



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



CIPOSDRU



UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
din BUCUREȘTI

FONDUL SOCIAL EUROPEAN

Investește în oameni!

Programul Operațional Sectorial pentru Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013

Proiect POSDRU/88/1.5/S/61178 – Competitivitate și performanță în cercetare prin programe doctorale de calitate (ProDOC)



UNIVERSITATEA „EFTIMIE MURGU” DIN REȘIȚA

Facultatea de Mecanică și Ingineria Materialelor
Departamentul de Inginerie Mecanică

Nr. Decizie Senat 877 din 29.11.2012

TEZĂ DE DOCTORAT

*Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate
la fabricația componentelor de turbine hidraulice*

*Research regarding the cavitation erosion on materials used
to manufacture the components of hydraulic turbines*

Autor: ing. Marian-Dumitru Nedeloni

COMISIA DE DOCTORAT

Președinte	Prof. univ. dr. ing. Doina Frunzăverde	de la	Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița
Conducător de doctorat	Prof. univ. dr. ing. Dorian Nedelcu	de la	Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița
Referent	Prof. univ. dr. ing. Gheorghe Băran	de la	Universitatea „Politehnica” București
Referent	Prof. univ. dr. ing. Ilare Bordeasu	de la	Universitatea „Politehnica” Timișoara
Referent	Prof. univ. dr. ing. Gilbert-Rainer Gillich	de la	Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița

Reșița 2012

PREFAȚĂ

Prezenta teză de doctorat intitulată *“Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice”* reprezintă o sinteză a activității de cercetare teoretică și experimentală efectuată de către autor în domeniul cavitației și eroziunii cavitaționale.

Teza se axează pe studiul experimental al eroziunii cavitaționale efectuat pe standul de eroziune cavitațională ce se află în dotarea „Centrului de Cercetări în Hidraulică, Automatizări și Procese Termice” (CCHAPT) din cadrul Universității „Eftimie Murgu” din Reșița, însumând ~356 ore fizice de încercări. Majoritatea încercărilor s-au efectuat prin metoda indirectă de cavitație vizând: reproducerea curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională, obținerea caracteristicilor cavitaționale pentru toate cele patru stadii cavitaționale: incubație, accelerare, staționare și decelerare, rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate extinse ale atacului cavitațional; de asemenea s-au efectuat cercetări preliminare comparative pe aluminiu prin metoda directă și indirectă de cavitație.

Teza debutează cu prezenta **Prefață**, cu un **Cuprins**, urmat de **Listă figuri**, **Listă tabele** și **Listă notații**.

Capitolul 1 sintetizează stadiul actual al cercetărilor în domeniu, oferind rezultate numerice și grafice obținute în țară și străinătate pe diverse materiale pe aparate vibratoare prin metoda directă și indirectă de cavitație, precum și pe aparate cu disc rotitor.

Capitolul 2 prezintă obiectivele tezei de doctorat.

Capitolul 3 prezintă standul utilizat la eroziunea cavitațională a materialelor, standardul G 32-10 utilizat în cercetarea experimentală, procedee de eroziune cavitațională, procedura de experimentare, precum și curbe și parametrii caracteristici procesului.

Aparatul vibrator TELSONIC, proiectat special pentru studii cavitaționale, a venit echipat cu două sonotrode din titan pentru: epruvete din aluminiu respectiv din oțel, ambele cu filet exterior M12x1 pentru atașarea prin filetare a epruvetei. Cu aceste sonotrode se pot efectua încercări cavitaționale numai prin metoda directă. În consecință, **capitolul 4** se referă la cercetări referitoare la proiectarea și calibrarea experimentală de sonotrode pentru încercarea eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda indirectă.

Capitolul 5 prezintă rezultatele experimentale ale autorului tezei efectuate pe un număr de 16 materiale, pentru obținerea caracteristicilor procesului de eroziune cavitațională. Cercetările au fost efectuate pe următoarele categorii de materiale: oțeluri inoxidabile, oțeluri de uz general și aliate, fonte, bronzuri și aliaje pe bază de aluminiu respectiv staniu.

Capitolul 6 prezintă concluzii finale, contribuții personale, direcții viitoare de cercetare și diseminarea rezultatelor.

Teza se încheie cu **Bibliografie** și **CV-ul** autorului.

Teza se întinde pe 210 pagini și conține: 309 figuri (inclusiv poze), 145 tabele, 62 relații și 127 referințe bibliografice, dintre care 13 anterioare anului 2000, 22 între anii 2000-2005, 57 între anii 2006-2010 și 35 după anul 2010.

Doresc să-mi exprim pe această cale, profunda mea recunoștință conducătorului științific domnului prof. dr. ing. Dorian Nedelcu pentru orientarea și îndrumarea în munca de cercetare și pentru analiza cu înalt profesionalism a conținutului lucrării.

Un cuvânt de mulțumire adresez domnului prof. dr. ing. Constantin Viorel Câmpian, manager general al centrului de cercetare CCHAPT Reșița, care a contribuit în mod decisiv la



Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

achiziția standului cavitațional, precum și domnului cercetător dr. ing. Ioan Ion, pentru asistența și sprijinul tehnic acordate în cadrul cercetărilor preliminare.

De asemenea, doresc să mulțumesc prof. dr. ing. Doina Frunzăverde, precum și domnului asist. drd. ing. Relu Ciubotariu, pentru punerea la dispoziție a resurselor laboratorului ExpertLAB și sprijinul acordat la efectuarea analizelor metalografice pe epruvete.

Adresez mulțumiri, colegilor de la Facultatea de Mecanică și Ingineria Materialelor care au participat la examenele și referatele susținute, aducând observații și sugestii utile în vederea îmbunătățirii conținutului tezei: domnului prof. dr. ing. Constantin Viorel Câmpian, domnului prof. dr. ing. Gilbert-Rainer Gillich, domnului prof.dr.ing. Tiberiu Mănescu și domnului prof. dr. ing. Gheorghe Popovici.

Mulțumesc domnilor prof. dr. ing. Gheorghe Băran, din cadrul Universității “Politehnica” din București și prof. dr. ing. Ilare Bordeasu din cadrul Universității “Politehnica” din Timișoara, care m-au onorat acceptând să facă parte din comisia de doctorat.

Mulțumesc domnului ing. Marin Anica director general al SC Digitline Automatizări pentru furnizarea echipamentului pentru măsurarea frecvenței proprii, precum și a softului de analiză Fastview.

Mulțumesc conducerii Universității „Eftimie Murgu” din Reșița, d-nei rector prof. dr. ing. Doina Frunzăverde și Centrului de Elaborare și Management al Proiectelor de Dezvoltare Instituțională POSDRU din cadrul Universității “Politehnica” București pentru suportul acordat pe parcursul studiilor doctorale. Studiile doctorale ale autorului s-au efectuat prin proiectul „Competitivitate și performanță în cercetare prin programe doctorale de calitate (ProDOC)”, finanțat din fondurile POSDRU prin contractul de finanțare POSDRU/88/1.5/S/61178, program desfășurat sub egida Universității „Politehnica” din București în cooperare cu Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița.

