curățare/spălare a probelor, la început de testare;
- suprafețele celor trei probe manifestă rezistență și comportare similară, exprimată de suprapunerea majorității valorilor experimentale, pe intervalul 45...165 minute ale atacului cavitației;
  - rezistența manifestată de straturile nitrurate, față de solicitările generate prin impactul cu microjeturile și undele de șoc, rezultate în procesul cavitațional, este caracteristică suprafețelor materialelor cu excelentă rezistență la cavitația creată de aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice [10, 15, 30, 33, 78, 83, 87, 104, 120, 125, 139]. Această constatare este dată de evoluția liniară a curbelor MDE(t), pe intervalul 45-165 minute și de tendința de stabilizare a curbei MDER(t) la valoarea de maxim a vitezei;
  - dispersiile reduse ale punctelor/valorilor experimentale (după minutul 45), față de curbele de mediere, sunt cauzate și de distribuția uniformă a durității în aria suprafeței nitrurate, ca urmare a acurateții derulării procesului de nitrurare cu rază laser, pe cele trei probe testate la cavitație, cu respectarea parametrilor (putere în impuls, viteza de deplasare rază, durată puls). Acest aspect este confirmat și de imaginile fotografice ale probelor (alese arbitrar), realizate la finalul testului, fig.5.21.
  - din cele trei procedee de tratament, suprafețele nitrurate cu raza laser, cu o putere în impuls de 240 W, au cea mai bună comportare la cavitație, caracterizată de cea mai redusă dispersie și o suprapunere a tuturor valorilor din intervalul 45-165 minute de atac al cavitației, fig.5.20b.

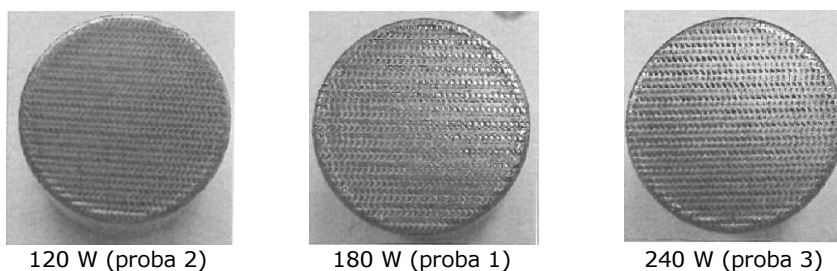


Fig.5.21 Imagini ale degradării prin cavitație suprafeței probei (după 165 minute)

Imaginile din fig.5.21 arată că eroziunea cavitație a afectat foarte puțin stratul nitrurat, fără depăși grosimea sa, forma striată păstrându-se, așa cum se observă și în imaginile microscopice de la subcapitolul 5.3.3. Cauza o reprezintă duritatea foarte mare care se obține prin acest tratament (550...600)HV0.3, fig.5.17.

### c) Evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației

În vederea evaluării rezistenței conferite de cele trei regimuri de nitrurare cu laser, în fig.5.22 sunt comparate curbele specifice ale adâncimii și vitezei medii de eroziune. Valorile experimentale ale parametrilor MDE și MDER, din cele două diagrame sunt medii ale valorilor înregistrate pentru cele trei probe testate pentru fiecare dintre regimuri.

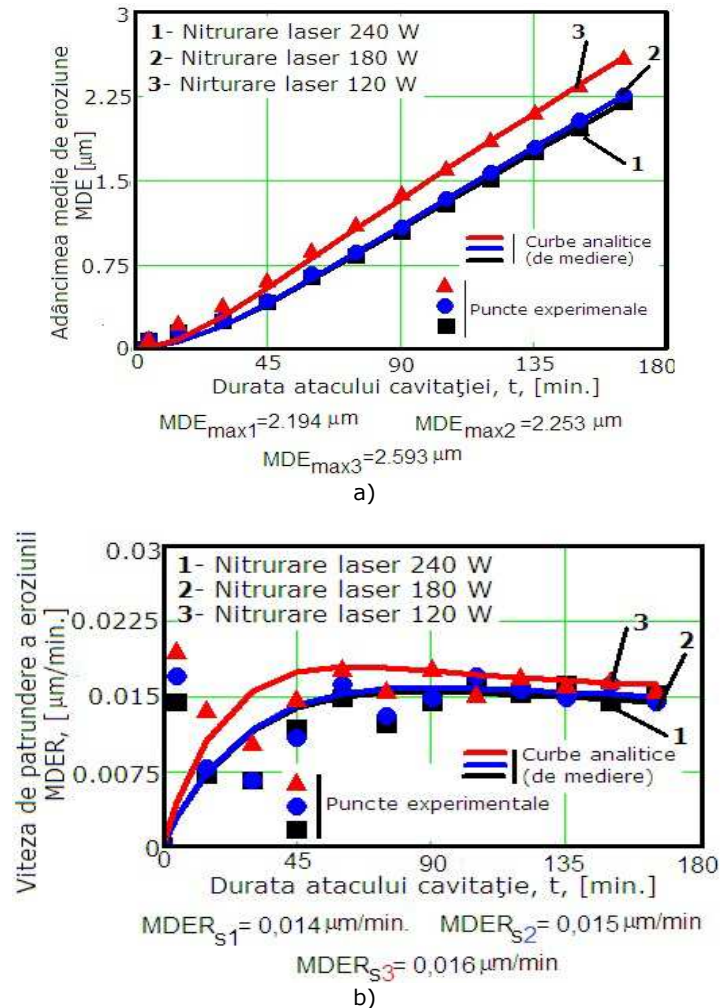


Fig.5.22 Curbele specifice de cavitație:

- a) variația adâncimii medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației  
 b) variația vitezei medii de pătrundere a eroziunii cu durata cavitației

Evoluțiile curbelor de mediere, din fig.5.22 sugerează că diferențele dintre evoluțiile adâncimilor de eroziune  $MDE(t)$  și vitezele de pătrundere a eroziunii  $MDER(t)$ , obținute la testarea realizată pe probele nitrurate cu laser de puteri de 120 W și 180 W, sunt nesemnificative. Însă, luând ca elemente de evaluare a rezistenței la cavitație valorile adâncimii medii de eroziune de la finalul atacului  $MDE_{\max}$ , respectiv valorile la care tind să se stabilizeze vitezele medii de pătrundere a eroziunii  $MDER_s$ , conform datelor din fig.5.22, rezultă că prin creșterea puterii se mărește și această rezistență a suprafeței nitrurate, reflectată de reducerea adâncimii și vitezei de eroziune. Astfel, creșterea de rezistență la cavitație, realizată prin folosirea unei puteri de 240 W, este:



- mai mare cu 18 %, după valoarea lui  $MDE_{max}$ , respectiv cu 14 %, după valoarea lui  $MDER_s$ , față de regimul cu 120 W,

și

- mai mare cu 15 %, după valoarea lui  $MDE_{max}$ , sau cu 7 %, după valoarea lui  $MDER_s$ , față de regimul cu 180 W.

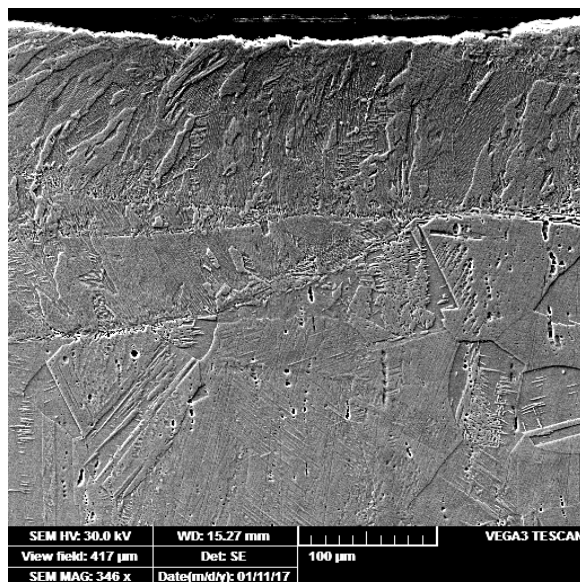
Evident aceste sporuri sunt cauzate de diferențele de duritate (vezi fig.5.17) obținute în suprafața stratului nitrurat (circa 600 HV0.3 pentru laserul cu o putere de 240 W, circa 550 HV0.3 pentru raza laser cu o putere de 180 W și de circa 500 HV0.3 pentru raza laser cu o putere de 120 W).

Se observă că sporul de rezistență la cavitație nu este proporțional cu creșterea de puterea în pulsul razei laser, care este de 20%, respectiv de 9%, ceea ce înseamnă că rezistența la cavitație a stratului nitrurat cu laser este dependentă de puterea în impuls a razei acestuia.

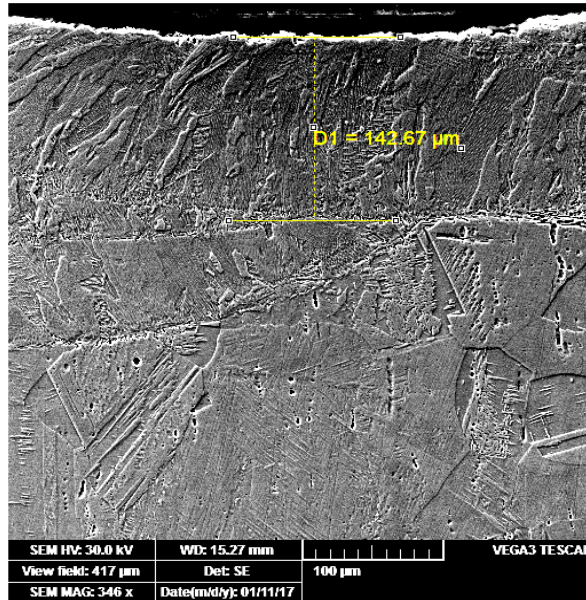
### 5.3.3. Investigarea structurii erodate

Rezultatele investigațiilor de microscopie electronică cu baleiaj asupra secțiunilor prin probele testate la cavitație timp de 165 minute, fig.5.23a-5.23f, sunt în concordanță deplină cu observațiile prezentate anterior. Ele demonstrează, pe de o parte, eficiența tratamentului de nitrurare cu fascicul laser asupra îmbunătățirii rezistenței la eroziunea cavitației, iar pe de altă parte, influența puterii în impuls a radiației asupra grosimii stratului îmbogățit în azot. Din figură se poate constata că pentru puteri mai mari în impuls, adâncimea de strat nitrurat rămas la suprafață în urma testului de cavitație este mai mare (fig.5.23.f comparativ cu fig.5.23.b,d).

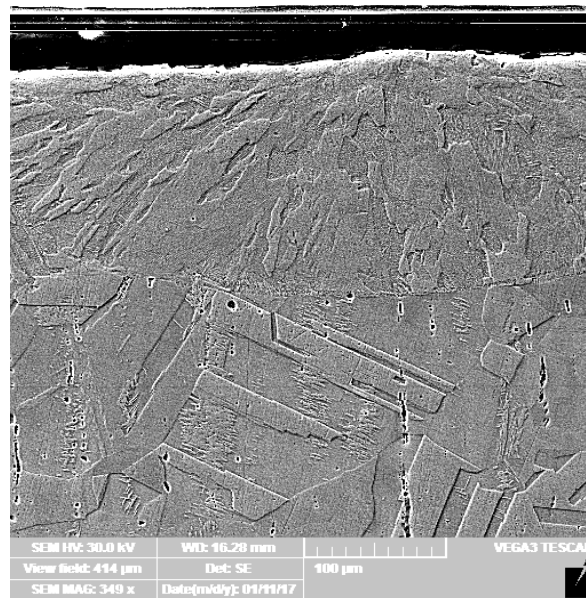
Analizele EDX ale unor microvolume de material din stratul nitrurat, înainte și după încercările de eroziune prin cavitație (fig.5.23h,i), demonstrează că atacul cavitațional nu a determinat modificări importante ale compoziției chimice a oțelului.



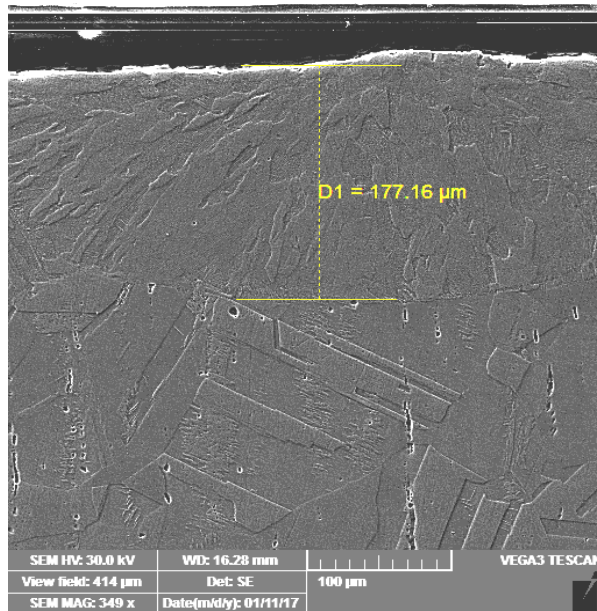
a)



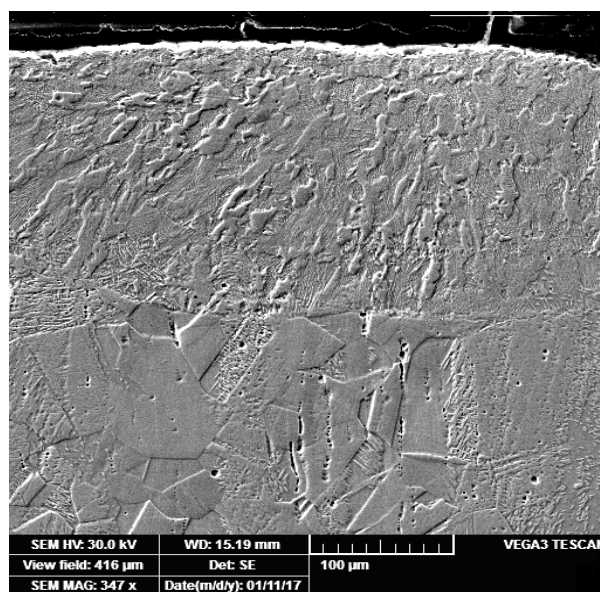
b)



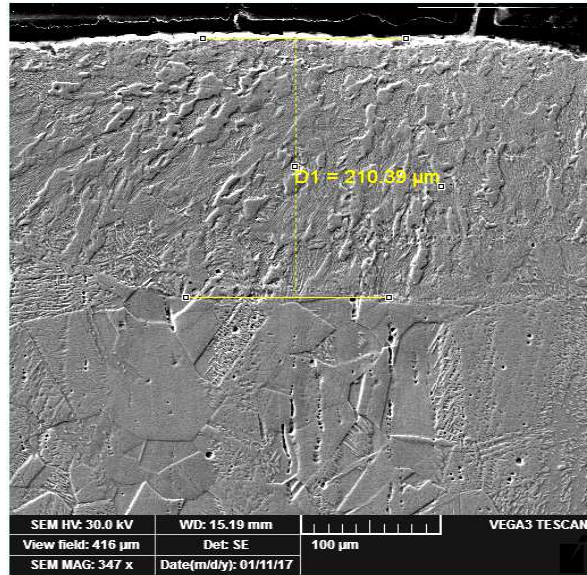
c)



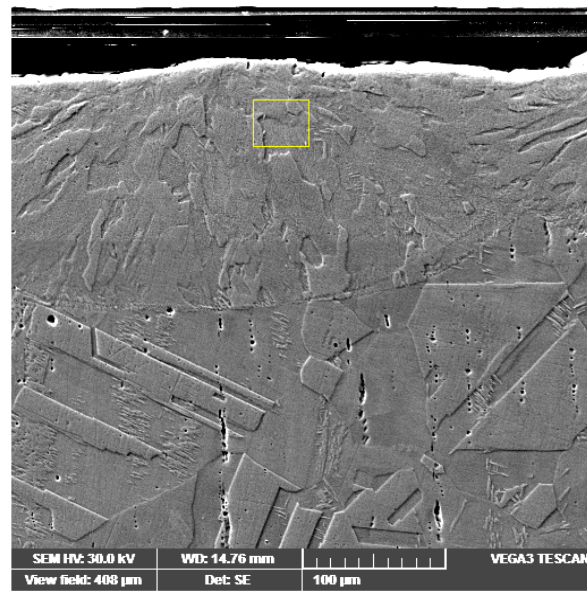
d)



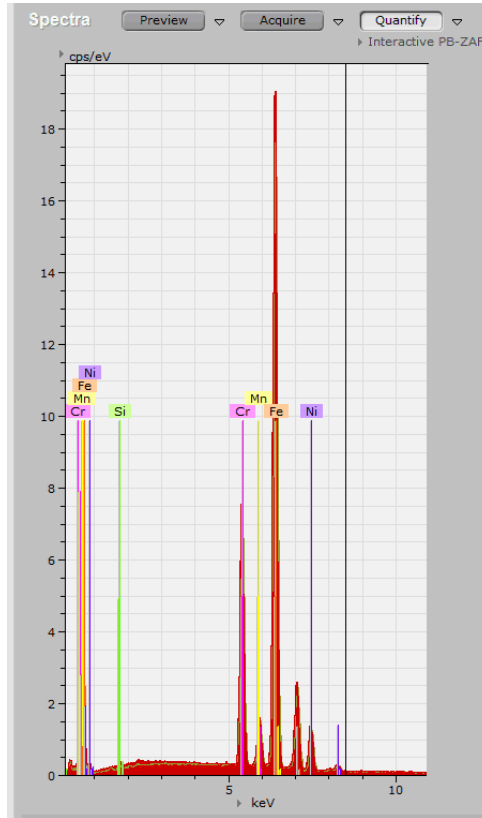
e)



f)



g)



h)

	Series	unn. C [wt.%]	nor. C [wt.%]	Atom C [at.%]	Error (1 Sigma) [wt.%]
Silicon	K series	0.37	0.38	0.68	0.06
Chromium	K series	17.98	18.02	17.73	0.51
Manganese	K series	0.55	0.55	0.51	0.05
Iron	K series	70.54	70.67	64.75	1.83
Nickel	K series	7.14	7.16	6.24	0.24
Molybdenum	K series	0.55	0.55	0.29	0.17
Nitrogen	K series	2.68	2.68	9.79	0.99
	<b>Total</b>	<b>99.82</b>	<b>100.00</b>	<b>100.00</b>	

i)

Fig.5.23 Imaginea sistemului strat – substrat și compoziția chimică (calitativă) a depunerii laser: a), b) P = 120 W; c),d), g) P = 180 W; e),f) P = 240 W  
h) spectrele de dispersie; i) elementele chimice descoperite

#### 5.3.4. Concluzii parțiale

**1.** Tehnica de nitrurare cu rază laser a oțelului inoxidabil X5CrNi18-10, conduce la realizarea unor straturi striate, dure, care se comportă excelent la eroziunea cavității vibratoare.

**2.** Diferențele dintre rezultatele obținute în cadrul tezei, pentru cele trei regimuri de putere în impulsul razei laser (120 W, 180 W și 240 W), cu menținerea constantă a pulsului (8 ms în cazul de față), arată că puterea în impuls este parametrul de bază care determină sporul de rezistență la cavitație.

**3.** Acest procedeu de nitrurare nu se poate aplica la piese cu configurație spațială complexă cum sunt paletele și rotoarele mașinilor hidraulice, dar se poate utiliza cu succes la piese cu configurație simplă, cum este inelul de reținere scaun folosit la fixarea etanșării discului vanelor fluture.

**4.** Pentru piesele ce funcționează în curenți cavitaționali, unde calitatea suprafeței din punct de vedere al rugozității și deformațiilor este esențială (cazul paletelor de mașini hidraulice), este obligatoriu realizarea unei operații de prelucrare mecanică, prin care să dispară striatiunile, dar să nu se afecteze prea mult grosimea stratului nitrurat.

**5.** Stratul depus prin nitrurare laser are o bună aderență la substrat, iar adâncimea lui depinde semnificativ de puterea fasciculului.

#### 5.4. Evaluarea rezistenței la cavitația vibratoare creată prin tehnicile de nitrurare

Pentru evaluarea diferențelor de rezistență la cavitația vibratoare, realizată prin cele două procedee de nitrurare, s-a construit histograma din fig.5.24, în care sunt date valorile rezistenței la cavitație  $R_{cav}$  (unde  $R_{cav} = 1/MDERs$ ) și  $MDE_{max}$ , principalii parametrii recomandați de normele ASTM G32-2010 și utilizați în cadrul laboratorului. Evaluarea este realizată pe criteriul comparației, folosind, conform cutumei și valorile oțelului de referință OH12NDL.

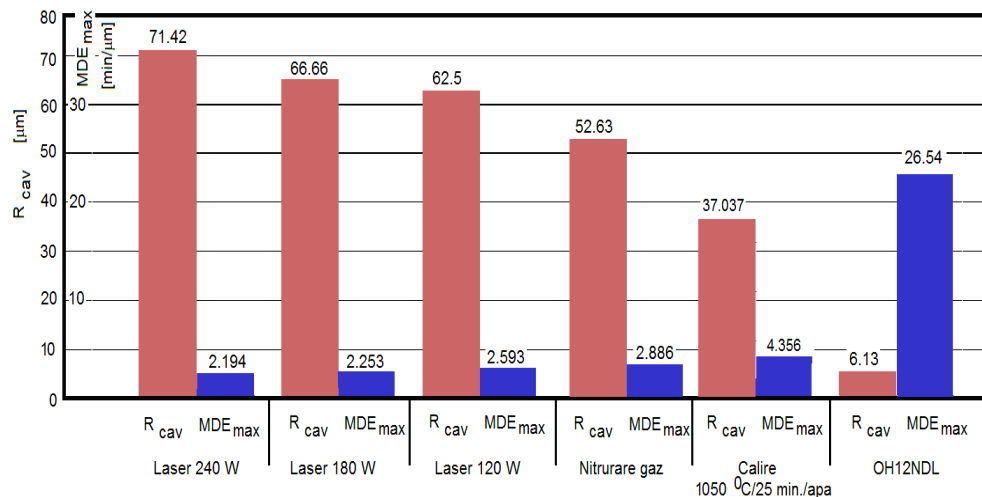


Fig.5.24 Compararea rezistenței la cavitație după valorile parametrilor caracteristici

Datele din histograma prezentată în fig.5.24 arată că, indiferent de parametrul la care se face referire, prin nitrurarea cu laser la 240 W se realizează cea mai mare rezistență la cavitație, respectiv cea mai mică adâncime de eroziune.

Sporurile realizate prin acest procedeu de nitrurare, comparativ una față de cealaltă și față de oțelul etalon OH12NDL, sunt:

**1- după valorile rezistenței la cavitație  $R_{cav}$ :****- cel realizat prin niturare cu laser având 240 W este:**

- cu circa 32 % mai mare decât cel realizat prin niturare în gaz;
- cu 92 % mai mare decât cel realizat prin călire la 1050 °C/25 min/apă;;
- de circa 12 ori mai mare decât cel obținut pe oțelul etalon OH12NDL;

**- cel realizat prin niturare cu laser având 180 W este:**

- cu circa 28 % mai mare decât cel realizat prin niturare în gaz;
- cu 80 % mai mare decât cel realizat prin călire la 1050 °C/25 min/apă;
- de circa 11,72 ori mai mare decât cel obținut pe oțelul etalon OH12NDL;

**- cel realizat prin niturare cu laser având 120 W este:**

- cu circa 11 % mai mare decât cel realizat prin niturare în gaz;
- cu 69 % mai mare decât cel realizat prin călire la 1050 °C/25 min/apă;
- de circa 10,23 ori mai mare decât cel obținut pe oțelul etalon OH12NDL;

**2- după valorile adâncimii medii de eroziune  $MDE_{max}$  realizate în 165 minute de atac:****- cel realizat prin niturare cu laser având 240 W este:**

- cu circa 36 % mai mare decât cel realizat prin niturare în gaz;
- cu circa 93 % ori mai mare decât cel realizat prin călire la 1050 °C/25 min/apă;
- de circa 11,65 ori mai mare decât cel obținut pe oțelul etalon OH12NDL;

**- cel realizat prin niturare cu laser având 180 W este:**

- cu circa 19 % mai mare decât cel realizat prin niturare în gaz;
- cu 68 % mai mare decât cel realizat prin călire la 1050 °C/25 min/apă;
- de circa 10,2 ori mai mare decât cel obținut pe oțelul etalon OH12NDL;

Rezultatele prezentate mai sus confirmă că suprafețele nitrurate, indiferent de procedura utilizată, își măresc substanțial rezistența la cavitație, motivul principal fiind dat de duritatea stratului nitrurat, mult superioară celei din materialul de bază (vezi și fig.5.4 și 5.17).

## 5.5. Concluzii

**1.** Niturarea în gaz și cele trei regimuri de niturare cu fascicul laser, aplicate oțelului X5CrNi18-10, prin duritatea creată stratului suprafeței expuse cavitației, comparativ cu starea sa structurală de călire pentru punere în soluție și cu cea a oțelului etalon OH12NDL duc la o creștere importantă de rezistență la cavitația vibratoare.

**2.** Tratamentele termochimice de niturare nu schimbă semnificativ compoziția chimică a metalului de bază, ci doar se realizează o îmbogățire în azot a stratului superficial, cu efect asupra durității.

**3.** Așa cum arată imaginile microscopice ale degradării suprafețelor nitrurate, pe durata cavitației grosimile straturilor realizate nu au fost depășite.

**4.** Creșterile foarte mari de rezistență la cavitația vibratoare, exprimate de valorile parametrilor  $MDE_{max}$ ,  $R_{cav}$ , respectiv  $MDER_s$ , în comparație cu ai stării călite (1050 °C/25min/apă) și cu oțelului OH12NDL recomandă aceste tratamente ca procedee pentru piesele ce funcționează în regim de cavitație intens dezvoltată, așa cum este cea din echipamentele hidromecanice. Problema care trebuie rezolvată este dată de dimensiunea piesei și de complexitatea configurației geometrice. Procedurile pot fi utilizate cu succes la inelele de reținere scaun folosite la fixarea etanșării discului vanelor fluture.

## **6. UN NOU CONCEPT DE IERARHIZARE A OȚELURILOR INOXIDABILE DUPĂ REZISTENȚA LA EROZIUNEA CAVITAȚIEI**

### **6.1. Introducere**

Unele date din literatură dau ca debut al studiului eroziunii cavitației anul 1875, odată cu primele observații ale italianului Bartello, realizate pe elicele navelor Mauritania și Luisitania [15]. Preocuparea specialiștilor în ierarhizarea materialelor după rezistența la cavitație a devenit tot mai importantă datorită noilor materiale și tehnologii folosite la elicele navale [98], respectiv la paletele și rotoarele turbinelor hidraulice [11, 118, 122]. Pe măsura construirii diverselor aparate și standuri de laborator, destinate cercetării distrugerii prin cavitație, s-au intensificat studiile pentru stabilirea unor metode de ierarhizare și relații empirice de corelare statistică între viteza de eroziune (în special cea din zona de stabilizare) cu parametrii specifici eroziunii cavitației (durata de incubație, durata totală de testare-atac al cavitație) și cu proprietățile mecanice (duritate, reziliența finală, limita de curgere, rezistența mecanică la rupere, etc). Evaluări semnificative sunt cele realizate de Garcia-Hammit (1960) [54], Thiruvengadam (1963) [151], Heymann (1970) [72], Noskievici (1983) [119], Sakai & Shima (1987) [134], Steller [143-146], Bordeasu (1997) [10], Jurchela [78], Karabenciov [83]. Fiecare dintre aceste modele, așa cum se va detalia mai jos, urmăresc punerea în evidență a rezistenței la eroziunea cavitației, prin prisma proprietăților, distrugerea structurii, sau a comportamentului reflectat de evoluția în timp a curbelor caracteristice. De remarcat este că fiecare dintre aceste modele își are limitele sale [49], permițând noi dezvoltări. Din acest motiv în cadrul acestui capitol, în final, se vine cu un nou concept, dedus din modul de corelare a rezistenței la eroziunea cavitației vibratoare cu parametrii de scală și de formă din ecuațiile analitice ce permit construirea curbelor caracteristice de cavitație MDE(t), respectiv MDER(t).

### **6.2. Modele de evaluare a rezistenței la cavitație**

În cele ce urmează se prezintă cele mai semnificative modele, folosite de specialiști în evaluarea comportării și rezistenței materialelor la eroziunea produsă prin cavitație vibratoare, pe aparate ai căror parametri funcționali își au valorile în ecartul recomandat de normele ASTM G32-2010 [146, 158].

#### **6.2.1. Modelul Hoff și colaboratorii**

Hoff și colaboratorii săi Langbein și Rieger [48], folosind rezultatele obținute pe un număr de peste 35 metale (oțeluri, bronzuri, aluminiu și aliaje ale sale, cupru,



nichel), stabilesc o relație de dependență între viteza de pătrundere a eroziunii MDER cu: viteza de pierdere de volum  $V$ , aria suprafeței expuse la cavitație  $A_s$ , aria erodată  $A_e$ , densitatea materialului  $\rho$ , un parametru ce caracterizează eficiența energiei transferate prin impactul cu microjeturile și undele de șoc (generate la implozia bulelor cavitaționale),  $\eta$  și un parametru  $\varepsilon$  ce depinde de proprietățile mecanice ale materialului (duritatea, reziliența finală, rezistența la rupere prin tracțiune statică, limita de curgere, etc) cu rol de descriere a energiei absorbite pe unitatea de volum de material în procesul distructiv.

Forma analitică a relației este:

$$\text{MDER} = \frac{\eta \cdot A_s \cdot \rho \cdot V^3}{2 \cdot \varepsilon \cdot A_e} \quad (6.1)$$

Problema de aplicabilitate a acestei relații este dificultatea de a evalua comparativ rezistența diferitelor materiale, ca urmare a diferenței semnificative dintre valoarea parametrului MDER, oferită de rezultatele experimentale și cea calculată. Motivul este, în special, relația de calcul a parametrului  $\varepsilon$ , pentru care sunt oferite mai multe formule, funcție de numărul de proprietăți mecanice luate în considerare și în care intervin alți coeficienți ce trebuie stabiliți statistic [48, 54].

### 6.2.2. Modelul Hammitt

În 1970 Hammitt și Bhatt [68], pe considerente similare lui Hoff și colaboratorii, stabilește următoarea relație de calcul a vitezei de pătrundere a eroziunii, funcție de energia cinetică de impact, exprimată prin coeficientul de transfer ale energiei de la lichid la suprafața solidă  $\eta$  și parametrul energiei de deformație  $\varepsilon$ :

$$\text{MDER} = \frac{\eta \cdot \rho \cdot V^n}{\varepsilon} \quad (6.2)$$

Unde:  $\rho$  - este densitatea lichidului cavitațional

$V$  - este viteza cu care este impactată suprafața expusă

$\eta = [(\rho_c)_f / (\rho_c)_s]^m$  - coeficientul de transfer energetic, considerat a fi determinat de raportul dintre densitatea și viteza sunetului fluidului cavitațional,  $(\rho_c)_f$  și cele ale materialului solid,  $(\rho_c)_s$ .

$\varepsilon = \varepsilon$  (reziliența finală UR, energia de deformație SE), este o dependență statistică, de forma celor folosite și de Hoff [48, 68].

Având o puternică bază de date experimentale, Hammitt și colaboratorii, oferă și o relație, foarte apreciată de specialiști, care dă dependența dintre MDER și duritatea materialului. Forma cea mai utilizată este [69-70]:

$$\text{MDER} = C \cdot (\text{HB})^{1,8} \quad (6.3)$$

Unde HB este duritatea Brinell, iar C este o constantă dependentă de material.

Ambele relații (6.2) și (6.3) oferă date aproximative ale rezistenței la cavitație față de rezultatele obținute prin experiment. Prima are dezavantajul că necesită măsurarea vitezei de impact -solid cu microjet sau undă de șoc, greu de

realizat în condiții de precizie (în cazul în care se calculează cu relații oferite de literatură, privind colapsul bulei cavitaționale, rezultatele sunt mult diferențiate de valorile obținute prin experiment, pentru că viteza de impact depinde și de distanța la care se află bula cavitațională, față de suprafața expusă, în momentul impactului). A doua nu oferă o precizie acceptabilă în cazul suprafețelor supuse tratamentelor de durificare (termice sau termochimice). De asemenea, valoarea exponentului (1,8) este una orientativă, ea având valori diferite de la un material la altul. Cu aceste dezavantaje, firești unui proces hidrodinamic complex, așa cum este cavitația vibratoare, relația (6.3) a lui Hammitt rămâne una de referință în estimările rezistențelor la eroziunea produsă de cavitația vibratoare.

### 6.2.3. Modelul Sakai-Shima

Sakai și Shima în „On a New Representative Equation for Cavitation Damage Resistance of materials” [134] oferă o relație prin care se corelează rezistența la cavitație, exprimată prin inversul vitezei de pătrundere a eroziunii, cu principalele caracteristici mecanice ale oțelurilor (limita de curgere, duritatea Brinell și rezistența mecanică la rupere), ce s-a dorit a fi una de efect de scară, de forma:

$$1/MDER = A[1 - e^{-B \cdot \psi^n}] \quad (6.4)$$

unde constantele A și B sunt stabilite statistic funcție de temperatura și natura mediului lichid de testare, respectiv de natura metalului și tipul aparatului.

Parametrul adimensional  $\psi^n$  este un raport între cele trei proprietăți mecanice menționate ale materialului testat și ale oțelului inoxidabil Stelite 304 SS, etalon pentru aparatul vibrator din Michigan.

Verificările efectuate de Bordeasu în teza sa de doctorat „**Eroziunea cavitațională a materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară (1998)**” [10] și ulterior de Jurchela și Karabenciov, în tezele lor de doctorat [78], [83], cât și prin rezultatele obținute în prezenta lucrare arată că relația (6.4) nu poate fi folosită pentru transpunerea rezultatelor experimentale obținute pe aparate vibratoare cu parametri funcționali diferiți. De asemenea, utilizarea datelor obținute pe oțelurile inoxidabile, testate în aparatul vibrator cu cristale piezoceramice, începând cu anul 2011 și până în prezent, arată că această relație nu oferă o ierarhizare riguroasă după rezistența la cavitația vibratoare.

### 6.2.4. Modelul Steller

Un alt model de evaluare a comportării materialelor la eroziunea prin cavitație vibratoare este cel propus de către Steller [146], în urma utilizării datelor obținute pe 5 materiale, în cele mai performante laboratoare din lume, dotate cu aparate vibratoare cu parametri funcționali diferiți. În urma analizei rezultatelor, folosind ca referință datele obținute pe oțelul inoxidabil 1H18N9T, în Laboratorul Institutului de Mașini cu Curent de Fluid din cadrul Academiei de Științe Poloneze din Gdansk, stabilește următoarea relație adimensională, pentru viteza medie de pătrundere a eroziunii cavitației:

$$MDER_{\max} = MDER_{ref} \cdot \left(\frac{A}{A_{ref}}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{f}{f_{ref}}\right)^{\beta} \quad (6.5)$$

Unde:

$A$  – este amplitudinea vibrațiilor măsurată vârf la vârf (amplitudinea dublă)

$f$  – este frecvența vibrațiilor

Indicele ref se referă la oțelul de referință (1H18N9T) și la aparatul de referință.

Valorile exponenților  $\alpha$  și  $\beta$ , tabelul 6.1, determinate prin metoda de regresie liniară, arată diferențele dintre intensitățile aparatelor vibratoare utilizate, dependente de parametrii funcționali (frecvența și amplitudinea vibrațiilor).

Tabel 6.1 Valorile exponenților  $\alpha$  și  $\beta$  [146]

Exponent	PA2	M63	E04	OLC45	1H18N9T
$\alpha$	2,17	1,68,	1,89	1,98	3,25
$\beta$	1,39	1,00	1,48	0,02	1,35

Deoarece intensitatea de distrugere a cavitației prin eroziune depinde și de ceilalți parametri funcționali ai aparatului vibrator (diametrul probei și puterea generatorului electronic de ultrasunete) [1, 15] apreciez că relația (6.5) este incompletă și nu poate fi utilizată ca efect de scală, nepermițând transpunerea rezultatelor de la un aparat vibrator la altul. Ea generează erori din cauza eliminării unor parametri funcționali de bază. Din acest motiv, propune o nouă formă [15]:

$$\frac{MDPR_1}{MDPR_2} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{\gamma} \quad (6.6)$$

Unde valorile exponenților diferă funcție de natura materialului (oțel inoxidabil, nichel sau aliaj de aluminiu):  $\alpha = 1,2...1,8$ ;  $\beta = 0,6...1,06$ ;  $\gamma = -0,14...-0,53$ . Domeniul larg de variație a valorilor acestor exponenți este un indicator al capacității materialului de a absorbi energia dezvoltată în procesul de eroziune, ca o expresie a rezistenței sale la eroziunea produsă de cavitația vibratoare.

### 6.2.5. Modelul Jurchela

În 2012, Jurchela [78], plecând de la cele 5 domenii de ierarhizare a materialelor după rezistența normalizată la cavitație,  $R_{ns}$ , tab.6.2, stabilite de Bordeășu și colaboratorii [15] oferă diagrame și relații ce permit ierarhizarea oțelurilor inoxidabile, cercetate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, testate pe aparatul vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel (amplitudinea dublă a vibrațiilor = 94  $\mu\text{m}$ , apă distilată la  $20 \pm 1$  °C, frecvența vibrațiilor  $7 \pm 3\%$  kHz, diametrul probei 14 mm, puterea electrică a generatorului de ultrasunete 500 W).