Mulțumesc tuturor colegilor celor care au fost alături de mine și m-au ajutat să finalizez teza de doctorat, domnului prof.dr.ing. Gheorghe Liuba din cadrul Centrului de Cercetare CCHAPT - Laborator Testarea Echipamentelor, domnului șef lucrări Ionel-Cincă Lupinca, doamnei dr. ing. Veronica Rigou, asist. drd. ing. Vasile Cojocar, cercetătorului drd. ing. Cosmin Dumbravă și tehnicianului Nicolae Trulea.

Nu în ultimul rând aduc mulțumiri familiei mele pentru înțelegerea și sprijinul acordat pe parcursul elaborării tezei.

Reșița, 2012

Drd. ing. Marian-Dumitru Nedeloni

CUPRINS

Listă figuri	7
Listă tabele	15
Listă notații	18
Cap. 1 STADIUL ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE ASUPRA FENOMENULUI DE CAVITAȚIE ȘI EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ	19
1.1 Generalități	19
1.2 Descrierea fenomenului de cavitație și eroziunea cavitațională	19
1.3 Standuri de cercetare experimentală a eroziunii cavitaționale	21
1.4 Rezultate obținute în laboratoare de profil	23
Cap. 2 OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT	31
Cap. 3 ȘTANDUL UTILIZAT LA ÎNCERCARI DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ A MATERIALELOR	32
3.1 Generalități	32
3.2 Descriere stand de eroziune cavitațională	32
3.2.1 Generatorul de ultrasunete DG-2000	33
3.2.2 Traductorul și transformatorul mecanic	36
3.2.3 Sonotroda	36
3.2.4 Epruveta	36
3.2.5 Balanța analitică	37
3.2.6 Echipamentul pentru măsurarea frecvenței proprii	37
3.3 Standardul G 32-10 utilizat în cercetarea experimentală	39
3.4 Procedee de eroziune cavitațională	40
3.5 Procedura de experimentare	41
3.6 Curbe și parametrii caracteristici ale procesului de eroziune cavitațională	44
3.6.1 Curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională	44
3.6.2 Pierderea de material	44
3.6.3 Viteza de eroziune cavitațională	45
3.6.4 Adâncimea medie de pătrundere	46
Cap. 4 CERCETĂRI PENTRU CALIBRAREA DE SONOTRODE DESTINATE ÎNCERCĂRILOR DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ A EPRUVETELOR	47
4.1 Generalități	47
4.2 Analiza fisurării și ruperii sonotrodei	48
4.2.1 Geometria sonotrodei	48
4.2.2 Analiza statică a sonotrodei cu filet exterior M12x1	49
4.2.3 Calculul la oboseală a sonotrodei cu filet exterior M12x1	52
4.2.4 Geometria sonotrodelor reproiectate cu filet interior M12x1, M10x1, M8x1	56
4.2.5 Analiza statică a sonotrodelor reproiectate cu filet interior	56
4.2.6 Calculul la oboseală al sonotrodelor reproiectate cu filet interior	62
4.3 Calibrarea unei sonotrode cu filet interior M12x1 din titan și știft intermediar pentru încercări de eroziune de cavitațională prin metoda directă	66

4.3.1	Introducere	66
4.3.2	Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă	66
4.3.3	Etape pentru calculul frecvenței proprii prin analiză modală în SolidWorks	66
4.3.4	Rezultate obținute la calibrarea sonotrodei cu filet interior M12x1 și știft intermediar	69
4.4	Calibrarea unei sonotrode din oțel pentru încercări de eroziune cavitațională prin metoda indirectă	84
4.4.1	Introducere	84
4.4.2	Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă	85
4.4.3	Rezultate obținute prin analiza modală	85
4.4.4	Rezultate obținute prin măsurarea frecvenței proprii	90
4.4.5	Încercări preliminare de eroziune cavitațională prin metoda indirectă	92
4.5	Calibrarea unei sonotrode din titan pentru încercări de eroziune cavitațională prin metoda indirectă	94
4.5.1	Introducere	94
4.5.2	Rezultate obținute prin măsurarea frecvenței proprii	94
4.5.3	Concluzii	97
4.6	Selecția metodei de testare a eroziunii cavitaționale a epruvetelor	97
Cap. 5	REZULTATE EXPERIMENTALE ALE CERCETĂRIILOR PE MATERIALE SUPUSE LA EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ	99
5.1	Cercetări preliminare pe aluminiu prin metoda directă și metoda indirectă de cavitație	102
5.2	Cercetări de eroziune cavitațională privind reproducerea curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională	104
5.2.1	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul carbon de calitate C35	104
5.2.2	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 41Cr4	108
5.2.3	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul carbon de calitate OLC45	113
5.2.4	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 26CrMo4	116
5.2.5	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 34CrNiMo6	120
5.2.6	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X20Cr13	123
5.2.7	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 1	126
5.2.8	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 2	131
5.2.9	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 3	134
5.2.10	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 4	137
5.2.11	Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X5CrNi18-10	140
5.3	Cercetări privind obținerea curbei vitezei de eroziune cavitațională pe diferite materiale	143
5.3.1	Cercetări pe materialul YSn83	144
5.3.2	Cercetări pe materialul EN-GJS-400-15	146
5.3.3	Cercetări pe materialul Fc (EN-GJL)	149
5.3.4	Cercetări pe materialul AlSi12	151
5.3.5	Cercetări pe materialul CuSn12	154
5.3.6	Cercetări pe materialul CuSn10Pb5	156
5.3.7	Cercetările pe materialul Fgn (EN-GJS)	158
5.3.8	Cercetările pe materialul OLC 35	161
5.3.9	Comparare rezultate obținute pentru curba vitezei de eroziune cavitațională	164

5.4 Cercetări privind rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate extinse ale atacului cavitațional	166
5.4.1 Cercetări pentru durate extinse pe materialul OLC45	169
5.4.2 Cercetări pentru durate extinse pe materialul 26CrMo4	171
5.4.3 Cercetări pentru durate extinse pe materialul 34CrNiMo6	173
5.4.4 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X20Cr13	175
5.4.5 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 1	177
5.4.6 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 2	180
5.4.7 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 3	182
5.4.8 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 4	184
5.4.9 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X5CrNi18-10	188
5.5. Concluzii finale	190
5.5.1 Concluzii referitoare la suporturile de prindere a epruvetelor	190
5.5.2 Concluzii referitoare la evoluția sonotrodelor pe durata experimentărilor	190
5.5.3 Concluzii referitoare la rezultatele experimentărilor	192
Cap. 6 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE. DISEMINAREA REZULTATELOR	194
6.1 Concluzii generale	194
6.2 Contribuții personale	195
6.3 Direcții viitoare de cercetare	196
6.4 Diseminarea rezultatelor	196
BIBLIOGRAFIE	199

LISTĂ FIGURI

Figura	Denumire	Pag.
1.1	Zone tipice de apariție a eroziunii cavitaționale	20
1.2	Exemple de rotoare distruse prin cavitație	20
1.3	Concentrator acustic	22
1.4	Dimensiuni concentrator acustic	22
1.5	Tipuri de aparate vibratorii	22
1.6	Tipuri de curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională obținute pe aparat vibrator prin metoda directă	23
1.7	Curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională pe instalații cu ultrasunete și disc rotitor	24
1.8	Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă	27
1.9	Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda indirectă	29
1.10	Comparație materiale măsurate pe aparate cu disc rotitor	30
3.1	Ștand pentru încercarea eroziunii cavitaționale	33
3.2	Generatorul de ultrasunete DG-2000	33
3.3	Desen de execuție epruvetă	37
3.4	Balanța analitică METTLER TOLEDO	37
3.5	Modulul de achiziție tip USB 6212	38
3.6	Aplicația Fastview pentru măsurarea frecvenței proprii	38
3.7	Forma de undă a semnalului furnizat de sonotrodă la aplicarea unui impact	39
3.8	Spectrul de frecvență al semnalului furnizat de sonotrodă la aplicarea unui impact	39
3.9	Măsurarea automată a frecvenței de rezonanță	39
3.10	Principiul metodei de cavitație directe	41
3.11	Principiul metodei de cavitație indirecte	41
3.12	Etapele testării unei epruvete	42
3.13	Suporturi pentru fixarea epruvetelor pentru de metoda de eroziune indirectă	43
3.14	Suport cu 4 șuruburi - geometrie SolidWorks	43
3.15	Suport cu 4 șuruburi – vedere de sus	43
3.16	Curba de pierdere de material și a vitezei de eroziune funcție de timp	45
3.17	Tipuri de curbe ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp	45
4.1	Sonotroda cu filet exterior M12x1 cu ruptură în zona filetului	47
4.2	Sonotroda cu filet exterior M12x1 cu ruptură în zona filetului (detaliu)	47
4.3	Geometrie sonotrodă cu filet exterior M12x1	48
4.4	Restrângeri aplicate pe sonotroda cu filet exterior M12x1	49
4.5	Material (Titan Ti-6Al-4V) asociat sonotrodei cu filet exterior M12x1	49
4.6	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet exterior M12x1 – Caz 1	50
4.7	Discretizare sonotrodă cu filet exterior M12x1 – Caz 1	50
4.8	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet exterior M12x1 – Caz 2	50
4.9	Discretizare sonotrodă cu filet exterior M12x1 – Caz 2	50
4.10	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet exterior M12x1 – Caz 3	50
4.11	Discretizare sonotrodă cu filet exterior M12x1 – Caz 3	50
4.12	Tensiunea von Mises 600 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 1	51
4.13	Deplasarea rezultantă 50.0937 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 1	51
4.14	Tensiunea von Mises 614 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 2	51
4.15	Deplasarea rezultantă 50.0946 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 2	51
4.16	Tensiunea von Mises 588 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 3	51
4.17	Deplasarea rezultantă 50.0947 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 3	51
4.18	Curba SN pentru Ti-6Al-4V	53
4.19	Sonotroda cu filet exterior M12x1 Definirea evenimentului	54
4.20	Sonotroda cu filet exterior M12x1 Durata de viață min. 1140785 cicluri	54
4.21	Sonotroda cu filet exterior M12x1 Procentul de distrugere max. 876.6%	54

Figura	Denumire	Pag.
4.22	Sonotroda cu filet exterior M12x1 Coeficient de încărcare min. 0.897	54
4.23	Sonotroda cu filet exterior M12x1 Poziționarea punctului cel mai defavorabil în diagrama SN	55
4.24	Geometrie sonotrodă cu filet interior M12x1	57
4.25	Geometrie sonotrodă cu filet interior M10x1	57
4.26	Geometrie sonotrodă cu filet interior M8x1	58
4.27	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 1	59
4.28	Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 1	59
4.29	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 2	59
4.30	Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 2	59
4.31	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 3	59
4.32	Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 3	59
4.33	Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 4	60
4.34	Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 4	60
4.35	Comparația convergenței rezultatelor analizei statice pentru sonotrodele cu filet exterior (M12x1), respectiv cu filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1)	61
4.36	Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M12x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=545.1$ MPa ; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=514.9$ MPa ; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=501.9$ MPa ; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=512.4$ MPa	61
4.37	Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M10x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=475.7$ MPa ; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=451.5$ MPa ; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=394.4$ MPa ; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=338.6$ MPa	61
4.38	Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M8x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=394.6$ MPa; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=359.5$ MPa ; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=350.3$ MPa ; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=297.5$ MPa	62
4.39	Sonotroda cu filet interior M12x1; Durata de viață min. 5072270 cicluri; Procentul de distrugere max. 197.2%;Coeficient de încărcare min. 0.987	64
4.40	Sonotroda cu filet interior M10x1 Coeficient de încărcare min. 1.131	64
4.41	Sonotroda cu filet interior M8x1 Coeficient de încărcare min. 1.363	64
4.42	Sonotrode cu filet exterior (M12x1) și filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1) Poziționarea punctelor cele mai defavorabile în diagrama SN	65
4.43	a) Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă b) Elemente componente ale ansamblului 3D buster-sonotrodă-epruvetă	67
4.44	Geometria sonotrodei din titan	68
4.45	Coeficientul de participare masică pe direcțiile normalizate X, Y și Z	68
4.46	Schiță sonotrodă: L=129.5 cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar	70
4.47	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.5 mm	70
4.48	Schiță sonotrodă: L=129.15 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	71
4.49	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.15 mm	71
4.50	Schiță sonotrodă: L=128.93 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	72
4.51	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.93 mm	72
4.52	Schiță sonotrodă: L=128.67 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	73
4.53	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.67 mm	73
4.54	Schiță sonotrodă: L=128.51 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	74
4.55	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.51 mm	74
4.56	Schiță sonotrodă: L=128.17 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	75
4.57	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=128.17 mm	75
4.58	Schiță sonotrodă: L=127.72 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 16 mm	76
4.59	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=127.72 mm	76
4.60	Schiță sonotrodă: L=127 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 14,3 mm	77
4.61	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=127 mm	77
4.62	Schiță sonotrodă: L=126.3 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 12,75 mm	78
4.63	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.3 mm	78
4.64	Schiță sonotrodă: L=126.2 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 12,75 mm	79
4.65	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.2 mm	79
4.66	Schiță sonotrodă: L=126.1 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 12,75 mm	80
4.67	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.1 mm	80
4.68	Schiță sonotrodă: L=125.9 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 12,75 mm	81