Tabelul 6.2 Limite pentru domeniile de rezistențe la eroziune cavitațională (cu materiale etalon OH12NDL)-preluare din Jurchela [78]

Clasa	superrezistentă	Excelentă	foarte bună	bună	slabă
$R_{ns}$	< 0,2	0,2 ÷ 0,4	0,4 ÷ 0,8	0,8 ÷ 1,6	> 1,6

Analizând influența raportului Cre/Nie asupra comportării și rezistenței la cavitația vibratoare a unei game de 19 oțeluri inoxidabile Jurchela [78], constăuiește diagramele din fig.6.1 prin care arată că oțeluri inoxidabile cu compoziții chimice diferite pot avea aceleași comportamente (rezistențe) la atacurile distructive ale cavitației, fapt dovedit în exploatarea mașinilor hidraulice. Totodată, Jurchela [78] stabilește o delimitare a domeniului oțelurilor cu rezistență sporită la cavitație în intervalul  $Cr_e/Ni_e \cong 1.0 \div 2.0$ , cu tendința de optimizare spre valoarea  $Cr_e/Ni_e \cong 1.8$

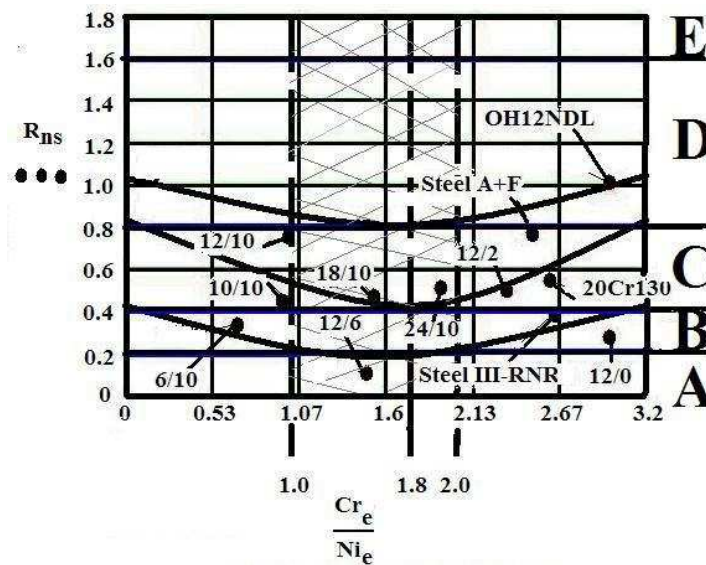


Fig.6.1 Ierarhizarea oțelurilor folosind corelarea rezistenței normalizate la eroziunea cavitației cu raportul  $Cr_e/Ni_e$  [78]

(A- superrezistență, B- rezistență excelentă, C- rezistență foarte bună, D- rezistență bună, E- rezistență slabă)

Mergând mai departe, plecând de la relația lui Sakai-Shima [134], Jurchela construiește expresia parametrului  $\psi$  prin care se corelează proprietățile mecanice cu raportul  $Cr_e/Ni_e$  și construiește diagrama din fig.6.2, ce servește, de asemenea, la stabilirea domeniului în care se poate regăsi un oțel inoxidabil testat pe aparatul vibrator magnetostrictiv.

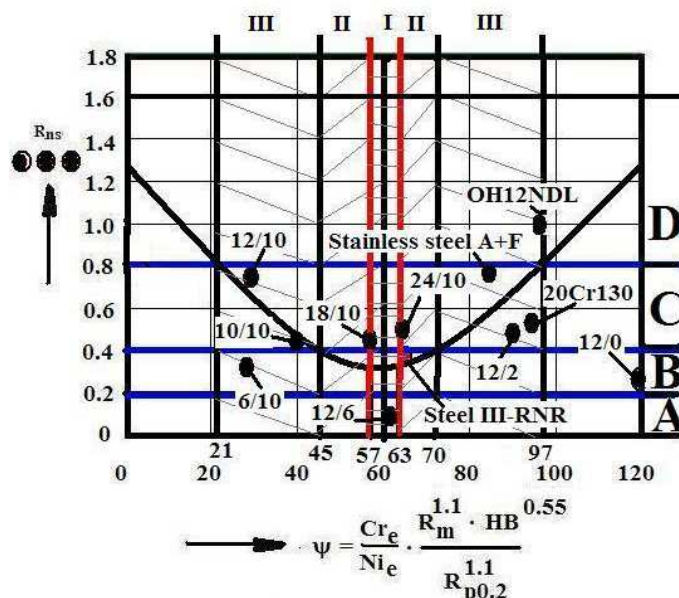


Fig.6.2 Influența constituției chimice și a proprietăților mecanice asupra rezistenței normalizate la cavitație [78]

(domenii tabelul 2: A- superrezistență, B- rezistență excelentă, C- rezistență foarte bună, D- rezistență bună)

I-oțeluri superrezistente și cu excelentă rezistență la cavitație; II -oțeluri cu foarte bună rezistență la cavitație; III - oțeluri cu bună rezistență la cavitație

Prin diagramele de corelare a rezistenței normalizate la cavitație  $R_{ns}$  cu raportul  $Cr_e/Ni_e$  (fig.6.1) sau coeficientul  $\psi$  (fig.6.2), Jurchela susține că acestea permit anticiparea comportamentului. De asemenea se sugerează că pentru oțelurile cu rezistențe superioare la cavitația vibratoare valoarea de optim a raportului  $Cr_e/Ni_e$ , așa cum s-a precizat, este în jur de 1,8, iar a coeficientului  $\psi$  în jur de 60.

### 6.2.6. Modelul Karabenciov

Folosind același principiu de ierarhizare a oțelurilor inoxidabile, pe domeniile de rezistență, după valorile parametrului  $R_{ns}$ , utilizând ca referință materialul etalon OH12NDL, Karabenciov [83] mărește gradul de aplicabilitate prin noi diagrame și relații de corelare cu proprietățile mecanice și raportul  $Cr_e/Ni_e$ , fig.6.3 și 6.4, în care domeniile de clasificare a oțelurilor cercetate se limitează superior, după valorile parametrului  $1/MDER$ , prin curbe similare celei stabilite de Sakai-Shima [10, 134] (prin curba IV „linie continuă” s-a limitat inferior domeniul de existență al oțelurilor cercetate, iar prin curba “linie întreruptă” autorul consideră că orice creștere a parametrilor  $\Phi_1$  și  $\psi_1$  are loc doar prin tratamente ce duc la creșterea valorilor caracteristicilor mecanice (termice, termochimice, mecanice, neconvenționale, etc).

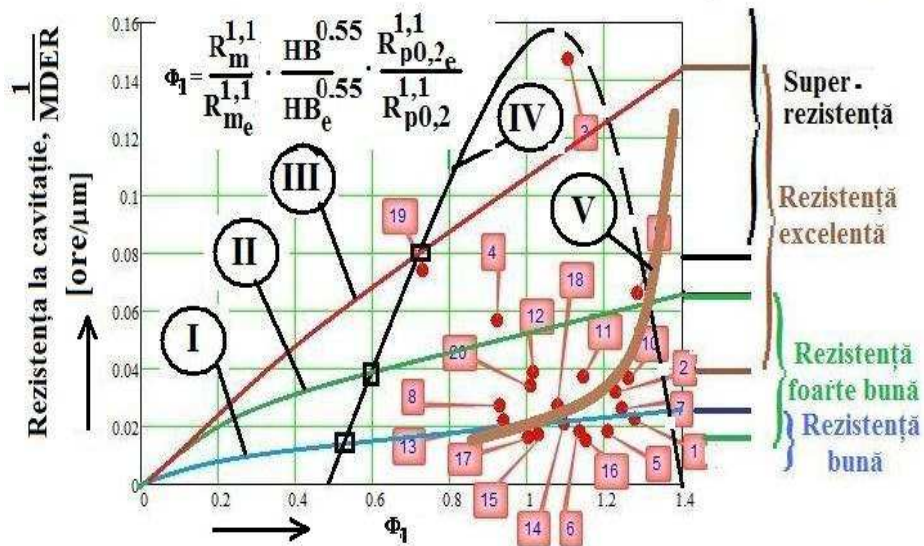


Fig.6.3 Influența proprietăților mecanice asupra rezistenței la cavitație-preluare din [83]

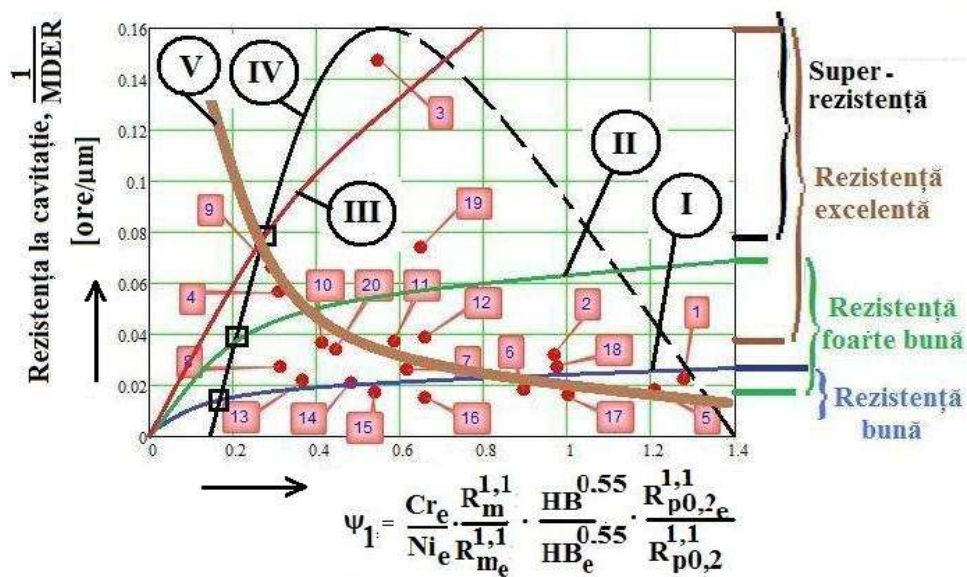


Fig. 6.4 Influența proprietăților mecanice și a constituției chimice asupra rezistenței la cavitație -preluare din [83]

Ecuțiile curbelor din fig.6.3 și 6.4, ce delimitează superior domeniile de rezistență la cavitație pentru oțelurile inoxidabile utilizate și cercetate în aparatul magnetostrictiv cu tub de nichel T1, sunt [83]:

- **pentru corelarea cu parametrul  $\Phi_1$**

- **pentru curba I**

$$1/\text{MDER} = 0,022 \cdot (1 - e^{-1,2 \cdot \Phi_1}) + 0,022 \cdot 1,2 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-1,2 \cdot \Phi_1} \quad (6.7)$$

- **pentru curba II**

$$1/\text{MDER} = 0,006 \cdot (1 - e^{-0,09 \cdot \Phi_1}) + 0,006 \cdot 0,09 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-0,09 \cdot \Phi_1} \quad (6.8)$$

- **pentru curba III**

$$1/\text{MDER} = 0,31 \cdot (1 - e^{-0,02 \cdot \Phi_1}) + 0,31 \cdot 0,2 \cdot \Phi_1 \cdot e^{-0,2 \cdot \Phi_1} \quad (6.9)$$

- **pentru corelarea cu parametrul  $\psi_1$**

- **pentru curba I**

$$1/\text{MDER} = 0,024 \cdot (1 - e^{-1,8 \cdot \psi_1}) + 0,024 \cdot 1,8 \cdot \psi_1 \cdot e^{-1,8 \cdot \psi_1} \quad (6.10)$$

- **pentru curba II**

$$1/\text{MDER} = 0,06 \cdot (1 - e^{-1,9 \cdot \psi_1}) + 0,06 \cdot 1,9 \cdot \psi_1 \cdot e^{-1,9 \cdot \psi_1} \quad (6.11)$$

- **pentru curba III**

$$1/\text{MDER} = 0,18 \cdot (1 - e^{-0,9 \cdot \psi_1}) + 0,18 \cdot 0,9 \cdot \psi_1 \cdot e^{-0,9 \cdot \psi_1} \quad (6.12)$$

Pe baza intersecției dintre curbele IV cu I, II și III Karabenciov stabilește domeniul de valori ale parametrului  $\Phi_1$  și  $\psi_1$  pentru 4 clase de rezistență la cavitația vibratoare, tabelele 6.3 și 6.4.

Tabelul 6.3 Limite pentru domeniile de rezistențe la eroziune cavitațională [83]

Parametrul de corelare	Clasa			
	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
	Parametrul rezistenței la cavitație 1/MDER [ore/ $\mu\text{m}$ ]			
$\Phi_1$	>0,08	0,039-0,08	0,016-0,039	<0,016

**Notă:** În relația  $\Phi_1 = \left(\frac{R_m}{R_{me}}\right)^{1.1} \cdot \left(\frac{R_{p0,2e}}{R_{p0,2}}\right)^{1.1} \cdot \left(\frac{HB}{HB_e}\right)^{0.55}$  valorile notate cu „e”

sunt ale oțelului OH12NDL, etalon pentru Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara.

Tabelul 6.4 Limite pentru domeniile de rezistențe la eroziune cavitațională [83]

Parametrul de corelare	Clasa			
	superrezistentă	excelentă	foarte bună	bună
	Parametrul rezistenței la cavitație 1/MDER [ore/ $\mu\text{m}$ ]			
$\psi_1$	>0,077	0,038-0,07	0,017-0,039	<0,017

**Notă:** În relația  $\Psi_1 = \frac{Cr_e}{Ni_e} \cdot \left(\frac{R_m}{R_{me}}\right)^{1.1} \cdot \left(\frac{R_{p0,2e}}{R_{p0,2}}\right)^{1.1} \cdot \left(\frac{HB}{HB_e}\right)^{0.55}$  valorile notate

cu „e”, pentru proprietățile mecanice, sunt ale oțelului OH12NDL, etalon pentru Laboratorul de Cavitație din cadrul U.P. Timișoara.

Referitor la datele din tabelele 6.3 și 6.4 concluzia lui Karabenciov este că, prin acest mod de limitare superioară, suprapunerea dintre clase, pentru valori ridicate ale parametrului  $\Phi_1$  și  $\psi_1$ , arată că delimitarea prin valori sigure este imposibilă pentru un proces de complexitate a cavitației.

În concluzie din diagramele construite de Karabenciov rezultă că se pot genera oțeluri inoxidabile care, în anumite combinații de structuri și proprietăți mecanice, pot avea comportări și rezistențe similare la eroziunea cavitației vibratoare. Totodată, aceste diagrame pot servi la o primă evaluare/estimare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a oțelurilor inoxidabile testate pe aparatul vibrator magnetostrictiv.

### 6.2.7. Modelul Bordeășu

Obișnuit, evaluarea comportării și rezistenței la cavitația vibratoare, este realizată pe baza parametrilor recomandați de normele ASTM G32-2010 [158] și folosiți de laboratoare recunoscute cum sunt cele din Michigan [54, 146], Wuxi [146], UP Timișoara [5-34, 56-59, 76-77, 92-93, 99-104, 129-130], dintre care, cei mai utilizați, sunt curbele specifice ale pierderilor cumulate, fig.6.5, și ale vitezei de eroziune (maximă sau de stabilizare), fig.6.6. Ca evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației să fie cât mai bună se impune construirea curbelor de aproximare a punctelor experimentale cu relații analitice, care au la bază prelucrarea statistică.

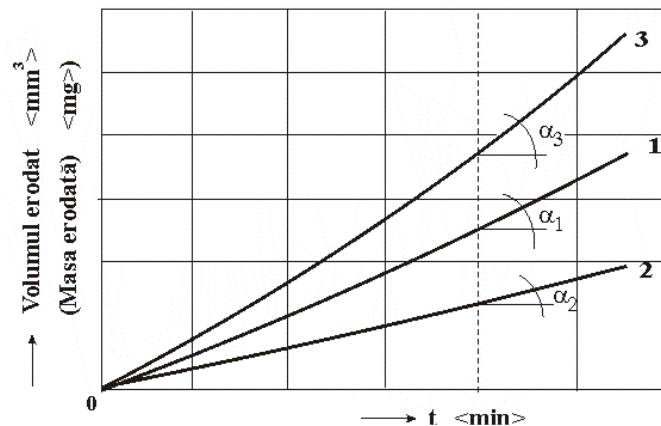


Fig.6.5 Tipuri de curbe ce exprimă variația volumului dislocat (masei dislocate) pe parcursul atacului cavitației, (prelucrare după [15])  
1, 2, 3 – materiale cu comportări și rezistențe diferite la cavitația vibratoare



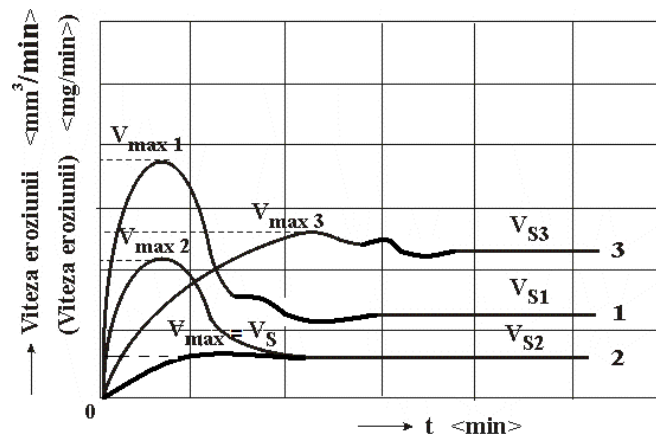


Fig.6.6 Tipuri de curbe ce exprimă variația vitezei de eroziune cu durata expunerii la cavitație (prelucrare după [15])  
 ( $V_{\max}$ - valoarea maximă a vitezei de eroziune dată de curba de mediere;  $v_s$ - valoarea spre care tinde să se stabilizeze viteza de eroziune)  
 1, 2,3 - tipuri de curbe de mediere, pentru materiale cu comportare și rezistență diferită la cavitația vibratoare

Plecând de la acest considerent, Bordeașu și colaboratorii [16] construiesc un model analitic care permite construirea curbei cumulate de pierderi care, prin derivare, duce direct la curba vitezei de eroziune, de formă similară celor descrise de normele ASTM G32-2010 și celor prezentate la capitolele 4 și 5.

Astfel, cum pierderile masice (dar poate fi și pierderea de volum sau evoluția adâncimii medii de eroziune) prezintă o variație exponențială, cu ultima porțiune liniară (fig.6.5), se constată că matematic această variație poate fi descrisă de soluția următoarei ecuații diferențiale liniare [14-16]:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M}{t} + Kte^{-Bt}, \quad t \geq 0, \quad B > 0 \quad (6.13)$$

După valorile lui  $K$  avem două cazuri ( $K > 0$ , respectiv  $K < 0$ ). Din cele două doar cazul  $K > 0$  oferă soluția acceptată.

Astfel, notând  $K = B \frac{K}{B}$ , respectiv  $\frac{K}{B} = A > 0$  ecuația (6.13) devine:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M}{t} + ABte^{-Bt}, \quad t \geq 0 \quad (6.14)$$

a cărei soluție generală este:

$$M(t) = t(C - Ae^{-Bt}) \quad (6.15)$$

Viteza eroziunii cavitaționale este:

$$v(t) = \frac{dM(t)}{dt} = C + Ae^{-Bt}(Bt-1) \quad (6.16)$$

Cum la  $t = 0$  masa erodată este  $m = 0$  rezultă:

$$C = A, \quad (6.17)$$

În fig.6.7 se prezintă curbele teoretice  $m(t)$  și  $v(t)$  construite cu relațiile (6.15) și (6.16) folosind pentru coeficienții  $A$  și  $B$  valori arbitrare ( $A = 0,084$ ;  $B = 0,024$ ).

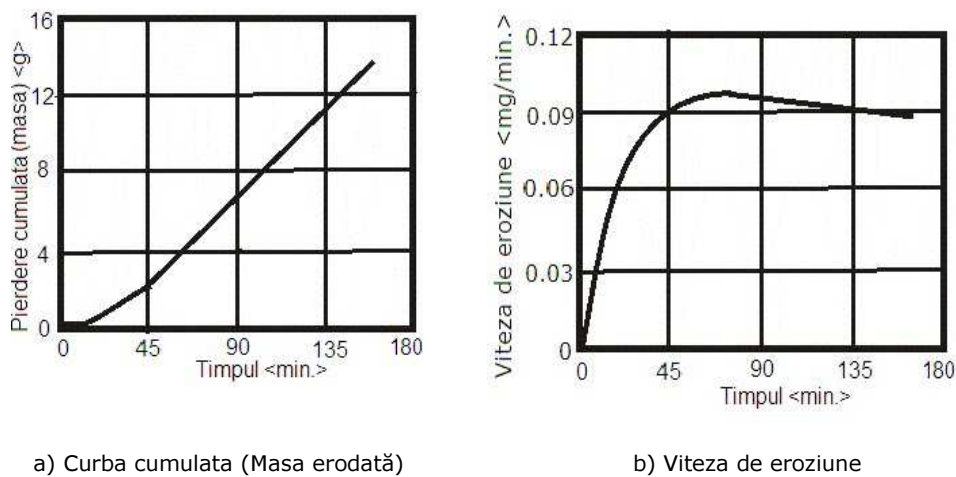


Fig.6.7 Curbe teoretice ale eroziunii prin cavitație [16]

Deoarece, formele curbelor din fig.6.7 este în concordanță cu evoluțiile din fig.6.5 și 6.6, precum și ale curbelor vitezei de eroziune indicate de literatură, arată că relațiile (6.15) și (6.16), sunt soluții pentru curbele specifice de eroziune a cavitației.

Determinarea constantelor  $A$  și  $B$  poate fi realizată prin una din metode [15, 16]:

**a.** utilizarea masei totale erodate (volumului total, adâncimii medii cumulate totale) la sfârșitul atacului cavitațional, durata totală a atacului cavitațional,  $t_{total}$  și a timpului  $t_M$  la care se poate atinge maximul vitezei de eroziune  $v_M$  (stabilit experimental pe clase de materiale);

**b.** utilizarea timpului  $t_M$  la care se atinge maximul vitezei de eroziune cavitațională și viteza de stabilizare  $v_s$ - mărimi caracteristice curbei experimentale a vitezei de eroziune;

**c.** metoda celor mai mici patrate.

**Precizare:** cele trei metode se bazează pe datele obținute experimental. Prima și a treia metodă folosesc valorile pierderilor cumulate, iar metoda a doua se bazează pe ale vitezei de eroziune.

Din evaluările și experiența colectivului, care lucrează în Laboratorul de Cavitație al UPT, se poate afirma că metoda propusă de Bordeasu și colaboratorii este una

adecvată pentru descrierea curbelor caracteristice de cavitație și prezintă avantajul că parametrii A și B pot fi ușor de determinat pe baza rezultatelor experimentale.

### 6.3. Conceptul propus

#### 6.3.1. Introducere

Modelele prezentate mai sus arată că nu există o relație sau model care să fie acceptat de toate laboratoarele, fiecare preferând să aibă metode și modele, cu materiale de referințe proprii. Evaluarea comportării și a rezistenței la eroziunea cavitației făcându-se după propriile cutume. Însă, normele ASTM G32-2010 [158] recomandă ca evaluarea comportamentului și rezistenței materialelor la eroziunea cavitației să se realizeze prin curbele de mediere a punctelor experimentale care dau variația cantității de material dislocat de eroziune, a adâncimii realizate la diferite perioade, respectiv a vitezelor cu care se realizează îndepărtarea cantității de material sau cu care pătrunde distrugerea în structură, cu durata atacului cavitației. Forma curbelor cumulate pentru pierderea de material ( $M(t)$ ), respectiv adâncimea medie de pătrundere a eroziunii ( $MDE(t)$ ) fac ca acestea să fie descrise cu relații exponențiale, de forma celei stabilite de Bordeasu [6, 7, 8, 9, 13, 17-19, 21, 23, 58, 59, 78, 82, 83, 100, 101, 103, 135-139], în care intervin parametrii de scală și de formă. Aceștia permit determinarea valorilor principalilor parametri ce caracterizează rezistența materialului la cavitație (precum adâncimea medie de pătrundere după o anumită perioadă de solicitare MDE, viteza medie de pătrundere a eroziunii MDER, sau rezistența la eroziunea cavitației exprimată prin  $R_{cav} \equiv 1/MDER$ ). Analizele realizate în cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, sugerează că acești parametri, prin compararea valorii, pot servi la ierarhizarea materialelor după rezistența opusă cavitației.

În cadrul acestui capitol se prezintă un nou concept de ierarhizare după rezistența la cavitație a unei game de oțeluri inoxidabile care au fost cercetate în Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Acest concept este construit pe baza diagramei ce dă corelația dintre rezistența la cavitație ( $R_{cav}$ ) și parametrii de scală și formă ai curbelor caracteristice  $MDE(t)$ , respectiv  $MDER(t)$  și a fost prezentat în lucrarea publicată la Conferința ICAS 2016 [34].

#### 6.3.2. Punerea problemei

În Laboratorul de Cavitație, din Universitatea Politehnica Timișoara, pe baza experienței acumulate în peste 70 de ani, corelat cu prevederile ASTM G32-2010, dar și datorită faptului că tehnologiile de îmbunătățire a caracteristicilor suprafețelor supuse cavitației sunt într-o continuă evoluție, în ultimul timp, pentru caracterizarea rezistenței la distrugere cavitațională se folosesc trei parametri. Doi dintre ei, sunt determinați pe baza curbelor ce dau dependența de durata atacului cavitației a adâncimii medii de pătrundere a eroziunii  $MDE(t)$ , respectiv a vitezei de pătrundere a eroziunii  $MDER(t)$  [28, 77, 83, 103]. Utilizarea acestor curbe, respectiv a parametrilor determinați pe baza lor, s-a dovedit a exprima cât mai fidel rezistența la cavitație, în special la oțelurile inoxidabile și bronzurile navale de înaltă rezistență, cu sau fără tratamente de durificare structurală și superficială, respectiv acoperite, prin tehnici moderne, cu diverse pulberi ceramice [119]. Cel de-al treilea, rezistența normalizată  $R_{ns}$ , este un parametru adimensional, stabilit prin raportarea vitezei

caracteristică a materialului cercetat la vitezele materialelor etalon ale Laboratorului (oțelul OH12NDL, de producție rusească, de referință pentru paletelor și rotoarele turbinelor hidraulice din România și oțelul carbon aliat 41Cr4, folosit ca material de comparație pentru o gamă largă de oțeluri folosite în construcția echipamentelor hidromecanice).

Mai jos sunt reluate relațiile, stabilite de Bordeasu și colaboratorii [14, 29, 78, 83], la paragraful 6.2.7, ce stau la baza construirii curbelor MDE(t) și MDER(t) ce permit determinarea parametrilor utilizați la evaluarea/compararea rezistențelor la eroziunea cavitației vibratoare:

- pentru adâncimea medie de pătrundere a eroziunii

$$MDE(t) = A \cdot t \cdot (1 - e^{-Bt}) \quad (6.18)$$

- pentru viteza medie de pătrundere a eroziunii

$$MDER(t) = A \cdot (1 - e^{-Bt}) + A \cdot B \cdot t \cdot e^{-Bt} \quad (6.19)$$

unde:  $A$  este un parametru de scală stabilit statistic pentru construirea curbei de aproximație, cu condiția ca abaterile punctelor experimentale față de această curbă să fie minime.

$B$  este un parametru de formă.

Rezistența normalizată la cavitație  $R_{ns}$  are expresia:

$$R_{ns} = v_s / v_{se} \quad (6.20)$$

Unde:

$v_s$  - este valoarea spre care tinde să se stabilizeze curba de mediere a vitezei de eroziune (indiferent la ce ne raportăm - masă de material erodat, volum dislocat, sau de pătrundere a eroziunii), a materialului cercetat;

$v_{se}$  - valoarea spre care tinde să se stabilizeze curba de mediere a vitezei de eroziune a materialului etalon (în cazul UPT oțelul inoxidabil OH12NDL).

Deoarece ierarhizarea după rezistența normalizată la cavitație  $R_{ns}$  s-a dovedit a fi una bună pentru Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, dar care implică folosirea, de fiecare dată, a datelor pentru oțelurile de referință. Prin folosirea doar a parametrului de scală  $A$  se reduce durata de evaluare.

### 6.3.3. Materialele utilizate în realizarea conceptului

Materialele utilizate în construirea noului concept sunt oțelurile inoxidabile (turnate și laminate) aflate în starea recoaptă, destinate fabricării pieselor de mașini hidraulice intens solicitate la cavitație. Deoarece aceste oțeluri (cu excepția celui etalon OH12NDL) nu sunt standardizate, pentru identificare s-a folosit următoarea simbolizare  $Cx\text{Cr}y\text{Ni}z$ . Unde:

$x = 1, 036$  sau  $030$  - reprezintă conținutul de carbon (1 - reprezintă 0.1 %, 036 - reprezintă 0.036 %, 030 - reprezintă 0.030 %);

$y = 2, 6, 10, 12, 13, 14, 16, 18, 24$  - reprezintă conținutul aproximativ de crom, în %

$z = 05, 2, 4, 6, 8, 10$  - reprezintă conținutul aproximativ de nichel, în %.

Datele necesare, pentru aceste oțeluri au fost prelucrate după cele oferite de următoarele referințe bibliografice:

- [82, 83] pentru oțelurile C1Cr6Ni10, C1Cr10Ni10, C1Cr18Ni10, C1Cr24Ni10, C036Cr13Ni10, C036Cr14Ni10, C036Cr16Ni10, C036Cr18Ni10, OH12NDL,
- [77, 78] pentru oțelurile C1Cr12Ni05, C1Cr12Ni2, C1Cr12Ni6, C1Cr12Ni10, C036Cr12Ni6, C036Cr12Ni8, C036Cr12Ni2, C036Cr12Ni4,
- [21] pentru oțelurile C030Cr12Ni2, C030Cr12Ni6

În tabelul 6.5 este prezentată ierarhizarea după rezistența normalizată la cavitație, prezentată de Jurchela și Karabenciov [78, 83], în care este cuprins și oțelul cercetat în cadrul tezei. De asemenea, în acest tabel, sunt date constituțiile structurale, după diagrama Schäffler, fig.6.8.

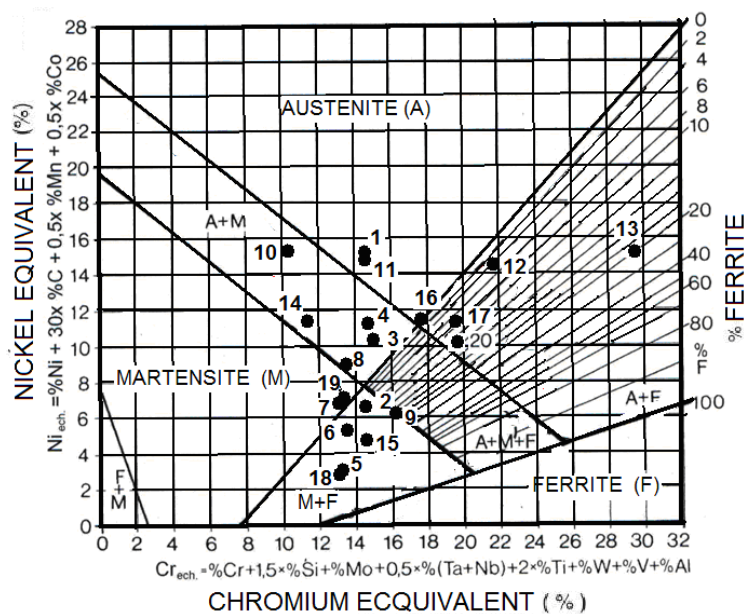


Fig.6.8 Poziționarea oțelului pe diagrama Schäffler

- 1- C1Cr12Ni10, 2- C1Cr12Ni2, 3- C1Cr12Ni6, 4- C036Cr14Ni10, 5- C036Cr12Ni2, 6- C036Cr12Ni4, 7- C036Cr12Ni6, 8- C036Cr12Ni8, 9- OH12NDL, 10- C1Cr6Ni10, 11- C1Cr10Ni10, 12- C1Cr18Ni10, 13- C1Cr24Ni10, 14- C036Cr13Ni10, 15- C1Cr12Ni05, 16- C036Cr16Ni10, 17- C036Cr18Ni10, 18- C030Cr12Ni2, 19- C030Cr12Ni6, 20- X5CrNi18-10

Tabelul 6.5 Ierarhizarea oțelurilor după rezistența normalizată la cavitației [78,83].

Rezistența la cavitație	Materialul	Rns	Structura
Superrezistență < 0,2	C1Cr12Ni6	0,11	60%A+40%M
Excelentă [0,2 ÷ 0,4)	C1Cr6Ni10	0,24	32% M + 68% A
	C1Cr12Ni10	0,29	100 %A
Foarte bună [0,4 ÷ 0,8)	C1Cr10Ni10	0,44	100% A
	C1Cr18Ni10	0,43	98% A + 2% F
	C1Cr24Ni10	0,41	81% A + 19% F
	X5CrNi18-10	0,54	88% A+12 %F
	C036Cr13Ni10	0,73	55% M + 45% A
	C036Cr14Ni10	0,76	30% M + 70% A
	C1Cr12Ni2	0,51	90%M+10%F
	C036Cr12Ni6	0,62	100 %M
	C036Cr12Ni8	0,59	90 %M +10%A
	C030Cr12Ni6	0,57	100 % M
Bună [0,8 ÷ 1,6)	OH12NDL	1,0	84%M+16%F
	C036Cr16Ni10	0,92	100% A
	C036Cr18Ni10	1,05	93% A + 7% F
	C1Cr12Ni05	0,88	75% M+ 25 % F
	C036Cr12Ni2	0,88	55 %M+45 %F
	C036Cr12Ni4	0,88	86%M+14 %F
	C030Cr12Ni2	1,14	40%M+60%F

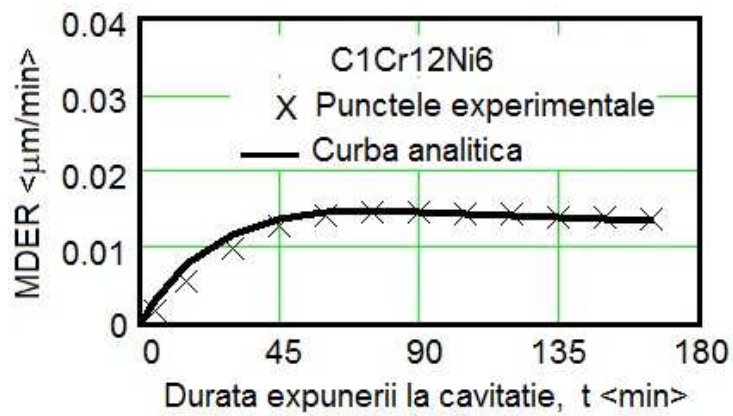
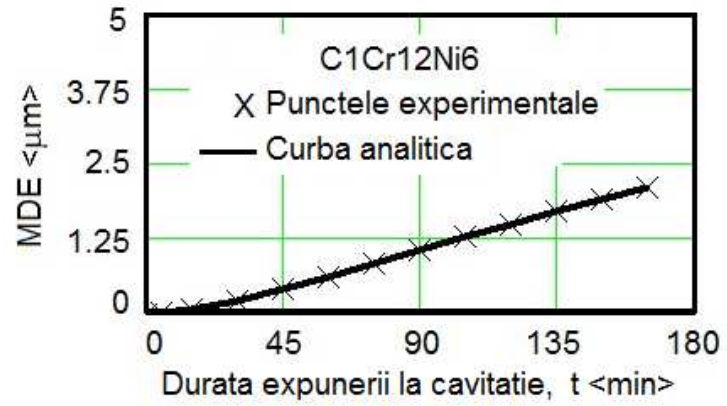
Toate cele 20 oțeluri au fost cercetate în aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice din cadrul Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara. Condițiile de cercetare privind procedura, parametrii aparatului (frecvență și amplitudine vibrații, putere generator electronic cu ultrasunete, diametrul epruvetei, temperatura apei) au fost aceleași, în conformitate cu cerințele ASTM G32-2010 și cu respectarea cutumei laboratorului [5-34, 45], [56-59], [76-78, 82-83, 87, 99-104, 120-121, 125, 129-130, 135-139] privind: duratele totală și intermediare ale atacului cavitației, starea suprafeței probei, pregătirea probei în vederea testării, păstrarea probei în pauzele dintre perioadele intermediare ale atacului cavitației, determinarea pierderilor, prelucrarea rezultatelor experimentale, construirea curbelor specifice.

#### 6.3.4. Corelarea rezistenței la cavitație cu parametrii de scară și formă

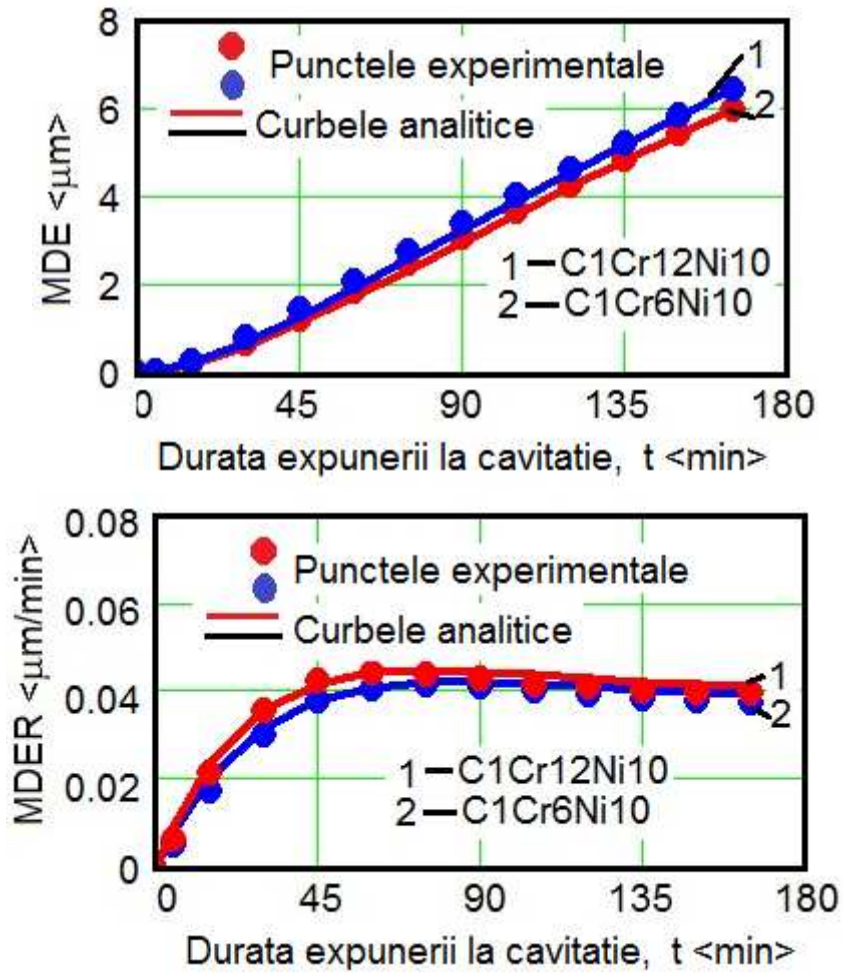
În fig.6.9 se prezintă diagramele realizate pentru fiecare clasă de rezistență, definită conform tabelului 6.5, care stau la baza analizei comportării la cavitație. În acestea sunt construite curbele de mediere a punctelor experimentale, definite de relațiile (6.18) și (6.19). În tabelul 6.6 sunt afișate valorile parametrilor  $A$  și  $B$ , precum și a rezistenței la cavitație, definită de relația:

$$R_{cav} = 1/MDER_s \quad (6.21)$$

Unde:  $MDER_s$  reprezintă valoarea finală de palier (spre care se tinde) a curbei  $MDER(t)$ .