Figura	Denumire	Pag.
4.69	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=125.9 mm	81
4.70	Schiță sonotrodă: L=125.7 mm cu filet interior M12x1 și cu știft intermediar 12,75 mm	82
4.71	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=125.7 mm	82
4.72	Comparație frecvențe proprii calculate și măsurate pentru sonotroda cu filet interior M12x1 și știft intermediar	83
4.73	Ansamblu buster-sonotrodă-epruvetă	85
4.74	Variația frecvenței calculate prin analiza modală funcție de numărul modului de vibrație	86
4.75	Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 160 mm	88
4.76	Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 155.5 mm	88
4.77	Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 150 mm	89
4.78	Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 145 mm	89
4.79	Variația lungimii sonotrodei funcție de frecvența calculată & interpolarea lineară a dependenței	89
4.80	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=155.4 mm la aplicarea unui impact	90
4.81	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=157.2 mm la aplicarea unui impact	90
4.82	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=157.4 mm la aplicarea unui impact	91
4.83	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=155 mm la aplicarea unui impact	91
4.84	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=154.6 mm la aplicarea unui impact	91
4.85	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu L=154.2 mm la aplicarea unui impact	91
4.86	Variația frecvența măsurate și calculate funcție de lungimea sonotrodei din oțel	91
4.87	Variația $mc=f(timp)$ încercări preliminare de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă cu sonotroda din oțel	93
4.88	Variația $Vec=f(timp)$ încercări preliminare de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă cu sonotroda din oțel	93
4.89	Suprafața erodată a epruvetei din oțel	93
4.90	Fotografie microscopică a epruvetei din oțel	93
4.91	Detalii oxidare și erodare pentru sonotroda din oțel după mai multe ore de funcționare	93
4.92	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=159 mm la aplicarea unui impact	95
4.93	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=158.6 mm la aplicarea unui impact	95
4.94	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=157.7 mm la aplicarea unui impact	95
4.95	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=157 mm la aplicarea unui impact	95
4.96	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=156.1 mm la aplicarea unui impact	95
4.97	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=155.7 mm la aplicarea unui impact	95
4.98	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=155.5 mm la aplicarea unui impact	96
4.99	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=155.1 mm la aplicarea unui impact	96
4.100	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=154.7 mm la aplicarea unui impact	96

Figura	Denumire	Pag.
4.101	Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu L=154.4 mm la aplicarea unui impact	96
4.102	Variația frecvenței măsurate funcție de lungimea sonotrodei din titan	96
4.103	Sonotrodă originală din titan cu filet exterior M12x1 utilizată pentru metoda directă	97
4.104	Sonotrodă finală din titan utilizată pentru metoda indirectă	97
5.1	Strungul cu comandă numerică EMCO Concept TURN 55	102
5.2	Masa cumulată erodată funcție de timp prin metoda directă și indirectă pentru aluminiu	103
5.3	Viteza de eroziune cavitațională funcție de timp prin metoda directă și indirectă pentru aluminiu	103
5.4	Imagini epruvetă cavitată prin metoda directă	103
5.5	Imagini epruvetă cavitată prin metoda indirectă	103
5.6	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul C35	106
5.7	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul C35	106
5.8	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul C35 (media aritmetică)	107
5.9	Curba vitezei de eroziune cavitațională pentru oțelul C35 funcție de timp (media aritmetică)	107
5.10	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțel C35 înainte și după cavitație	108
5.11	Imaginile după testul de analiză chimică realizat cu spectrometrul	109
5.12	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 41Cr4	111
5.13	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 41Cr4	111
5.14	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 41Cr4 (media aritmetică)	111
5.15	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 41Cr4 (media aritmetică)	111
5.16	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul 41Cr4 înainte și după cavitație	112
5.17	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45	114
5.18	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45	114
5.19	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 (media aritmetică)	115
5.20	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 (media aritmetică)	115
5.21	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din OLC45 înainte și după cavitație	116
5.22	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6	118
5.23	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6	118
5.24	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6 (media aritmetică)	118
5.25	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6 (media aritmetică)	118
5.26	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din 26CrMo4 înainte și după cavitație	119
5.27	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6	121
5.28	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6	121
5.29	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (media aritmetică)	121
5.30	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (media aritmetică)	121
5.31	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul 34CrNiMo6 înainte și după cavitație	122
5.32	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13	124
5.33	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13	124
5.34	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (media aritmetică)	125
5.35	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (media aritmetică)	125
5.36	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul X20Cr13 înainte și după cavitație	126
5.37	Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (1)	127
5.38	Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (2)	127
5.39	Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (3)	127
5.40	Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (4)	127
5.41	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1)	129
5.42	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1)	129
5.43	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1) (media aritmetică)	129
5.44	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1) (media aritmetică)	129
5.45	Imagini și macrostructuri ale epruvetei din materialul X3CrNi13-4 (1) înainte și după cavitație	130
5.46	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2)	132

Figura	Denumire	Pag.
5.47	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2)	132
5.48	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2) (media aritmetică)	132
5.49	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2) (media aritmetică)	132
5.50	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (2) înainte și după cavitație	133
5.51	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3)	135
5.52	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3)	135
5.53	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3) (media aritmetică)	135
5.54	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3) (media aritmetică)	135
5.55	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (3) înainte și după cavitație	136
5.56	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4)	138
5.57	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4)	138
5.58	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4) (media aritmetică)	138
5.59	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4) (media aritmetică)	138
5.60	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (4) înainte și după cavitație	139
5.61	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10	141
5.62	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10	141
5.63	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (media aritmetică)	142
5.64	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (media aritmetică)	142
5.65	Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X5CrNi18-8 înainte și după cavitație	143
5.66	Curba pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 15 minute)	145
5.67	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 15 minute)	145
5.68	Curba pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 5 minute)	145
5.69	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 5 minute)	145
5.70	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (comparație)	145
5.71	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (comparație)	145
5.72	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	146
5.73	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 5 minute	146
5.74	Curba pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 15 minute)	147
5.75	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 15 minute)	147
5.76	Curba pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 30 minute)	147
5.77	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 30 minute)	147
5.78	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (comparație)	148
5.79	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (comparație)	148
5.80	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	148
5.81	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute	148
5.82	Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 15 minute)	150
5.83	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 15 minute)	150
5.84	Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 30 minute)	150
5.85	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 30 minute)	150
5.86	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (comparație)	150
5.87	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (comparație)	150
5.88	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	151