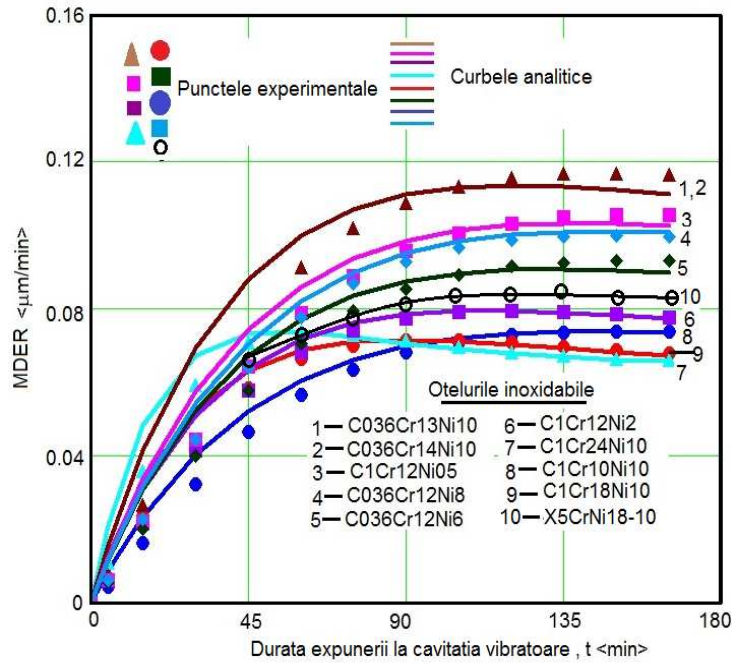
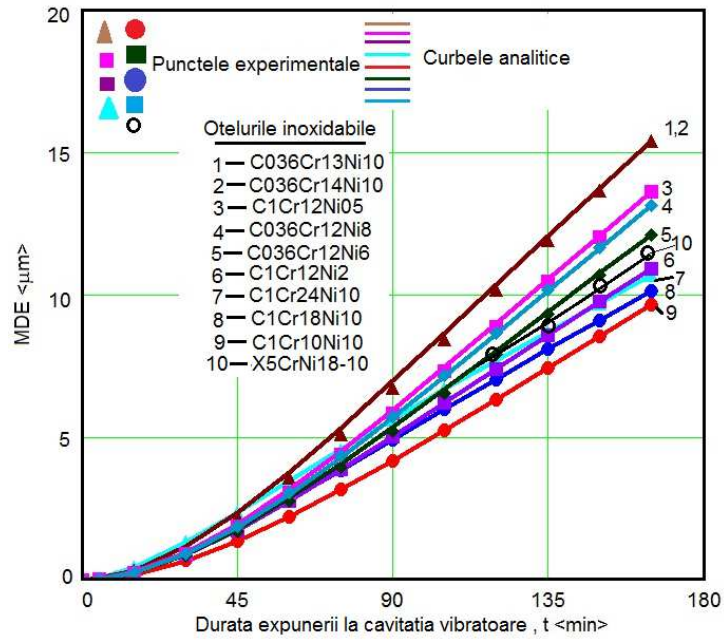


a) Oțelul superrezistent la eroziunea cavitației



b) Oțeluri cu excelentă rezistență





c) Oțel cu foarte bună rezistență

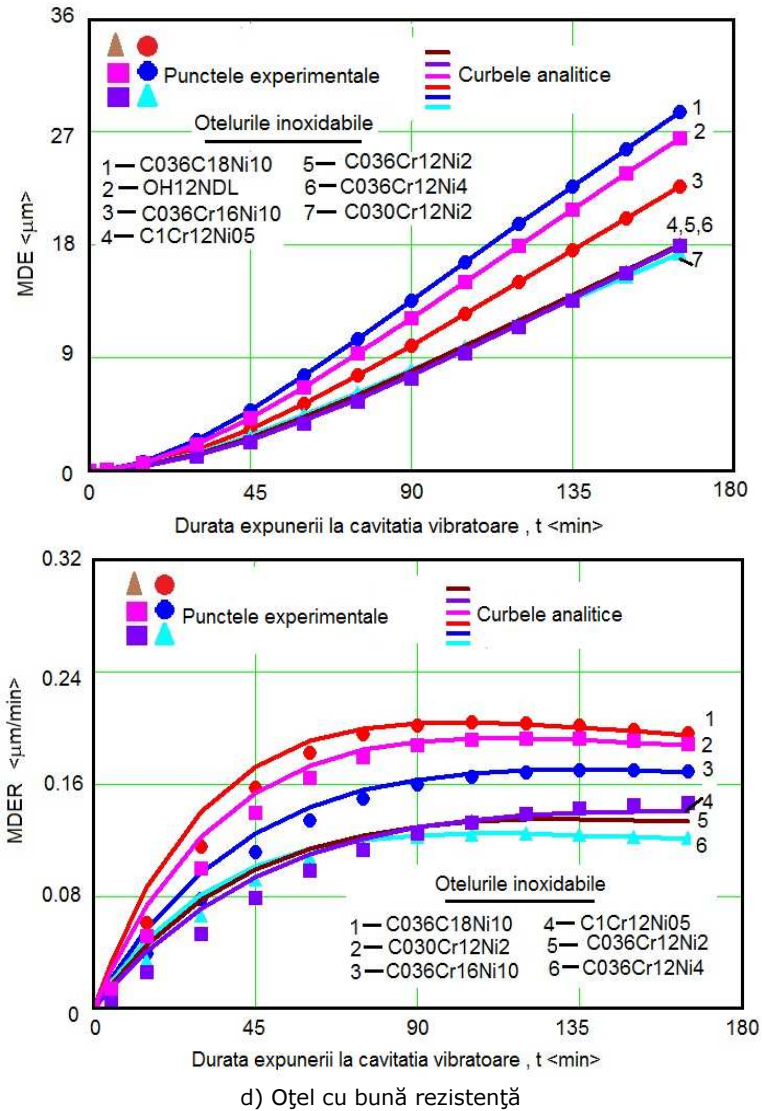


Fig.6.9 Curbele caracteristice de cavitație

- a) oțel superrezistent la cavitație; b) oțel cu excelentă rezistență la cavitație; c) oțel cu foarte bună rezistență la cavitație; d) oțel cu bună rezistență la cavitație

În tabelul 6.6 sunt afișate valorile parametrilor de scală  $A$  și de formă  $B$  ai curbelor analitice de mediere, precum și valoarea rezistenței la cavitație  $R_{cav}$ , prin care se constată respectarea ierarhizării realizate după parametrul  $R_{nsr}$ , din tabelul 1.

Tabelul 6.6 Ierarhizarea oțelurilor după rezistența la eroziunea cavitației și valorile parametrilor de scara și formă ai curbelor analitice de mediere a punctelor experimentale

Rezistența la cavitație	Materialul	R <sub>cav</sub>	Parametrul A	Parametrul B
Superrezistență	C1Cr12Ni6	78	0.013	0.027
Excelentă	C1Cr6Ni10	23	0.04	0.022
	C1Cr12Ni10	22	0.037	0.024
Foarte bună	C1Cr10Ni10	13	0.067	0.013
	C1Cr18Ni10	13	0.068	0.014
	C1Cr24Ni10	14	0.066	0.025
	X5CrNi18-10	12	0.072	0.019
	C036Cr13Ni10	9	0.10	0.017
	C036Cr14Ni10	10	0.09	0.015
	C1Cr12Ni2	13	0.07	0.018
	C036Cr12Ni6	11	0.08	0.015
	C036Cr12Ni8	10	0.09	0.013
	C030Cr12Ni6	10	0.086	0.016
Bună	OH12NDL	5	0.17	0.018
	C036Cr16Ni10	6	0.15	0.015
	C036Cr18Ni10	5	0.18	0.02
	C1Cr12Ni05	8	0.11	0.018
	C036Cr12Ni2	7	0.12	0.014
	C036Cr12Ni4	7	0.12	0.014
	C030Cr12Ni2	5	0.191	0.026

Figura 6.10 arată modul de variație a rezistenței la cavitație cu parametrul de scara. Se observă că odată cu creșterea valorii parametrului A rezistența oțelului, la eroziunea produsă de cavitația vibratoare, tinde să scadă exponențial.

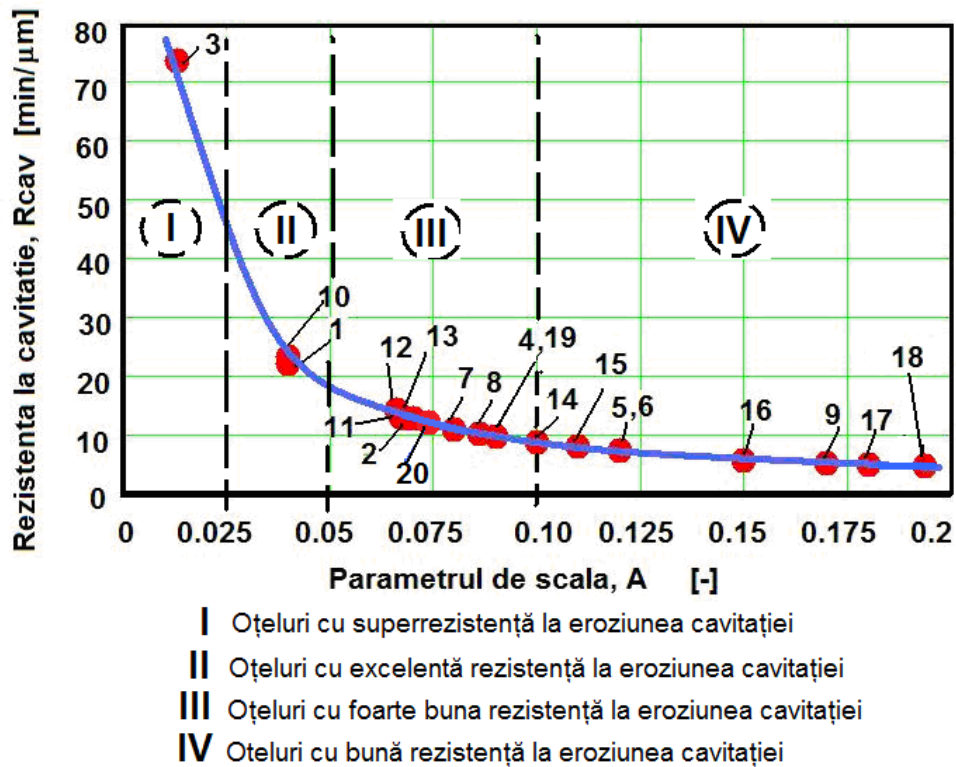


Fig.6.10 Corelarea rezistenței la cavitație cu parametrul de scală  $A$   
 1- C1Cr12Ni10, 2- C1Cr12Ni2, 3- C1Cr12Ni6, 4- C036Cr14Ni10, 5- C036Cr12Ni2, 6- C036Cr12Ni4, 7- C036Cr12Ni6, 8- C036Cr12Ni8, 9- OH12NDL, 10- C1Cr6Ni10, 11- C1Cr10Ni10, 12- 1Cr18Ni10, 13- C1Cr24Ni10, 14- C036Cr13Ni10, 15- C1Cr12Ni05, 16- C036Cr16Ni10, 17- C036Cr18Ni10, 18- O30Cr12Ni2, 19- C030Cr12Ni6, 20- X5CrNi18-10

Luând în considerare ierarhizarea din tabelele 6.5 și 6.6, se observă că și după valoarea parametrul  $A$  se poate realiza o clasificare similară, respectând același principiu (dublând limitele intervalelor la trecerea dintr-o clasă în alta). Astfel, clasele de rezistență, pentru eroziunea cavitației generată de aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice din Laboratorul de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, au domeniile cuprinse în următoarele intervale limitate de valorile parametrului de scală:

- superrezistență pentru  $A < 0.025$
- rezistență excelentă pentru  $A \in [0.025-0.05)$
- foarte bună rezistență pentru  $A \in [0.05-0.1)$
- bună rezistență pentru  $A \in [0.1-0.2)$

Acest mod de variație arată că valoarea parametrului  $A$  este dependentă de caracteristicile fizico-mecanice ale materialului și de intensitatea impactului dintre microjeturile și undele de șoc, rezultate din implozia bulelor cavitaționale, cu suprafața expusă cavitației.

Figura 6.11 arată că parametrul de formă, din relațiile (6.18) și (6.19) de definire a curbelor caracteristice eroziunii cavitației, nu are influență semnificativă asupra rezistenței la cavitație, neputând servi la realizarea unei ierarhizări.

Indiferent de clasa de rezistență admisă, valoarea parametrului, pentru oțelurile inoxidabile considerate, se situează în intervalul (0.012-0.028), fără a se putea deduce o anumită lege de corelare între cei doi parametri  $R_{cav}$  și B.

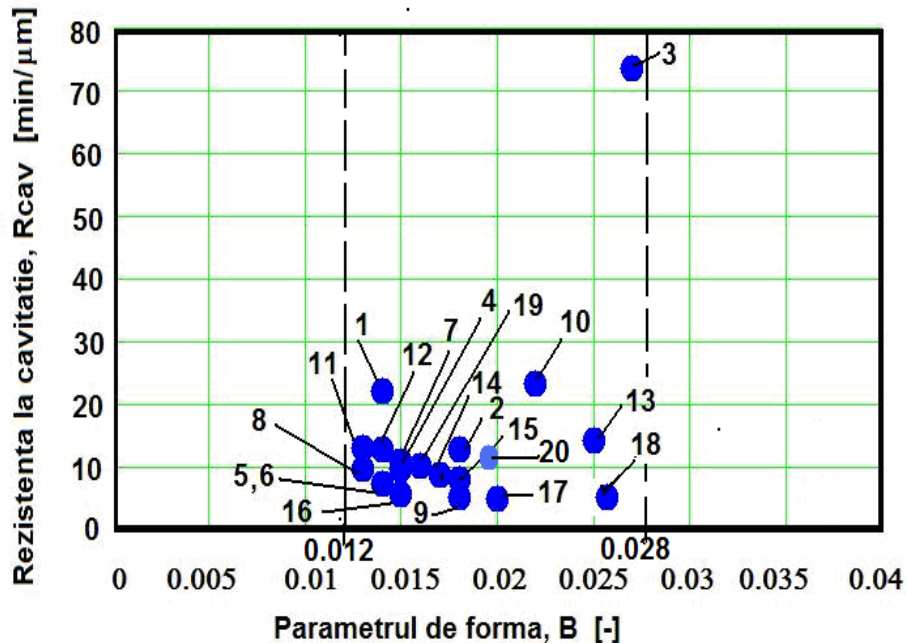


Fig.6.11 Corelarea rezistenței la cavitație cu parametru de formă B  
 1- C1Cr12Ni10, 2- C1Cr12Ni2, 3- C1Cr12Ni6, 4- C036Cr14Ni10, 5- C036Cr12Ni2, 6- C036Cr12Ni4, 7- C036Cr12Ni6, 8- C036Cr12Ni8, 9- OH12NDL, 10- C1Cr6Ni10, 11- C1Cr10Ni10, 12- C1Cr18Ni10, 13- C1Cr24Ni10, 14- C036Cr13Ni10, 15- C1Cr12Ni05, 16- C036Cr16Ni10, 17- C036Cr18Ni10, 18- C030Cr12Ni2, 19- C030Cr12Ni6, 20- X5CrNi18-10

Urmărind forma curbelor MDER(t) din fig.6.9, se constată că, indiferent de clasa de rezistență, de valoarea parametrului B depinde forma curbei, cu maxim mai pronunțat, cu un maxim aplatizat, sau cu valoare maximă egală cu cea la care viteza se stabilizează. De asemenea, un alt argument care arată că acest parametru caracterizează mai mult comportarea materialului (dictată de starea și de calitatea suprafeței probei la debutul cavitației) și mai puțin de caracteristicile sale fizico-mecanice și intensitatea fenomenului hidrodinamic, îl reprezintă valorile apropiate ale oțelurilor din clase diferite (oțelul cu superrezistență (C1Cr12Ni6) și cele cu bună rezistență (C1Cr24Ni10 și C030Cr12Ni2)).

### 6.3.5. Concluzii parțiale

1. Parametrul de scală A, din ecuațiile (6.18) și (6.19), ce permit construirea curbelor caracteristice de eroziune, constituie criteriu de ierarhizare a materialelor după rezistența pe care acestea o au față de eroziune generată de cavitația produsă de aparatele vibratorii, similar ierarhizării realizate după rezistența normalizată  $R_{ns}$ . Modul exponențial de variație al rezistenței la cavitație, cu parametru de scală,

sugerează dependența acestei corelări de caracteristicile fizico-mecanice ale oțelului și intensitatea hidrodinamicii cavitației.

2. Pentru stabilirea clasei de rezistență în care se poate încadra un oțel testat în aparatul vibrator standard din Laboratorul de Cavitație din UPT este suficient a se determina valoarea parametrului A, la construirea curbei de mediere a punctelor experimentale, fără a se mai utiliza compararea cu curbele oțelului de referință.

3. Conceptul descris poate fi utilizat și pentru stabilirea limitelor claselor de rezistență la cavitația vibratoare, dacă se folosesc curbele caracteristice specifice pierderilor de masă și volum, respectiv vitezelor acestora. Evident, în acest caz, valorile limitelor intervalelor se modifică în mod corespunzător.

4. Valoarea parametrului de formă B, din relațiile (6.18) și (6.19), fiind determinată de starea suprafeței probei, expusă atacului cavitației, care dictează comportarea din primele minute ale atacului, nu poate servi drept criteriu de ierarhizare după rezistența la eroziunea cavitației. Pentru acest criteriu trebuie făcută o analiză pe clase de materiale (oțeluri carbon aliate, nealiate, inoxidabile, alte materiale feroase și neferoase) pentru a se vedea modul în care valorile acestuia sunt influențate de tipul materialului.

#### **6.4. Concluzii**

**1.** Modelele prezentate în literatura sunt construite pe baza datelor experimentale, folosind metodele statistice. Niciunul dintre acestea nu este unanim acceptat de specialiștii în eroziunea cavitației. Fiecare laborator având propria sa cutumă și propriile modele pe care le utilizează în evaluarea comportării și rezistenței la eroziunea prin cavitație.

**2.** Normele ASTM G32-2010 este standardul de referință ale cărui prevederi sunt respectate de toți cercetătorii și laboratoarele specializate în testări la eroziunea prin cavitație. Parametrii și curbele specifice, recomandate de aceste norme, rămân pe mai de parte, principalele elemente de referință în evaluarea comportamentelor și rezistențelor materialelor la eroziunea prin cavitație vibratoare.

**3.** Conceptul propus, are la bază relațiile stabilite de Bordeasu și colaboratorii, în descrierea curbelor caracteristice de cavitație și oferă o evaluare rapidă a rezistenței la cavitație doar pe valoarea parametrului de scală A, fără a mai fi necesare etape parcurse până în prezent (comparații ale curbelor sau parametrilor recomandați de ASTM G32-2010).

## **7. CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE ȘI ORIGINALE. PERSPECTIVE DE CERCETARE**

### **7.1. Concluzii finale**

1. Rămân valabile toate concluziile de ordin general formulate de cercetătorii care își au activitatea profesională și și-au definitivat tezele de doctorat în domeniul eroziunii cavitaționale [10, 44, 45, 55, 68-71, 78, 83, 87, 93, 104, 120, 125-127, 142-146, 151].
2. Studiul eroziunii prin cavitației rămâne o problemă de actualitate deoarece, până în prezent, nu s-a reușit elucidarea cauzelor ce o generează și nici nu au fost elaborate materiale și tehnologii de tratament care să creeze suprafețe și structuri perfect rezistente la distrugerea produsă de implozia bulelor cavitaționale.
3. Cercetările realizate în laborator și în instalațiile industriale sunt orientate spre analiza factorilor ce influențează rezistența materialului la eroziunea cavitației prin structură, compoziția chimică, tehnologia de elaborare și tratament.
4. Evaluarea rezultatelor cercetărilor experimentale, ce privesc comportarea și rezistența materialelor la eroziunea cavitației, este indicat să se facă cu respectarea normelor ASTM G32-2010 și a cutumelor laboratorului, folosind curbele și parametrii caracteristici pentru testele de cavitație și respectiv microfotografiile suprafețelor degradate, realizate la diverși timpi intermediari și final ai atacului cavitației.
5. Aparatele vibratoare sunt cele mai indicate în studierea comportării și evaluării rezistenței suprafețelor la eroziunea prin cavitație, datorită duratelor mici de producere a eroziunii și a rezultatelor acoperitoare pentru situațiile reale de exploatare a echipamentelor hidromecanice.
6. Oțelurile cu structuri preponderent austenitice, prin elemente chimice de înnobilitare și tehnologii adecvate de tratament, pot dobândi structuri și proprietăți mecanice care să le asigure creșterea duratei de exploatare în curenții cavitaționali, specifici echipamentelor hidromecanice din sistemele hidroenergetice și nu numai.
7. Aparatul vibrator standard cu cristale piezoceramice, aflat în dotarea Laboratorului de Cavitație al Universității Politehnica Timișoara, folosit la testele de cavitație, precum și cea de analiză microscopică, aflată în dotarea Laboratorului de Ingineria Materialelor al Universității Politehnica Timișoara și utilizată în examinările structurale, sunt de înaltă performanță, care au permis derularea experimentelor la cel mai înalt nivel științific.
8. Tratamentele termice de călire pentru punere în soluție, precum și cele de nitrurare în gaz sau cu laserul, aplicate la piesele realizate din oțelurile inoxidabile austenitice, așa cum sunt cele din construcția vanelor fluture (inelul rețineră scaun de la fixarea garniturii pe discul vanei), de tipul celui studiat în teză, prin modificările aduse structurii și valorilor proprietăților mecanice, din suprafața expusă cavitației, reprezintă o soluție eficientă de îmbunătățire a rezistenței acestora la eroziunea prin cavitație.

9. Utilizarea tratamentelor termochimice de nitrurare în gaz sau cu laser, deși aduce sporuri însemnate pentru rezistența la cavitație, aplicarea în practică este limitată de complexitatea formei geometrice și de dimensiune. Ele se aplică foarte bine la piesele cu geometrie simplă, cum sunt cele din construcția vanelor.

10. Aspectul vălurit al suprafeței, generat de acțiunea fasciculului laser, se păstrează într-o oarecare măsură și în urma testului de cavitație. Microcraterile prezente în suprafața cavitată sunt datorate smulgerii particulelor de nitruri cu duritate mare și extrem de fragile, iar microfisurile observate în unele zone „brăzdate” de radiația laser sunt amorosite în zona feritică, constituent structural cu limită de curgere scăzută, fenomen observat și de Micu [104] și de Oancă [120] la nitrurarea cu puteri similare ale razei laser.

11. 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.

12. Prin cele trei regimuri tehnologice de nitrurare laser utilizate, stratul de suprafață a realizat o bună legătură metalurgică cu materialul de bază, fără defecte de continuitate metalică de tipul porozităților, fisurilor și incluziunilor de zgură, care ar fi constituit amorse de fisuri, cu efect negativ asupra comportării și rezistenței suprafeței la impactul cu microjeturile și undele de șoc, produse în timpul atacului cavitațional.

13. Analiza numerică a curgerii prin vana fluture cu disc biplan confirmă că la anumite înclinații ale discului, pentru un debit dat, sunt create condițiile de curgere cavitațională, cu efectele cunoscute.

14. Literatura bogată, din domeniul de studiu, utilizată în fundamentarea tezei de doctorat, precum și în analizele efectuate, a permis crearea conținutului științific al lucrării la nivelul cerințelor impuse tezelor de doctorat.

## 7.2. Contribuții personale și originale

Contribuțiile personale, aduse prin cercetările experimentale și modelarea curgerii în vana fluture cu disc biplan, pot fi sintetizate astfel:

1. evidențierea existenței cavitației în vana fluture cu disc biplan de diametru 2,8 m, la unghiuri mai mari de 30° și un debit maxim de  $Q_{max} = 84.18 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectiv unghiuri mai mari de 50° pentru un debit nominal  $Q_n = 61 \text{ m}^3/\text{s}$ , folosind simularea prin intermediul modulului Flow Simulation, integrat în interfața aplicației SolidWorks;

2. s-a arătat că prin variația temperaturii de încălzire pentru punere în soluție (1000 °C, 1050 °C, 1100 °C) cu păstrarea constantă a duratei de menținere (25 min), schimbarea rezistenței la degradare prin cavitație este nesemnificativă dacă temperatura este la limita inferioară (1000 °C) și devine importantă, dacă temperatura de austenitizare se află la limita superioară (1100 °C);

3. s-a arătat că pentru oțelul inoxidabil austenitic cercetat X5CrNi18-10, aplicarea tratamentului termic de călire pentru punere în soluție, la temperatura de 1050 °C cu o durată de menținere de 25 min și răcire bruscă în apă, asigură o reducere a vitezei medii de pătrundere a eroziunii cavitației MDERs de circa 1,5 ori față de cea încălzită timp de 50 minute și de circa 1,2 ori față de cea încălzită timp de 5 minute;

4. prin imaginile structurii erodate, realizate la microscopul optic și electronic cu baleiaj, s-a pus în evidență ruperea ductilă și localizarea fisurilor de cavitație cu preponderență pe limitele grăunților și de-a lungul maclelor de recoacere. Totodată,



prin microscopia electronică cu baleiaj a suprafețelor degradate și a secțiunilor longitudinale, realizate perpendicular pe suprafețele cavitate, s-a pus în evidență că inițierea cavităților (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;

5. s-a obținut creșteri importante ale rezistenței la cavitație a suprafețelor nitrurate, indiferent de tipul tratamentului termochimic (în gaz sau cu laser), datorită creșterii durității la valori de circa 860 – 880 HV0.05 (pentru nitrurarea în gaz) și de circa (550...600)HV0.3 (pentru nitrurarea cu laser), fără a se schimba semnificativ compoziția chimică a metalului de bază, ci doar o îmbogățire în azot a stratului superficial;

6. prin cele trei regimuri de laser folosite la nitrurare, în condiții identice de durată în puls (8 ms) s-a evidențiat efectul puterii impulsului laserului asupra rezistenței stratului nitrurat la cavitația vibratoare; prin nitrurarea cu laser la 240 W se realizează cea mai mare rezistență la cavitație, cu circa 12,49 % față de regimul cu 120 W; cu 6.66 % față de regimul cu 180 W; cu circa 32 % mai mare decât cea realizată prin nitrurare în gaz; de circa 92 % mai mare decât cea realizată prin călire la 1050 °C/25 min/apă și de circa 12 ori mai mare decât cea obținută pe oțelul etalon OH12NDL);

7. realizarea unui nou concept de evaluare mai rapidă a rezistenței la cavitație folosind doar valoarea parametrului de scală A, din relațiile stabilite de Bordeasu și colaboratorii [34] în descrierea curbelor caracteristice de cavitație.

### 7.3. Perspective de cercetare

Pe baza cercetărilor efectuate în cadrul acestui program de doctorat, a rezultatelor obținute și prezentate în lucrare, pentru cercetările viitoare se pot formula următoarele perspective:

- analiza profilogramei suprafețelor erodate de cavitație cu scopul utilizării parametrilor rugozității ( $R_a$ ,  $R_z$  sau  $R_t$ ) în evaluarea rezistenței la cavitație a materialelor testate în laborator;
- cercetarea influenței noilor metode, tehnologii și tratamente termochimice aplicate asupra comportării oțelurilor inoxidabile la eroziunea prin cavitație;
- cercetarea influenței noilor metode, tehnologii și tratamente termochimice aplicate fontelor folosite la corpul organelor vanelor din sistemul hidroenergetic;

Concluzia finală este că lucrarea de doctorat **“CURGEREA ÎN VANELE FLUTURE ȘI EROZIUNEA PRIN CAVITAȚIE A COMPONENTELOR DIN OȚELURI INOXIDABILE AUSTENITICE”** este una interdisciplinară (Inginerie mecanică – Ingineria materialelor) care se înscrie în tendința actuală a cercetărilor, de a găsi soluții noi de creștere a duratei de viață a echipamentelor care sunt supuse solicitărilor mecanice generate prin cavitație.

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

Ing. *Cornelia-Laura SĂLCIANU* doctorand

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

- [1] I. Bordeășu, I. Mitelea, L. Sălcianu, C.M. Crăciunescu, "Cavitation erosion mechanisms of solution treated X5CrNi18-10 stainless steels", *ASME Journal of tribology*, vol.138, issue 3, pp. 031102, July, 2016 (WEB OH SCIENCE – THOMSON REUTERS)

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

- [1] L.M. Micu, I. Bordeășu, M.O. Popoviciu, M. Popescu, D. Bordeășu, L.C. Sălcianu: „Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN 22-5-3 stainless steels” *International Conference on Applied Science IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, Volume: 85, DOI: 10.1088/1757-899X/85/1/012019, OCT 02-04, 2014, Hunedoara, ROMANIA, 2015
- [2] C.L. Sălcianu, I. Bordeășu, I. Mitelea, C.M. Crăciunescu, „Duration of the austenitization and the cavitation erosion resistance to stainless steel X5CrNi18-10” *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Czech Republic, May 23-25, 2015 pp. 839-844 (WEB OF SCIENCE – THOMSON REUTERS)
- [3] C.L. Sălcianu, I. Bordeășu, I. Mitelea, C.M. Crăciunescu, „Gas nitriding and cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel”, *METAL 2016 - 25th International Conference on Metallurgy and Materials*, Czech Republic, May 25-27, 2016 (lucrare științifică acceptată în volum proceedings și în curs de publicare), 2016
- [4] I. Bordeas, M.O. Popoviciu, I. Mitelea, L.C. Sălcianu, D. Bordeas, S.T. Duma, A. Iosif, „Researches upon the cavitation erosion behaviour of austenite steels”, *International Conference on Applied Science IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, JUN 03-0, 2015, Wuhan, PEOPLES R CHINA, Volume: 106, DOI: 10.1088/1757-899X/106/1/012001, 2016
- [5] I. Bordeas, M.O. Popoviciu, L.C. Sălcianu, C. Ghera, L.M. Micu, R. Bădărău, A. Iosif, L.D. Pirvulescu, C.E. Podoleanu: „A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion”, *International Conference on Applied Science IOP Conference Series-Materials Science and Engineering*, vol. 163, 2017 (Acceptata spre publicare)

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

- [1] I. Bordeas, M.O. Popoviciu, I. Mitelea, L.M. Micu, O.V. Oanca, C. Bordeășu, L.C. Sălcianu, C. Ghera, „Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze

- with heat treatments”, *Hidraulica Magazine of Hydraulics Pneumatics Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, nr.2/2014, pp.53-61, 2014 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-2-2014/>)
- [2] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, L.M. Micu, L. Sălcianu, C. Bordeasu: „Cavitation erosion researches upon two AMPCO bronzes”, *Machine Design*, vol. 6, No.3, pp.97-102, 2014 ([http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/list2016\\_4.php?aac=on#](http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/list2016_4.php?aac=on#))
- [3] C. Ghera, I. Bordeasu, L. Sălcianu, S.T. Duma, S.E. Katona, A. Punga, L.M. Micu, L.F. Pascu, „Considerations regarding the behavior to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution”, *HIDRAULICA- Magazine of Hydraulics Pneumatics Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, București, România, vol. 1, pp. 25-31, 2015 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-12015/>)
- [4] L.M. Micu, I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, O.V. Oancă, L.C. Sălcianu, C. Ghera, I. Anton, „Researches upon Cavitation Erosion Behavior of some Stainless Steels with Different Structures”, *HIDRAULICA Magazine of Hydraulics Pneumatics Tribology Ecology Sensorics Mechatronics*, vol. 4, pp. 46-54, 2015 (<http://hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-magazine-4-2015/>)
- [5] I. Bordeasu, M.O. Popoviciu, C. Ghera, L.C. Sălcianu, L.M. Micu, C.E. Podoleanu, „Cavitation erosion behavior of the steel 17CrNiMo6”, *Machine design*, vol. 8, nr. 4, Novi Sad, pp. 149-154, 2016 ([http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/list2016\\_4.php?aac=on](http://www.mdesign.ftn.uns.ac.rs/list2016_4.php?aac=on))

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

- [1] C.L. Sălcianu, I. Bordeasu, I. Mitelea, C.M. Crăciunescu, „Effect solution treatment temperature upon the cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 116-120, 2015 (<https://www.scientific.net/AMR.1111.116>)
- [2] C.L. Sălcianu, I. Bordeasu, I. Mitelea, C.M. Crăciunescu, „Mechanical hardening and resistance to cavitation erosion of the austenitic stainless steels with varying proportions of delta ferrite”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 127-132, 2015 (<https://www.scientific.net/AMR.1111.116>)

#### **1. Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice**

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

The screenshot shows the ASME Digital Collection website. The article title is "Cavitation Erosion Mechanisms of Solution Treated X5CrNi18-10 Stainless Steels" by I. Bordeasu, I. Milelea, L. Sălcianu and C. M. Crăciunescu. The abstract discusses the cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel solution treated at temperatures of 1000-1100 °C for 5-50 mins, investigated using a piezoceramic vibrating system. The article is from the Journal of Tribology, Volume 138, Issue 3, research-article.

The screenshot shows the Web of Science article page. The article title is "Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN 22-5-3 stainless steels" by Micu, LM (Micu, L. M.), Bordeasu, I (Bordeasu, I.), Popoviciu, MO (Popoviciu, M. O.), Popescu, M (Popescu, M.), Bordeasu, D (Bordeasu, D.), Sălcianu, LC (Sălcianu, L. C.). The abstract states: "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 Matenal 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 companion 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".

Web of Science [v.5.22.3] x

apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=N2gNeUsARgJ3WNmMmp&search\_mode=GeneralSearch&prID=0ae1bf09-a047-4b69-be4f-2c...

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

**WEB OF SCIENCE™** THOMSON REUTERS™

Search My Tools Search History Marked List

**Results: 1**  
(from Web of Science Core Collection)

You searched for: **AUTHOR:** (Salcianu Laura Cornelia) ...More  
Create Alert

**Refine Results**

Search within results for...

**Web of Science Categories**

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

more options / values... Refine

**Document Types**

- PROCEEDINGS PAPER (1)

Refine

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

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

1. **DURATION OF THE AUSTENITIZATION AND THE CAVITATION EROSION RESISTANCE TO STAINLESS STEEL X5CrNi18-10**  
By: Salcianu, Laura Cornelia, Bordeasu, Ilare, Mitelea, Ion, et al.  
Book Group Author(s): TANGER Ltd  
Conference: 24th International Conference on Metallurgy and Materials Location: Brno, CZECH REPUBLIC Date: JUN 03-05, 2015  
Sponsor(s): Tanger Ltd, Tech Univ Ostrava, Czech Soc New Mat & Technologies, ASM Int, Engrn Acad Czech Republ, Mat Res Soc Serbia, Norwegian Co Mat & Technol, French Soc Met & Mat, Italian Assoc Met, Austrian Soc Met & Mat, Portuguese Soc Mat  
METAL 2015: 24TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS Pages: 839-844  
Published: 2015  
View Abstract

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

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

1 records matched your query of the 1 in the data limits you selected.  
Key: = Structure available.

Web of Science [v.5.22.3] x

apps.webofknowledge.com/Search.do?product=WOS&SID=1F4EfrzljhQReCnhYyP&search\_mode=GeneralSearch&prID=0986cc32-fd3b-43d2-9b4f-d398e...

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

**WEB OF SCIENCE™** THOMSON REUTERS™

Search My Tools Search History Marked List

**Results: 1**  
(from Web of Science Core Collection)

You searched for: **TITLE:** (Gas nitriding and cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel) ...More  
Create Alert

**Refine Results**

Search within results for...

**Web of Science Categories**

- METALLURGY METALLURGICAL ENGINEERING (1)

Refine

**Document Types**

- PROCEEDINGS PAPER (1)

Refine

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

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

1. **GAS NITRIDING AND CAVITATION EROSION RESISTANCE OF X5CrNi18-10 STAINLESS STEEL**  
By: Salcianu, Cornelia Laura, Bordeasu, Ilare, Mitelea, Ion, et al.  
Book Group Author(s): TANGER Ltd  
Conference: 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials (METAL) Location: Brno, CZECH REPUBLIC Date: MAY 25-27, 2016  
Sponsor(s): TANGER Ltd, Tech Univ Ostrava, Czech Soc New Mat & Technologies, Engrn Acad Czech Republ, Czech Metal Soc, Mat Res Soc Serbia, Soc Portuguesa Mat, Austrian Soc Metal & Mat, Norsk Materialteknisk Selskap, Assoc Italiana Metallurgia, Soc Francaise Metallurgie & Materiaux  
METAL 2016: 25TH ANNIVERSARY INTERNATIONAL CONFERENCE ON METALLURGY AND MATERIALS Pages: 843-846  
Published: 2016  
View Abstract

Select Page Save to EndNote online Add to Marked List

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

1 records matched your query of the 56,779,933 in the data limits you selected.  
Key: = Structure available.

166 Listă publicații

The screenshot shows a search result on the Web of Science platform. The search criteria are: TITLE: (Researches upon the cavitation erosion behaviour of austenite) ...More. The results list one entry: 'Researches upon the cavitation erosion behaviour of austenite steels' by Bordesau, I., Popoviciu, M. O., Mitelea, I., et al. The article is from the 'INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED SCIENCES 2016 (ICAS2016)' and was published in 2016. The interface includes options to view the abstract, full text, and citation report, along with filters for categories and document types.