Figura	Denumire	Pag.
5.89	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute	151
5.90	Curba pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 15 minute)	152
5.91	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 15 minute)	152
5.92	Curba pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 8 minute)	152
5.93	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 8 minute)	152
5.94	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (comparație)	153
5.95	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (comparație)	153
5.96	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	153
5.97	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 8 minute	153
5.98	Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 15 minute)	155
5.99	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 15 minute)	155
5.100	Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 30 minute)	155
5.101	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 30 minute)	155
5.102	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (comparație)	155
5.103	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (comparație)	155
5.104	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute (timp total de 225 minute)	156
5.105	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute (timp total de 240 minute)	156
5.106	Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 15 minute)	157
5.107	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 15 minute)	157
5.108	Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 30 minute)	157
5.109	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 30 minute)	157
5.110	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (comparație)	157
5.111	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (comparație)	157
5.112	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	158
5.113	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute	158
5.114	Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 15 minute)	159
5.115	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 15 minute)	159
5.116	Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 30 minute)	160
5.117	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 30 minute)	160
5.118	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (comparație)	160
5.119	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (comparație)	160
5.120	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	161
5.121	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute	161
5.122	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 15 minute)	162
5.123	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 15 minute)	162
5.124	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 45 minute)	163
5.125	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 45 minute)	163
5.126	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (comparație)	163
5.127	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (comparație)	163

Figura	Denumire	Pag.
5.128	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute	164
5.129	Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 45 minute	164
5.130	Comparație materiale analizate la 180 de minute de atac cavitațional	165
5.131	Variația pierderii masice a materialelor analizate la 180 de minute	165
5.132	Variația vitezei de eroziune cavitațională a materialelor analizate la 180 de minute	165
5.133	Comparație materiale la 900 de minute de atac cavitațional	167
5.134	Variația pierderii masice a materialelor analizate la 900 de minute	168
5.135	Variația vitezei de eroziune cavitațională a materialelor analizate la 900 de minute	168
5.136	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 la 900 minute	170
5.137	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 la 900 minute (curba analitică și experimentală)	170
5.138	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	170
5.139	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 (comparație curbe experimentale)	170
5.140	Imagini ale epruvetei erodate din oțelul OLC45	171
5.141	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 la 900 minute	172
5.142	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 la 900 minute (curba analitică și experimentală)	172
5.143	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	172
5.144	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo (comparație curbe experimentale)	172
5.145	Imagini ale epruvetei erodate din oțelul 26CrMo4	173
5.146	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 la 900 minute (curba analitică și experimentală)	174
5.147	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 la 900 minute (curba analitică și experimentală)	174
5.148	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	174
5.149	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (comparație curbe experimentale)	174
5.150	Imagini ale epruvetei erodate din oțelul 34CrNiMo6	175
5.151	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 la 900 minute	176
5.152	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 la 900 minute (curba analitică și experimentală)	176
5.153	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	176
5.154	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (comparație curbe experimentale)	176
5.155	Imagini ale epruvetei erodate din oțelul X20Cr13	177
5.156	Imagini ale epruvetelor din oțelul inoxidabil X3CrNi13-4	178
5.157	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) la 1080 minute	179
5.158	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)	179
5.159	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	179
5.160	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) (comparație curbe experimentale)	179
5.161	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) la 1080 minute	181
5.162	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)	181

Figura	Denumire	Pag.
5.163	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	181
5.164	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) (comparație curbe experimentale)	181
5.165	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) la 1080 minute	183
5.166	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)	183
5.167	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	183
5.168	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) (comparație curbe experimentale)	183
5.169	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) la 1080 minute	185
5.170	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)	185
5.171	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	185
5.172	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) (comparație curbe experimentale)	186
5.173	Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 la 1800 minute (curba analitică și experimentală)	188
5.174	Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 la 1800 minute (curba analitică și experimentală)	189
5.175	Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)	189
5.176	Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (comparație curbe experimentale)	189
5.177	Imagini ale epruvetei erodate din oțelul X5CrNi18-10	190
5.178	Imagini ale celor 2 sonotrode utilizate	191

LISTĂ TABELE

Tabel	Denumire	Pag.
1.1	Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă	25
1.2	Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda indirectă	28
1.3	Comparație materiale măsurate pe aparat cu disc rotitor	29
4.1	Discretizare sonotrodă cu filet exterior M12x1	49
4.2	Rezultate analiză statică pentru sonotroda cu filet exterior M12x1	52
4.3	Valori numerice ale curbei SN pentru Ti-6Al-4V	53
4.4	Rezultate ale calculului la oboseală a sonotrodei cu filet exterior M12x1	55
4.5	Discretizare sonotrode cu filet interior M12x1, M10x1, M8x1	58
4.6	Tensiuni von Mises obținute din analiză statică pentru sonotrode cu filet interior	60
4.7	Deplasări obținute din analiză statică pentru sonotrode cu filet interior	60
4.8	Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M12x1	63
4.9	Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M10x1	63
4.10	Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M8x1	63
4.11	Centralizator tabele și figuri pentru rezultate obținute la calibrarea sonotrodei cu filet interior M12x1 din titan și știft intermediar	69
4.12	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.5 mm	70
4.13	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=129.15 mm	71
4.14	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=128.93 mm	72
4.15	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=128.67 mm	73
4.16	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=128.51 mm	74
4.17	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=128.17 mm	75
4.18	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=127.72 mm	76
4.19	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=127 mm	77
4.20	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.3 mm	78
4.21	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.2 mm	79
4.22	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=126.1 mm	80
4.23	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=125.9 mm	81
4.24	Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei L=125.7 mm	82
4.25	Frecvențe proprii calculate și măsurate pentru sonotroda cu filet interior M12x1 și știft intermediar	83
4.26	Coeficienți de participare masică pentru lungime sonotrodă=160 mm	86
4.27	Coeficienți de participare masică pentru lungime sonotrodă=155.5 mm	86
4.28	Coeficienți de participare masică pentru lungime sonotrodă=150 mm	87
4.29	Coeficienți de participare masică pentru lungime sonotrodă=145mm	87
4.30	Rezultatele analizei modale pentru modul de vibrație 19	88
4.31	Frecvențe proprii măsurate sonotrodă oțel	90
4.32	Încercări preliminare de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă	92
4.33	Frecvențe proprii măsurate sonotrodă titan	94
4.34	Evoluția cercetărilor teoretice și experimentale pentru crearea și calibrarea unei sonotrode	98
5.1	Clasificare materiale analizate	99
5.2	Evidența încercărilor de eroziune cavitațională pe materiale	100
5.3	Valorile obținute prin metoda directă pe aluminiu	102
5.4	Valorile obținute prin metoda indirectă pe aluminiu	102
5.5	Compararea metodei directe față de cea indirectă	104
5.6	Compoziția chimică pentru oțelul C35 [%]	105
5.7	Proprietățile mecanice pentru oțelul C35	105
5.8	Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 1 Fața 1	105

Tabel	Denumire	Pag.
5.9	Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 1 Fața 2	105
5.10	Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 2 Fața 1	106
5.11	Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 2 Fața 2	106
5.12	Media valorilor pentru oțelul C35	107
5.13	Compoziția chimică a oțelurilor aliate de îmbunătățire	109
5.14	Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 1 Fața 1	110
5.15	Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 1 Fața 2	110
5.16	Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 2 Fața 1	110
5.17	Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 2 Fața 2	110
5.18	Media valorilor pentru oțelul 41Cr4	111
5.19	Compoziția chimică conform certificatului producătorului pentru OLC45 [%]	113
5.20	Proprietățile mecanice pentru OLC45	113
5.21	Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 1 Fața 1	113
5.22	Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 1 Fața 2	113
5.23	Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 2 Fața 1	114
5.24	Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 2 Fața 2	114
5.25	Media valorilor pentru oțelul OLC45	115
5.26	Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 1 Fața 1	117
5.27	Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 1 Fața 2	117
5.28	Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 2 Fața 1	117
5.29	Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 2 Fața 2	117
5.30	Media valorilor pentru oțelul 26CrMo6	118
5.31	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 1 Fața 1	120
5.32	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 1 Fața 2	120
5.33	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 2 Fața 1	120
5.34	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 2 Fața 2	120
5.35	Media valorilor pentru oțelul 34CrNiMo6	121
5.36	Compoziția chimică pentru X20Cr13 [%]	123
5.37	Proprietățile mecanice pentru X20Cr13	123
5.38	Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 1 Fața 1	123
5.39	Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 1 Fața 2	123
5.40	Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 2 Fața 1	124
5.41	Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 2 Fața 2	124
5.42	Media valorilor pentru oțelul X20Cr13	125
5.43	Compoziția chimică pentru oțelurile X3CrNi13-4 [%]	127
5.44	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 1	128
5.45	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 2	128
5.46	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 3	128
5.47	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 4	128
5.48	Media valorilor pentru oțelul X3CrNi13-4 (1)	129
5.49	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) - Proba 1 Fața 1	131
5.50	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) - Proba 1 Fața 2	131
5.51	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) - Proba 2 Fața 1	131
5.52	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) - Proba 2 Fața 2	131
5.53	Media valorilor pentru oțelul X3CrNi13-4 (2)	132
5.54	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) - Proba 1 Fața 1	134
5.55	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) - Proba 1 Fața 2	134
5.56	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) - Proba 2 Fața 1	134
5.57	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) - Proba 2 Fața 2	134
5.58	Media valorilor pentru oțelul X3CrNi13-4 (3)	135
5.59	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) - Proba 1 Fața 1	137
5.60	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) - Proba 1 Fața 2	137

Tabel	Denumire	Pag.
5.61	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 2 Fața 1	137
5.62	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 2 Fața 2	137
5.63	Media valorilor pentru oțelul X3CrNi13-4 (4)	138
5.64	Compoziția chimică pentru oțelul X5CrNi18-10 [%]	140
5.65	Proprietățile mecanice pentru oțelul X5CrNi18-10	140
5.66	Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 1 Fața 1	140
5.67	Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 1 Fața 2	140
5.68	Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 2 Fața 1	141
5.69	Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 2 Fața 2	141
5.70	Media valorilor pentru oțelul X5CrNi18-10	142
5.71	Compoziția chimică pentru YSn83 [%]	144
5.72	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru YSn83	144
5.73	Valorile obținute pe perioadele de 5 minute (suprafața 3) pentru YSn83	144
5.74	Compoziția chimică pentru fonta EN-GJS-400-15 [%]	146
5.75	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru EN-GJS-400-15	147
5.76	Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 3) pentru EN-GJS-400-15	147
5.77	Compoziția chimică pentru fonta cu grafit lamelar [%]	149
5.78	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 2 fața 1) pentru Fc (EN-GJL)	149
5.79	Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (proba 1 fața 1) pentru Fc (EN-GJL)	149
5.80	Compoziția chimică pentru AlSi12 [%]	151
5.81	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 2) pentru AlSi12	151
5.82	Valorile obținute pe perioadele de 8 minute (suprafața 4) pentru AlSi12	152
5.83	Compoziția chimică pentru CuSn12 [%]	154
5.84	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 4) pentru CuSn12	154
5.85	Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 2) pentru CuSn12	154
5.86	Compoziția chimică pentru CuSn10Pb5 [%]	156
5.87	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 4) pentru CuSn10Pb5	156
5.88	Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 2) pentru CuSn10Pb5	157
5.89	Compoziția chimică pentru fonta cu grafit nodular [%]	158
5.90	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 1 fața 1) pentru Fgn (EN-GJS)	159
5.91	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 2 fața 1) pentru Fgn (EN-GJS)	159
5.92	Compoziția chimică pentru oțelul OLC35 [%]	161
5.93	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru oțelul OLC35	162
5.94	Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 3) pentru oțelul OLC35	162
5.95	Comparație materialelor analizate	164
5.96	Centralizatorul materialelor analizate	167
5.97	Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 1 fața 2) pe oțelul OLC45	169
5.98	Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 1 fața 2) pe oțelul 26CrMo4	171
5.99	Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 2 fața 2) pe oțelul 34CrNiMo6	173
5.100	Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proba 2 fața 2) pe oțelul X20Cr13	175
5.101	Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (suprafața 3) pe oțelul X3CrNi13-4(1)	178
5.102	Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proba 1 fața 2) pe oțelul X3CrNi13-4(2)	180
5.103	Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proba 2 fața 2) pe oțelul X3CrNi13-4(3)	182
5.104	Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proba 2 fața 1) pe oțelul X3CrNi13-4(4)	184
5.105	Comparație între cele 4 șarje ale oțelului inoxidabil X3CrNi13-4	187
5.106	Rezultatele obținute pentru perioade de 60 minute (proba 1 fața 2) pe oțelul X5CrNi18-10	188
5.107	Comparare sonotrode utilizate	191
5.108	Descrierea domeniului de frecvență a generatorului de ultrasunete	192

LISTĂ NOTAȚII

Notăție	Denumire
A [%]	Alungirea relativă
A [μm]	Amplitudinea vibrațiilor
a_i, b_i	Coeficienți
E	Modulul de elasticitate
f	Frecvența de rezonanță
L	Lungime sonotrodă
Life	Durata de viață
m	Masă epruvetă
m_c	Masa erodată cumulată
N	Numărul de cicluri
p	Presiunea din exteriorul bulei
p_0	Presiunea din interiorul bulei
pp	„peak to peak” – amplitudine vârf la vârf
R^2	Abaterea medie pătratică
Rm	Rezistența mecanică la rupere
Rp 0.2	Limita de curgere
t	Timpul cumulat
v	Viteza de eroziune cavitațională
V	Volumul de material erodat
Vec	Viteza de eroziune cavitațională
ΔL	Reprezintă lungimea de scurtare a sonotrodei față de valoarea din experimentul anterior
Δm	Masa erodată per perioadă
ΔN	Diferența de cicluri
Δp	Diferența de presiune dintre exteriorul și interiorul bulei cavitaționale
Δt	Diferența de timp
ΔV	Diferența de volum erodat a materialului
ν	Coeficientul lui Poisson
$\sigma_{\max}$	Tensiune alternantă maximă în piesă
σ_{SN}	Tensiune alternantă de pe curba SN a materialului
$\sigma_{SN} / \sigma_{\max}$	Coeficientul de încărcare
$\sigma_{\text{von Mises}}$	Tensiune von Mises
$\sum \Delta V$	Suma volumului cumulat de material erodat

Cap. 1 STADIUL ACTUAL PRIVIND CERCETĂRILE ASUPRA FENOMENULUI DE CAVITAȚIE ȘI EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ

1.1 Generalități

Una din realizările importante ale omenirii este producerea energiei electrice, pentru satisfacerea necesităților energetice, proces în care omul are atât rol de producător, cât și rol de consumator de energie electrică. În prezent există 2 tipuri de consumatori de energie electrică: consumatori industriali și casnici [102].