The screenshot displays the IOPscience website for the 'International Conference on Applied Sciences (ICAS2016)'. It features a 'Table of contents' section for Volume 163, 2017, published online on 6 January 2017. The table lists three papers with their titles, authors, and IOPscience article numbers (012001, 012002, 012003). Each entry includes links to view the abstract, the full article, and a PDF version. The website also provides journal links and contact information.

Article Number	Title	Authors
012001	FEM modelling of soil behaviour under compressive loads	N Ungureanu, V Vișoțuț and S Șt. Briș
012002	A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion	I Bordesau, M O Popoviciu, L C Salcianu, C Ghera, L M Micu, R Badarau, A Iosif, L D Pirulescu and C E Podoleanu
012003	Experiments on composites meant for making brake pads for the rolling stock	A Socolci, L Pasou, E Ardelean and V Putan

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

**THE IMPACT OF THE MINING ACTIVITY ON THE ECONOMIC SECTOR, HUMAN HEALTH AND ENVIRONMENT**  
 Authors: Oana DAVID, Maria Valia MBHAI, Sarda MAIDUC (OSICEANU)

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

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

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

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

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

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

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

Copyright © 2011-2017 HIDRAULICA Magazine

← → ↻ [www.mdesign.fhn.uns.ac.rs/list2014\\_3.php?aac=on](http://www.mdesign.fhn.uns.ac.rs/list2014_3.php?aac=on)

**The Journal of  
Faculty of Technical Sciences  
ISSN 1821-1259**

**MACHINE  
DESIGN**

**Machine Design, Vol.6(2014) No.3**

1. **Vilmos SIMON**  
GEAR OPTIMIZATION
2. **Zoran STEFANOVIĆ, Ivan KOSTIĆ, Olivera KOSTIĆ**  
DETERMINATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A LIGHT AIRCRAFT USING VISCOUS CFD MODELING
3. **Mirko BLAGOJEVIĆ**  
ANALYSIS OF CLEARANCES AND DEFORMATIONS AT CYCLOID DISC
4. **Ivana ATANASOVSKA, Radivoje MITROVIĆ, Sonja STEFANOVIĆ, Natasa SOLDAT, Žarko MIŠKOVIĆ**  
CALCULATION OF RADIAL STIFFNESS FOR SINGLE-ROW BALL BEARING WITH FINITE ELEMENT ANALYSIS
5. **Gheorghe Radu Emil MĂRIEȘ**  
STUDY ABOUT THE INFLUENCE OF PROCESSING TEMPERATURE ON SOME MECHANICAL PROPERTIES OF THE POLYETHERETHERKETONE AND THE MIXTURE OF POLYCARBONATE WITH POLYBUTYLENE TEREPHTHALATE USING METHODS OF DETERMINING THE MECHANICAL RESISTANCES
6. **Ilare BORDEASU, Mircea Octavian POPOVICIU, Lavinia Madalina MICU, Laura SALCIANU, Constantin BORDEASU**  
CAVITATION EROSION RESEARCHES UPON TWO AMPCO BRONZES
7. **Izet ALIĆ, Sandira ELJŠAN, Azur HASANAGIĆ**  
CRACK DAMAGE REPAIR IN THE SPHERICAL STORAGE TANK FOR AMMONIA AND SUBSEQUENT ANALYSIS

Copyright © Avramović Darko, 2010. godina

Web of Science [v.5.22.3] x ARCHIVES | Revista HIDRAULICA | HIDRAULICA Magazine No. x KOD - Konstrucție + Obilic x

hidraulica.fluidas.ro/hidraulica-12015/



**programames**  
Prof. Dr. PETRU DIMITRA  
Director of Publications

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

**Recruitment for Reviewers**

**We recommend**

Confirmația internațională de hidraulică, pneumatică, elemente de etanșare, mecanică fină, scule, dispozitive și echipamente electronice specifice, mecatronică  
**HERVEX 2016**  
International Conference on Hydraulics, Pneumatics, Sealing Elements, Fine Mechanics, Tools, Specific Electronic Equipment & Mechatronics  
  
9-11 noiembrie / November 9-11  
Primul anunt / 1<sup>st</sup> announcement

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

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

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

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

**Considerations Regarding the Behavior to Cavitation Erosion of Two Carbon Alloy Stainless Steels Used in the Manufacturing of Hydraulic Equipment Drawers of Command, Adjustment and Distribution**  
Authors: Cristian GHERA, Ilare BORDEASU, Laura SALCIANU, Sebastian Titus DUMA, Stefan-Eusebiu KATONA, Adrian PUGNA, Lavinia Madalina MICU, Luana Florentina PASCU

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

**Pneumatic Tracking System for Photovoltaic Panel**  
Author: Ionel Laurentiu ALBOTEANU

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

Please see **attached List**

**NEW! Online First – Accepted Papers –**

**Indexing**

















Web of Science [v.5.22.3] x ARCHIVES | Revista HIDRAULICA | HIDRAULICA Magazine No. x KOD - Konstrucție + Obilic x

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



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

Gabriela MATACHE, Sava ANGHEL, Nicolae TĂNĂSESCU

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

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





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

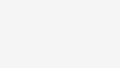
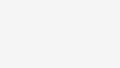
**Research on Cam Channels for Zoom Riflescopes**  
Author: Dana GRANCIU

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

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

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




**MACHINE DESIGN**

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

**The Journal of Faculty of Technical Sciences**  
ISSN 1821-1259

**MACHINE DESIGN**

Machine Design 2016  
Machine Design, Vol.8(2016) No.1  
Machine Design, Vol.8(2016) No.2  
Machine Design, Vol.8(2016) No.3  
Machine Design, Vol.8(2016) No.4  
Machine Design 2015  
Machine Design 2014  
Machine Design 2013  
Machine Design 2012  
Machine Design 2011  
Machine Design 2010  
Machine Design 2009  
Machine Design 2008  
Machine Design 2007

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

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

www.scientific.net/Search/Search?age=0&SortBy=0&searchString=Salcianu+Laura+Cornelia

Log In

Scientific.Net  
By Trans Tech Publications Ltd

Subscriptions | For Editors | Distributors | Downloads | My Cart

**SEARCH OPTIONS**

SEARCH: Salcianu Laura Cornelia

Age: All

Save

Sort by:  
 Relevance  
 Date

Narrow Search:  
 Books  
 All papers  
 Open access papers

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

Home > Search result

**Effect of Solution Treatment Temperature upon the Cavitation Erosion Resistance of X5CrNi18-10 Stainless Steel**  
 Authors: Cornelia Laura Salcianu, Ilare Bordeasu, Ion Nitelea, Corneliu Marius Crăciunescu  
 Online since: July 2015  
 Abstract: The specimens subjected to cavitation erosion were quenched from different temperatures (1000°C, 1050°C and...

**Mechanical Hardening and Resistance to Cavitation Erosion of the Austenitic Stainless Steels with Varying Proportions of Delta Ferrite**  
 Authors: Cornelia Laura Salcianu, Ilare Bordeasu, Ion Nitelea, Lavinia Madalina Micu  
 Online since: July 2015  
 Abstract: The paper analyzes, comparative, the resistance to the cavitation erosion for the X5CrNi18-10 classic steel, with that provided by two...

Showing 1 to 2 of 2 Paper Titles

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Anton I.: „Cavitația”, vol. I, Editura Academiei RSR, București, 1984
- [2] Anton I.: „ Cavitația”, vol. II, Editura Academiei RSR, București, 1985
- [3] Băran G.: „Caviație și eroziune cavitațională”, Editura Tehnică București, 2001
- [4] Băran G., Bunea F. D., Oprina G. I.: „On cavitation an cavitațional damage at butterfly valves”, 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems Timișoara, Romania, October 24 - 26, 2007
- [5] Bordeășu I, Popoviciu M.L.: „Comportarea cavitațională a oțelului inoxidabil utilizat la elicele navale”, Conferința de Mașini hidraulice, Vol III, Timișoara, 1990
- [6] Bordeășu I, Popoviciu M.L.: „Comportarea cavitațională a fontei cu grafit nodular”, Conferința de Mașini hidraulice, Vol III, Timișoara, 1990
- [7] Bordeășu I., Popoviciu M., Miu V.: „Rezistența la cavitație a bronzurilor utilizate pentru elicele navale, Conferința de Mașini hidraulice, Vol III, Timișoara, 1990
- [8] Bordeășu I., Baya Al., Popoviciu M., Anton L.: „Contributions Concerning Determination Periods of Cavitation Erosion”, Buletin Științific, Universitatea “Politehnica” din Timișoara, Vol 41(55), 1996
- [9] Bordeășu I. și alții.: „Contributions concernant las destruction de l’acier inoxydables par erosion cavitaționalle”, Buletin Științific, Universitatea “Politehnica” Timișoara, vol 41 (55), 1996
- [10] Bordeășu I.: „Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară”, Teză de doctorat, Timișoara, 1997
- [11] Bordeășu I., Anton I.: „Correlation between cavitation erosion rate with both the parameters of the vibrator apparatus and phisico-mechanical properties of the material”, Third International Symposium on Cavitation, vol. II, Grenoble, France, pp. 199-202, 1998
- [12] Popviciu O.M., Bordeășu I.: „Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice”, Editura Politehnica, Timișoara, 1998
- [13] Bordeășu I., Bălășoiu V.: „Considerații asupra cavitației în aparatura hidraulică”, Hidraulica Magazine No. 1-Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics, București, România, pp. 16-19, 1999
- [14] Bordeășu I., Popoviciu M.O., Patrascoiu C-tin, Bălășoiu V.: „An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves”, Scientific Buletin Politehnica University of Timisoara, Transaction of Mechanics, Tom 49(63), Timișoara, ISSN:1224-6077, pp. 253-258, 2004
- [15] Bordeășu I.: „Eroziunea cavitațională a materialelor”, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [16] Bordeășu I., Patrășcoiu C., Bădărau R., Sucitu L., Popoviciu M., Bălășoiu V.: „New contributions in Caviation Erosion Curves Modeling”, FME Transactions Fakulty of Mechanical Engineering, vol.34 Nr.1/2006, YU ISSN 1451-2092, University of Belgrade, pp.39-44, 2006

- [17] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Bălașoiu V., Ghiban B., Tucu D.: „Chemical and mechanical aspects of the cavitation phenomena”, *Revista de Chimie* 58(12), pp. 1300-1304, 2007
- [18] Bordeasu 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
- [19] Bordeasu I., Ghiban B., Popoviciu M. O., Bălașoiu V., Birău N., Karabenciov A.: „The damage of austenite-ferrite steels by cavitation erosion”, *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. pp.0147-0148, 2008
- [20] Bordeasu I., Bădărău R., Jurchela A.D.: „The deformations and microstructural transformations analyses produced by cavitation to the austenitic stainless steel”, *Machine Design, University of Novi Sad, Faculty of Technical Science, Novi Sad*, ISBN 978-86-7892-105-6, pp 411-414, 2008
- [21] Bordeasu I., Jurchela A.D., Karabenciov A., Bordeasu D., Bodin F.: „ Nickel’s Influence over Cavitation Erosion Of Stainless Steels With Constant Chromium Content”, *Scientific Bulletin of the Politehnica University of Timișoara Transactions on Mechanics, Special Issue, Tom 53 (67)*, pp.421-424, Timișoara, 2008
- [22] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Bălașoiu V., Gombos M.R., Gombos M., Ghiban B.: „Contribution upon the cavitation erosion of two cast irons used in manufacturing control valves”, *Metalurgia International*, vol. 14, Issue 11, pp. 5-7, 2009
- [23] Bordeasu 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, pp.425-430, Sebeș, 4-5 iunie 2010
- [24] Bordeasu, I., Oanca, O.: „Considerations Regarding the Cavitation Damage Process on Bronze and Brass Used in the Marine Screw Manufacture”, *Machine Design, Vol.3(2011) No.4*, ISSN 1821-1259 pp. 277-280, 2011
- [25] Bordeasu I., Mitelea I., Katona S.E.: „Considerations regarding the behavior of some austenitic stainless steels to cavitation erosion”, *METAL 2012, 21th International Conference on Metallurgy and Materials, May 23-25, Brno, Czech Republic*, pp.730-735, 2012
- [26] Bordeasu I., Popoviciu M.O.: „Improving cavitation erosion resistance through surface and structural hardening”, *Machine Design*, vol. 4, no. 3, pp. 171-176, 2012
- [27] Bordeasu I., Mitelea I., Jurchela A.D., Oanca O.V.: „Microstructure and cavitation erosion resistance for stainless steels with 12 % chrom and variable nickel concentrations”, *22nd International Conference On Metallurgy And Materials, Brno, Czech Republic, May 15-17*, ISBN:978-80-87294-41-3, pp. 742-747, 2013
- [28] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Micu L.M., Oanca O.V., Bordeasu C., **Salcianu L.C.**, Ghera C.: „Cavitation erosion resistance of AMPCO 45 bronze with heat treatments”, *Hidraulica nr.2/2014*, pp. 53-61, 2014
- [29] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Micu L.M., **Sălcianu L.**, Bordeasu C.: „Cavitation erosion researches upon two AMPCO bronzes”, *Machine Design*, vol. 6, No.3, pp. 97-102, 2014

- [30] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., **Sălcianu L.C.**, Bordeasu D., Duma S.T., Iosif A.: „Researches upon the cavitation erosion behaviour of austenite steels” International Conference on Applied Science, vol. 106, art.nr. 012001, 2015
- [31] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Mitelea I., Micu L.M., Bordeasu C., Ghera C., Iosif A.: „Research upon cavitation erosion behavior of some duplex steels”, International Conference on Applied Science, vol. 106, pp. 391-397, 2016
- [32] Bordeasu I., Popoviciu M.O., Ghera C., **Sălcianu L.C.**, Micu L.M., Podoleanu C.E.: „Cavitation erosion behavior of the steel 17CrNiMo6”, Machine design, vol. 8, nr. 4, Ungaria, pp. 149-154, 2016
- [33] Bordeasu I., Mitelea I., **Sălcianu L.**, Crăciunescu C.M.: „Cavitation erosion mechanisms of solution treated X5CrNi18-10 stainless steel”, ASME Journal of tribology, vol.138, pp. 031102, 2016
- [34] Bordeasu I., Popoviciu M.O., **Sălcianu L.C.**, Ghera C., Micu L.M., Bădărău R., Iosif A., Pirvulescu L.D., Podoleanu C.E.: „A new concept for stainless steels ranking upon the resistance to cavitation erosion”, International Conference on Applied Science, vol. 163, 2017
- [35] Brennen C.E., „Cavitation and Bubble Dynamics”, Oxford University Press, Oxford, England, Great Britain, 1995
- [36] Brebenariu R., Smoczer I., Takacs R.: „Instalații de vane de secțiune circulară proiectate la ICPEH-Reșița”, Construcția de mașini, Nr. 7, București, 1975
- [37] Brunn B., Ludwig G. Stoffel B.: „The effect of gas diffusion on bubble dynamics”, Fifth International Symposium on Cavitation (cav2003), Osaka, Japan, November 1-4, 2003
- [38] Burchiu V., Santau I., Alexandrescu O.: „Instalatii de pompare”, Editura didactică și pedagogică, București, pp 206-208, 1982
- [39] Carțiș I.: „Tratamente termochimice”, Editura Facla, Timișoara, 1988
- [40] Chahine G.L., Franc J.P., Karimi A.: „Laboratory testing methods of cavitation erosion”, in KIM K.H. et. al. (eds.): Advanced experimental and numerical techniques for cavitation erosion prediction, Fluid Mechanics and Its Applications, vol. 106, doi: 10.007/978-94-017-8539-6\_2, Springer Science + Business Media Dordrecht, 2014
- [41] Chang J.T., Yeh C.H., He J.J., Chen K.C.: „Cavitation erosion and corrosion behavior of Ni-Al intermetallic coatings”, Wear, 255, pp. 162–169, 2003
- [42] Cheng F.T., Shi P., Man H.C., „Cavitation erosion resistance of heat-treated NiTi”, Materials Science and Engineering, A339 , pp. 312–317, 2003
- [43] Chaiworapuek W., Champagne J-Y., El Hajem M., Kittichaikan C.: „An Investigation of the Water Flow Past the Butterfly Valve”, AIP Conference Proceeding 1225, 562, 2010
- [44] 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
- [45] Dimian M.E.: „Cercetări asupra rezistenței la cavitație a aliajelor de titan cu structura bifazică”, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2012
- [46] Espitia A.L., Toro A.: „Cavitation resistance, microstructure and surface topography of materials used for hydraulic components”, Tribology International, Vol. 43, pp. 2037–2045, 2010
- [47] Florescu I.: „Masini hidraulice. Note de curs pentru uzul studenților”, Editura Alma Mater, Bacău, 2007
- [48] Franc J.P., et al.: „La cavitation. Mécanismes physiques et aspects industriels”, Press Universitaires de Grenoble, Grenoble, France, 1995

- [49] Frank J.P., Michel J.M.: „Fundamentals of cavitation”, Kluwer Academic Publishers-Dordrecht, Boston, London, 2004
- [50] Franc J.P., Michel J.M.: „Fundamentals of Cavitation”, Kluwer Academic Publishers, 2005
- [51] Franc J.P.: „Incubation time and cavitation erosion rate of work hardening materials”, *Journal of Fluids Engineering*, vol.131, iss. 2, 021303-021317, 2009
- [52] Franc J.P., Riondet M., Karimi A., Chahine G.L.: „Material and velocity effects on cavitation erosion pitting”, *Wear*, vol. 274-275, pp. 248-259, 2012
- [53] Gaden D.: „A contribution to the study of butterfly valves”, part 1, *Water Power*, 55, pag. 456-474, 1951
- [54] 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
- [55] Georgevici I.: „Contribuții privind dezvoltarea unor oțeluri inoxidabile cu transformare martensitică directă”, Teza de doctorat, Timișoara, 2003
- [56] Ghera C., Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Improvement of cavitation erosion resistance of a low alloyed steel 16MnCr5 through work hardening”, *METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Cehia, pp. 661-666, 2015
- [57] Ghera C., Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Effect of Heat Treatment on the Surfaces Topography Tested at the Cavitation Erosion from Steel 16MnCr5”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 85-90, July 2015
- [58] Ghera C., Bordeasu I., **Sălcianu L.**, Duma S.T., Katona S.E., Punga A., Micu L.M., Pascu L.F.: „Considerations regarding the behavior to cavitation erosion of two carbon alloy stainless steels used in the manufacturing of hydraulic equipment drawers of command, adjustment and distribution”, *Hidraulica Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, vol. 1, pp. 25-31, 2015
- [59] Ghera C., Mitelea I., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Cavitation erosion behavior of laser nitrided 34CrNiMo6 alloyed steel”, *METAL 2016 - 25th International Conference on Metallurgy and Materials*, Brno, Cehia, pp. 706-711, 2016
- [60] Godoy C., Mancosu R.D., Lima M.M., Brandão D., Housden J., Avelar-Batista J.C.: „Influence of plasma nitriding and PAPVD Cr1-xNx coating on the cavitation erosion resistance of an AISI 1045 steel”, *Surface and Coatings Technology*, 200, pp. 5370-5378, 2006
- [61] Grumbt G., Zenker R., Spies H.J., Franke R., Haase I.: „Improvement of the wear behaviour of highly-loaded components and tools by multi-combined surface treatment”, *Materials Engineering, Materiálové inžinierstvo* 21, pp. 1-10, 2014
- [62] Han S., Lin J.H., Kuo J.J., He J.L., Shih H.C.: „The cavitation-erosion phenomenon of chromium nitride coatings deposited using cathodic arc plasma deposition on steel”, *Surface and coatings technology*, 161, pp. 20-25, 2002
- [63] Hansson I., Morch K.A.: „The dynamics of cavity clusters in ultrasonic (vibratory) cavitation erosion”, *Journal of Applied Physics*. 51(9):4651-4658, 1980
- [64] Huang W.H., Chen K.C., He J.L.: „A study on the cavitation resistance of ion-nitrided steel”, *Wear*, 252, pp. 459-466, 2002
- [65] Hattori S., Mikami N.: „Cavitation erosion resistance of satellite alloy weld overlays”, *Wear*, vol. 267, Issue 11, pp. 1954-1960, 2009
- [66] Hattori S., Kitagawa T.: „Analysis of cavitation erosion resistance of cast iron and nonferrous metals based on database and comparison with carbon steel data”, *Wear*, volume 269, Issues 5-6, pp. 443-448, 19 July 2010

- [67] Hattori S., Ishikura R., Zhang Q., „Construction of Database on Cavitation Erosion and Analyses of Carbon Steel Data”, Cav2003, GS-11-002. 2003.
- [68] Hammitt F.G., Bhatt N.R.: „Cavitation damage resistance of hardened steels”, Univ. Michigan, pp. 1-36, 1970
- [69] Hammitt F.G., De M., He J., Okada T., Sun B.H.: „Scale effects of cavitation including damage scale effects”, Conf. Cavitation, Michigan, Report No. UMICH, 014456-75-I, Michigan, U.S.A., 1980
- [70] Hammitt F.G.: „Cavitation and multiphase flow phenomena”, McGraw Hill International Book Company, 1980
- [71] Hammitt F.G., Nath A., De M.K.: „Erosion of ferrous and aluminum alloys in cavitating adiois”, Report No. UMICH 014456-53-I, University, Michigan, 1980
- [72] Heymann F. J.: „Toward quantitative prediction of liquid impact erosion”, ASTM stp, vol. 474, pp. 212, 1970
- [73] Himr D., Habán V.: „Simulation of low pressure water hammer”, 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 12, 012087, 2010
- [74] Hosmani S.S., Ajesh V.: „Effect of duplex surface treatment on the microstructure and properties of mild steel”, Proceedings of Indian National Science Academy (PNSA), 79(3), pp. 327-331, 2013
- [75] Idelcik I.E.: „Îndrumător pentru calculul rezistențelor hidraulice”, Editura Tehnică, București, 1984
- [76] Jurchela A.D., Bordeășu I., Karabenciov A., Mitelea I., Birău N.: „Considerații asupra rezistenței la eroziune cavitațională a titanului nealiat tratat cu fascicule laser”, a IX-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, Știință și inginerie, vol.15, pp. 781-786, Sebeș, 5-6 iunie 2009
- [77] Jurchela A.D., Bordeășu I., Mitelea I., Karabenciov A.: „Considerations on the effects of carbon content on the cavitation erosion resistance of stainless steels with controled content of chromium and carbon”, 21st International Conference on Metallurgy and Materials- 25th,, 2012
- [78] Jurchela A.D.: „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel”, Teza de doctorat, Timișoara, 2012
- [79] Lienhard, Jhon H., The Engines of OUR Ingenuity, Oxford University Press US, 2003
- [80] Lambert P.: „Déformation plastique et résistance a l'érosion de cavitation d'acières inoxydables austénitiques, Thèse de Maitres Sciences Appliquées, Montréal, Canada, 1998
- [81] Luo Jing, Li Jian: „Erosion Characteristic in Ultrasonic Cavitation Experiment, Advanced Tribology, pp. 638-639, 2010
- [82] Karabenciov A., Bordeășu I., Jurchela A.D.: „Study of stainless steels cavitation erosion with 0.1 % charbon and 10 % nickel”, Machine Design 2009, Monograpf University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, ISSN 1821-1259, pp.421-426, 2009
- [83] Karabenciov A.: „Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom”, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2013
- [84] Karimi A., Martin J.L.: „Cavitation erosion of materials”, International Metals Review, vol. 31, iss. 1, pp. 1-26, 1986
- [85] Karimi A., Heuze J.L.: „Erosion de cavitation d' alliages amortissants a base de manganese et de cuivre”, La Houille Blanche, Nr. 7/8, 1992

- [86] Kathuria K.: „Laser-cladding process: a study using stationary and scanning CO2 laser beams”, *Surface and coatings technology*, vol. 97, pp. 442-447, 1997
- [87] Katona E.S.: „Eroziunea cavitațională a oțelurilor inoxidabile cu transformare martensitică indirectă”, Teza de doctorat, Timisoara, 2017
- [88] Kern F.R., Suess E.M.: „Steel selection. A guide for improving performance and profits”, John Wiley and Sons, Inc 1979
- [89] Knapp R., a.o.: „Cavitation”, McGraw-Hill, Book Company, Monographs, 1970
- [90] Koivula, T.: „On cavitation in fluid power”, *Proc. of 1st FPNI-PhD Symp.*, pp. 371-382, Hamburg, 2000
- [91] Krella A.: „An experimental parameter of cavitation erosion resistance for TiN coatings”, *Wear*, Vol. 270, pp. 252 – 257, 2011
- [92] Kuzman A.A.F., Potentcz I.: „Rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri indigene”, *Buletinul Științific și Tehnic al Institutului Politehnic Traian Vuia, Timișoara*, Tom 23(37), Fascicula 1 –1978
- [93] Kuzman A.A.F.: „Influența unor proprietăți fizice ale lichidului asupra incipienței și eroziunii cavitaționale”, Teză de doctorat 1992
- [94] Kwok T.C.: „Cavitation erosion and pitting corrosion behaviour of laser surface – melted martensitic stainless steel UNS S42000”, *Surface and Coating Technology*, vol. 126, Iss. 2 – 3, pp. 238–255, 2000
- [95] Lacombe P., Baroux B., Beranger G.: „Les aciers inoxydables, Les éditions de physique”, 1990
- [96] Leașu, M.: „Cercetări privind fiabilitate robinetelor din circuitele de transport a produselor petroliere”, Universitatea „Transilvania” din Brașov, 2011
- [97] Matsumura M., Oka Y.I., Sakamoto A.: „Quantitative prediction of erosion damage to metallic materials exposed to cavitation attack”, *International Conference*, Cambridge, 1992
- [98] Manzana M.E.: „Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice”, Teză de doctorat, Universitatea Politehnica Bucuresti, Romania, 2012
- [99] Micu L.M., Bordeasu I., Mitelea I.: „Cavitation erosion behavior for some stainless steels with constant nickel and variable chromium content”, *MP Material Testing*, Issue 01, ISSN: 0025-53, pp. 53-58, 2012
- [100] Micu L.M., Bordeasu I., Mitelea I., Ghera C., **Sălcianu L.C.**: „Cercetarea eroziunii cavitaționale asupra oțelului inoxidabil X2CrNiMn22-5-3 tratat termic, A XIV-a Conferință internațională multidisciplinară, Profesorul Dorin Pavel - fondatorul hidroenergeticii românești”, vol. 26, pp. 425-430, Sebeș, 2014
- [101] Micu L. M., Bordeasu I., Popoviciu M.O., Popescu M., Bordeasu D., **Sălcianu L. C.**: „Influence of volumic heat treatments upon cavitation erosion resistance of duplex X2CrNiMoN 22-5-3 stainless steels” *International Conference on Applied Science*, vol. 85, art.nr. 012019, 2014
- [102] Micu L.M, Bordeasu D., Bordeasu I., Popescu M., Oanca 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
- [103] Micu L.M., Bordeasu I., Popoviciu, Oancă O.V., **Sălcianu L.C.**, Ghera C., Iosif A.: „Researches upon Cavitation Erosion Behavior of some Stainless Steels with Different Structures”, *Hidraulica Magazine of Hydraulics, Pneumatics, Tribology, Ecology, Sensorics, Mechatronics*, vol. 4, pp. 46-54, 2015
- [104] Micu L.M.: „Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile Duplex”, Teza doctorat, Timisoara, 2017

- [105] Mitelea I., Trușculescu M.: „Influența tratamentului termic asupra rezistenței tehnice de durată a oțelului VmoCr30”, *Metalurgia* 33, nr.2, București, 1981
- [106] Mitelea I., Budău V.: „Materiale și tratamente termice pentru structuri sudate”, Editura de Vest Timișoara, 1992
- [107] Mitelea I., Lugscheider E., Tillmann W., „Știința Materialelor în construcția de mașini”, Editura Sudura, Timișoara, România, pp. 430-431, 1999
- [108] Mitelea I., Radu B.: „Selecția și utilizarea materialelor ingineresti”, Editura Politehnica, Timișoara, 2004
- [109] Mitelea I., Gîrniceanu Gh., Guru R.: „Tratamentul termic al oțelurilor și fontelor”, Editura Didactică și Pedagogică, București, 2005
- [110] Mitelea I., Tillmann W.: „Știința materialelor”, vol. I, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [111] Mitelea I., Tillmann W.: „Știința materialelor”, vol. II, Editura Politehnica, Timișoara, 2007
- [112] Mitelea I.: „Materiale ingineresti” Editura Politehnica, Timișoara, 2009
- [113] Mitelea I., Bordeasu I., Katona S.E.: „Influence of the solution treatment temperature upon the cavitation erosion resistance for 17-4 PH stainless steels, METAL 2013, 22nd International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, May 15-17, pp. 208-213, 2013
- [114] Mitelea I., Dimian E., Bordeasu I., Craciunescu C.M.: „Ultrasonic cavitation erosion of gas nitrided Ti – 6Al – 4V alloys”, *Ultrasonics Sonochemistry*, 21, pp. 1544 – 1548, 2014
- [115] Mitelea I., Bordeasu I., Pelle M., Crăciunescu C.M.: „Ultrasonic cavitation erosion of nodular cast iron with ferrite-pearlite microstructure”, *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 23, pp. 385-390, 2015
- [116] Mitelea I., Ghera C., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel”, *International Journal of Materials Research*, vol. 106, No. 4 , pp. 391-397, april 2015
- [117] Mitelea I., Ghera C., Bordeasu I., Crăciunescu C.M.: „Assesment of cavitation erosion of gas-nitrided Cr-Ni-Mo steels”, *Journal of Tribology ASME*, (acceptată pentru publicare), 2017
- [118] Nedeloni M.D.: „Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricatia componentelor de turbine hidraulice”, Teza de doctorat, Resita, 2012
- [119] Noskievic J.: „The extend mathematical model of cavitation and erosion wear”, Proc 6 th, International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, 1983
- [120] Oancă O.V.: „Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale”, Teza de doctorat, Timișoara, 2014
- [121] Oancă O., Mitelea I., Bordeasu I., Ghera C.: „Reduction of cavitation erosion of the bronze CuAl10Ni5Fe2.5Mn1 by laser remelting treatment”, *Advanced Materials Research*, vol. 1111, pp. 133-138, July 2015
- [122] Palaev N.I., Edel I.U.: „Kavitatia v ghidroturbinah”, *Masinstroenie*, Leningrad, 1974
- [123] Praisach Z., Periș-Bendu F., Mănescu T.jr.: „Tensiuni și deformații în ansamblul disc-corp vană la vana fluture DN2800 PN19.”, Știință și inginerie-Lucrarile celei de a cincia Conferințe Naționale cu participare internațională “Profesorul Dorin Pavel-Fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2009
- [124] Patella R.F., Reboud J.L., Archer A.: „Cavitation damage measurement by 3D laser profilometry”, *Wear*, Vol. 246, pp. 59 – 67, 2000



- [125] Pădurean I.: „Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile”, Teză de doctorat, Timișoara, România, 2005
- [126] Peris-Bendu F., Nedelcu D., Campian C.V.: „Contributii privind solutii moderne in proiectarea vanelor fluture cu disc biplan”, a XIII-a Conferință națională multidisciplinară cu participare internațională, profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești, știință și inginerie, Vol.25, pp. 430 - 436, Sebeș, 6-7 iunie 2013
- [127] Peris-Bendu F.: „Cercetări teoretice și experimentale asupra discului biplan al unei vane fluture în vederea creșterii performanțelor energetice ale vanei”, Teză de doctorat, Reșița, România, 2015
- [128] Pîlaev N.I., EdelI .U.I: „Kavitatia v ghidroturbinah”, Masinostroenie, Leningrad, 1974
- [129] Popviciu O.M., Bordeășu I.: „A standard material for cavitation erosion test”, The fourth conferinta on hydrodynamics and hydraulic machinery, vol. II, Timișoara, 1994
- [130] Popviciu O.M., Bordeășu I.: „Cavitation erosion of 18MoCrNi13 Steel Used for manufacturing the distributor valve”, Conferința internațională de sisteme hidropneumatice de acționare, vol. 1, Timișoara, 1995
- [131] Popviciu O.M., Bordeășu I.: „Tehnologia fabricației sistemelor hidraulice”, Editura Politehnica, Timișoara, 1998
- [132] Pulkkinen R.: „Thermodynamics and kinetics of gas nitriding alpha-iron alloys”, Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Espoo, Finland, 1984
- [133] Safta C.A., Cazacu M.D., Băran G.: Stand pentru determinarea coeficienților de debit și de cavitație la robinete cu diametre maxime de 600 mm”, Lucrările celei de a patra Conferințe Naționale cu participare internațională “Profesorul Dorin Pavel-Fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, iunie, 2008
- [134] Sakai I., Shima A.: „On a new representative equation for cavitation damage resistance of materials”, Report No. 385, Tokyo, 1987
- [135] **Sălcianu L.C.**, Bordeășu I., Micu L.M., Ghera C.: „The resistance to erosion by cavitation two the different structural steel stainless exposed same heat treatment by volume”, Conferința națională multidisciplinară Profesorul Ion. D Lăzărescu, fondatorul școlii românești de teoria aşchierii, Ediția I, Cugir, pp. 675-682, 2014
- [136] **Sălcianu C.L.**, Bordeășu I., Mitelea I., Crăciunescu C.M.: „Duration of the austenitization and the cavitation erosion resistance to stainless steel X5CrNi18-10”, METAL 2015 - 24th International Conference on Metallurgy and Materials, pp. 839-844, 2015
- [137] **Sălcianu C.L.**, Bordeășu I., Mitelea I., Crăciunescu C.M.: „Effect solution treatment temperature upon the cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel”, Advanced Materials Research, vol. 1111, pp. 116-120, 2015
- [138] **Sălcianu C.L.**, Bordeășu I., Mitelea I., Micu M.L., “Mechanical hardening and resistance to cavitation erosion of the austenitic stainless steels with varying proportions of delta ferrite”, Advanced Materials Research, vol. 1111, pp. 127-132, 2015
- [139] **Sălcianu C.L.**, Bordeășu I., Mitelea I., Crăciunescu C.M.: „Gas nitriding and cavitation erosion resistance of X5CrNi18-10 stainless steel”, METAL 2016 - 25th International Conference on Metallurgy and Materials (lucrare științifică acceptată în volum proceedings și în curs de publicare), 2016
- [140] 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, pp.32.1-32.8, 1987

- [141] Smoczer I.: „ Probleme de calcul și construcție ale vanelor pentru conducte forțate”, Construcția de mașini, Număr jubiliar, București, 1971
- [142] Steller K.: „Prediction of cavitation damage in hydraulic turbomachinery”, Proc of the seventh Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Budapest, 1983
- [143] Steller J.K.: „International cavitation erosion test. Test facilities and experimental results”, 2-emes Journées Cavitation, Société Hydrotechnique de France, Paris, France, March, 1992
- [144] Steller J.K.: „ International cavitation erosion test” – summary of results, IMECHE Cavitation Conf., pp.95-102, 1992
- [145] Steller J.K.: „International Cavitation Erosion test and quantitative assement of material resistance to cavitation”, Wear, vol. 233-235, pp. 51-64, 1999
- [146] Steller J.K. Giren B.G.: „International Cavitation Erosion Test. Final Report”, Gdansk, ISSN 0239-9091, 2015
- [147] Steward L.H.: „Hydraulic and pneumatic power for production”, Industrial Press Inc, New York, NY 100016, 2000
- [148] Szkodo M., Giren B.G.: „Cavitation erosion of steels processed by CO2 laser beams of various parameters”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 157-158, pp. 446-450, 2004
- [149] Smoczer, I.: „Probleme de calcul și construcție ale vanelor pentru conducte forțate”, Construcția de mașini, Număr jubiliar, București, 1971
- [150] Szkodo M.: „Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 164-165, pp. 1631-1363, 2005
- [151] Thiruvengadam A., Preiser H.S.: „On testing materials for cavitation damage resistance”, Report. 233 – 3, 1963
- [152] Toader S., Pop F., Alixandrescu C.: „Technical solutions for recovery of energy lost on drinking water pipes”, 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, vol. 2, pag. 941-947, Timisoara, sep. 20-24, 2010
- [153] Tomlinson W.J., Talks M.G.: „Laser surface processing and the cavitation erosion of a 16 wt% Cr white cast iron”, Wear, vol. 139 , pp. 269-284, 1990
- [154] Tullis J.P.: „Pumps, valves, cavitation, transients”, John Wiley & Sons, Hydraulics of Pipelines, Inc., 1989
- [155] Turton R.K.: „ Principles of Turbomachinery”, Published by Chapman & Hall, London, 1995
- [156] Vermeșan G., Deac V.: „Bazele tehnologice ale nitrurării ionice”, Editura Universității din Sibiu, 1992
- [157] Wang Z., Zhu J.: „Effect of phase transformation on cavitation erosion resistance of some ferrous alloys”, Materials Science and Engineering A, vol. 358, pp. 273-278, 2003
- [158] \*\*\* ASTM G32-2010, Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus, ASTM International, 2010
- [159] [http://www.aps-romania.ro/\\_.../getphoto\\_download.php?...Vane-fluture](http://www.aps-romania.ro/_.../getphoto_download.php?...Vane-fluture).
- [160] <http://www.avk.ro/instructiuni/files/Vane%20fluture%20dublu%20excentrice.pdf> (vane future cu duble excentric AVK 200-2200)
- [161] [http://www.avk.ro/subcat/787\(vane fluture AVK\)](http://www.avk.ro/subcat/787(vane fluture AVK))
- [162] <http://www.avk.ro/download/items/222.pdf>
- [163] <http://www.avk.ro/instructiuni/files/14%20vane%20fluture.pdf>
- [164] <http://www.hye.ro>, referinte vane
- [165] <http://www.inoxservice.hu/index.php/ro/anyagtulajdonsagok>
- [166] [http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/13/Science/ERHARDcavitation\\_28\\_07\\_08/ERHARDcavitation.pwww.vncold.vn/.../ERHARDcavitation.../ERHA...](http://www.vncold.vn/Modules/CMS/Upload/13/Science/ERHARDcavitation_28_07_08/ERHARDcavitation.pwww.vncold.vn/.../ERHARDcavitation.../ERHA...)