Producerea energiei electrice prin metode clasice are loc în centrale electrice, o categorie importantă fiind constituită din centralele hidroelectrice sau hidrocentrale. Principalele tipuri de turbine și microturbine hidraulice care echipează hidro și microcentralele sunt: turbina bulb, turbina Kaplan, turbina Francis, turbina Pelton [25, 102].

Deși, energia electrică produsă în hidrocentrale este mai ieftină, comparativ cea produsă în termocentrale și centrale nucleare [24, 106], există o problemă care afectează funcționarea turbinele hidraulice [23, 25, 109] și anume fenomenul de cavitație și eroziunea cavitațională.

Fenomenul de cavitație se produce nu numai în turbine hidraulice, ci și în alte medii care utilizează fluide ca agent de lucru: distribuitoare [6], pompe [24, 52], elice navale [4], conducte [7], transmisii hidraulice [119].

1.2 Descrierea fenomenului de cavitație și eroziunea cavitațională

Acad. I. Anton în [3] afirmă că „fenomenul de cavitație este un proces dinamic de formare, dezvoltare și surpare a unor bule sau cavități umplute cu vapori și gaze, în masa unui lichid”; bulele cavitaționale se produc datorită diferenței de presiune dintre exteriorul și interiorul bulei [51], diferență care este dată de relația 1.1 [24]:

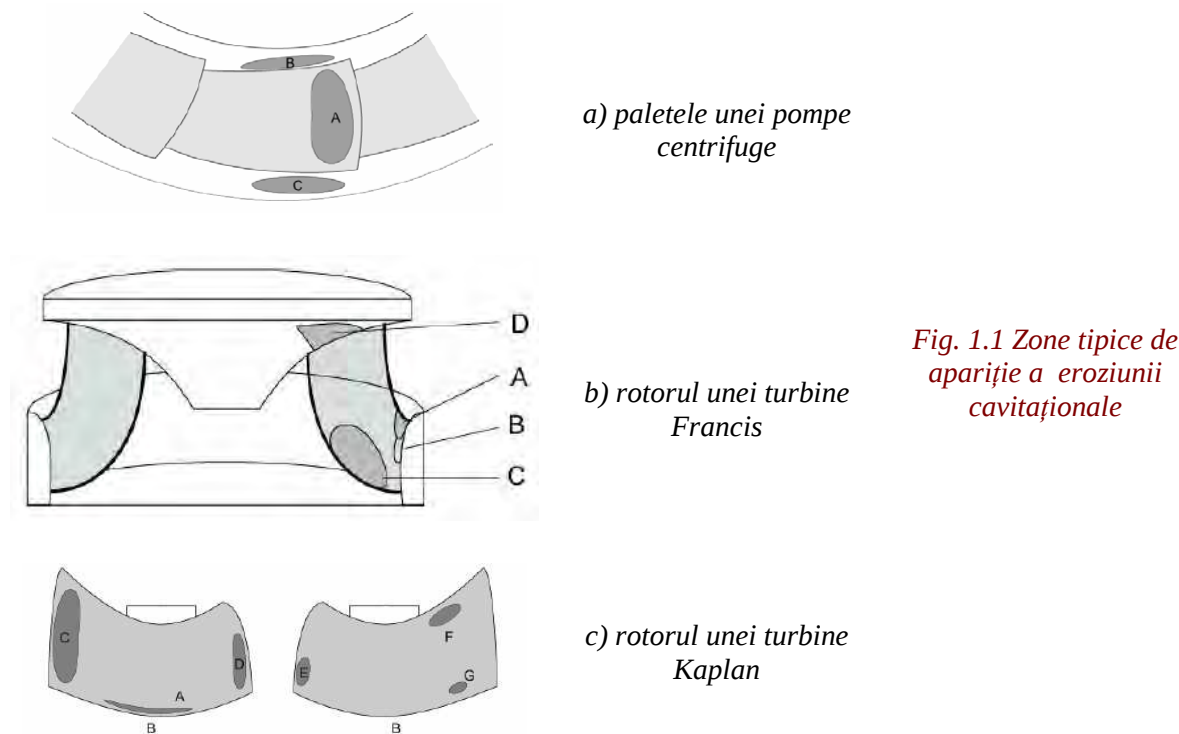
$$\Delta p = p - p_0 \quad (1.1)$$

unde p este presiunea din exteriorul bulei, iar p_0 este presiunea din interiorul bulei.

Prof. Gh. Băran în [7] precizează că „în procesul de implozie are loc un ansamblu de fenomene simultane de natură mecanică, chimică, electrică, termică, ș.a., care conduc la distrugerea suprafețelor udate, distrugeri denumite distrugeri sau eroziuni cavitaționale”.

Investigații și cercetări asupra turbinele hidraulice care funcționează în așa-numita cavitație industrială admisibilă, dar care au fost afectate de distrugeri cavitaționale, au fost efectuate de mai mulți autori [5], [6], [11], [52], [90], [92], [111].

Autorul articolului [5], prezintă, conform **figurii 1.1**, zone tipice unde se produc eroziuni cavitaționale în pompele centrifuge, rotoarele de turbină Francis și rotoarele de turbină Kaplan.



În **figura 1.2** se prezintă imagini ale unor rotoare de turbine hidraulice, distruse prin cavitație [27], [30], [127].



Fig. 1.2 Exemple de rotoare distruse prin cavitație

Producerea experimentală a cavitației se poate face printr-un tub Venturi [41], printr-un tub rotitor sau strangularea unei conducte [24]. Simularea fenomenului de cavitație precum și studiul eroziunii cavitaționale a materialelor metalice se poate face prin instalații specializate de laborator [3], [7], [11]:

- o tunele hidrodinamice cu cameră de lucru strangulată;
- o aparate cu disc rotitor imersat în lichid;
- o aparate vibratorii.

Cercetări de eroziune cavitațională pe materiale utilizate în mediul lichid, s-au realizat prin intermediul acestor instalații, după cum rezultă din literatura de specialitate [9], [13], [14], [16], [26], [36], [38], [42], [45], [47], [48], [49], [50], [53], [55], [56], [57], [58], [62], [66], [71], [72], [93], [100], [103], [115].

În prezent, s-a ajuns la concluzia că nu există nici un material care să reziste fenomenului de cavitație și implicit eroziunii cavitaționale, materialele cele mai recomandate pentru rotoarele de turbine hidraulice fiind oțelurile inoxidabile [12], [19], [22], [70], [97].

Chiar și oțelurile inoxidabile sunt distruse prin cavitație, însă pentru creșterea rezistenței la eroziune s-au aplicat diverse soluții:

- o tratamente termice de îmbunătățire [22], [43], [94], [95], [98], [99], [101], [107];
- o îmbunătățirea proprietăților mecanice ale materialelor prin tratament criogenic [8];
- o proiectare de nervuri anticavitaționale [28], [29];
- o depuneri de straturi speciale prin pulverizare, material de adaos sau suduri [27], [30], [31], [120];
- o reproiectare geometrie rotor [111].

Reparația zonelor afectate de cavitație se face în situ prin sudură; o metodă actuală este și scanarea 3D a suprafeței afectate și înlocuirea golului de material cu cel materializat prin tehnica Rapid Prototyping [34, 83]; utilizare, testare și a materialelor nemetalice privind rezistența acestora la eroziune cavitațională [65, 117].

1.3 Standuri de cercetare experimentală a eroziunii cavitaționale

Cele mai multe cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale, au fost făcute pe aparate vibratorii magnetostrictive și piezoelectrice prin metoda directă de cavitație [1], [20], [30], [46], [96].

Majoritatea aparatelor vibratorii magnetostrictive și piezoelectrice folosite [11], utilizează un generator de ultrasunete, elementele principale care le compun fiind următoarele: traductor, transformator mecanic sau acustic, sonotrodă sau concentrator acustic și proba de lucru sau epruveta propriu-zisă; pentru simularea fenomenului de cavitație și cuantificarea eroziunii cavitaționale pe diferite materiale fiind folosite două metode: directă și indirectă [123].

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

În figurile 1.3 și 1.4 se prezintă un exemplu de concentrator acustic (sonotrode cilindrice + exponențiale [2]) care se folosește în componența unui aparat vibrator din dotarea Universității „Politehnica” din Timișoara [11] pentru metoda directă de cavitație.



Fig. 1.3
Concentrator acustic

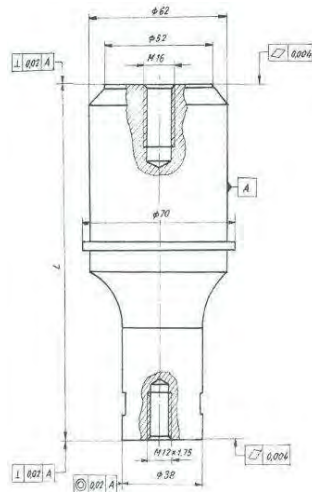


Fig. 1.4 Dimensiuni
concentrator acustic

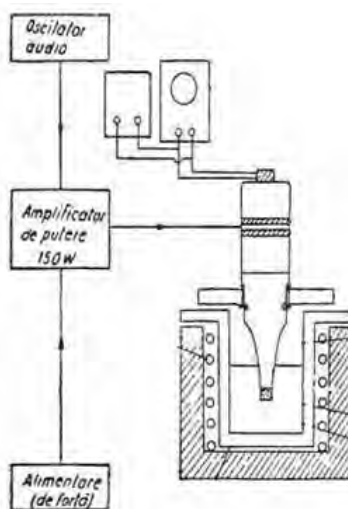
Parametrii funcționali principali caracteristici aparatelor vibratoare sunt [124]:

- o frecvența de rezonanță, cu valoarea uzuală $f = 20 \text{ kHz}$;
- o amplitudinea vibrațiilor, cu valoarea uzuală $A = 50 \mu\text{m}$.

În figura 1.5 se prezintă 3 tipuri de aparate vibratorii: aparatul de la Universitatea din Michigan figura 1.5 b) [3], respectiv aparatele de la Universitatea Politehnica din Timișoara figura 1.5 a, c) [20].



a) cu tub de nichel



b) cu traductor piezoelectric



c) cu cristale piezoceramice

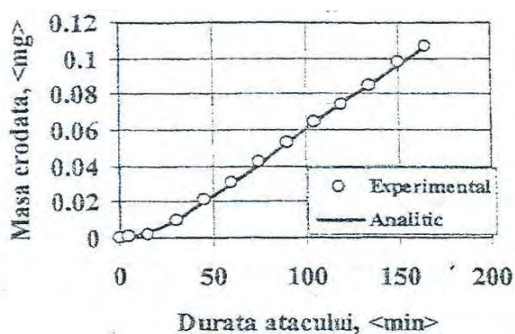
Fig. 1.5 Tipuri de aparate vibratorii

1.4 Rezultate obținute în laboratoare de profil

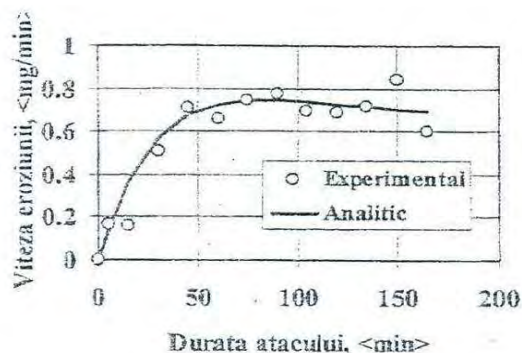
Conform standardelor [123], [124] se folosesc următoarele curbe funcție de timp caracteristice procesului de eroziune cavitațională:

- o curba pierderii de material, exprimată în masă erodată (mg/g) și volum erodat (mm^3);
- o curba vitezei de eroziune cavitațională, exprimată în (mg/min) și (mm^3/min);
- o curba adâncimii medie de pătrundere (MDP exprimată în μm) și viteza adâncimii medie de pătrundere (MDPR exprimată în $\mu\text{m}/\text{min}$).

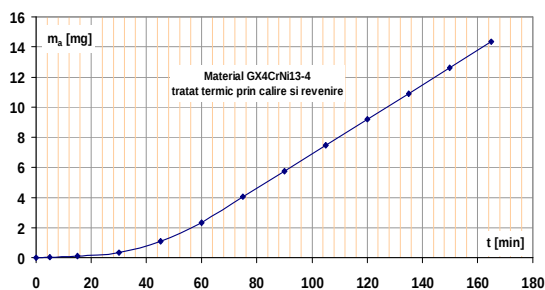
Exemple de reprezentare a curbelor caracteristice procesului de eroziune cavitațională, sunt prezentate în figura 1.6 [11], [93], [17], mărimile fiind exprimate prin relațiile 1.2 și 1.3.



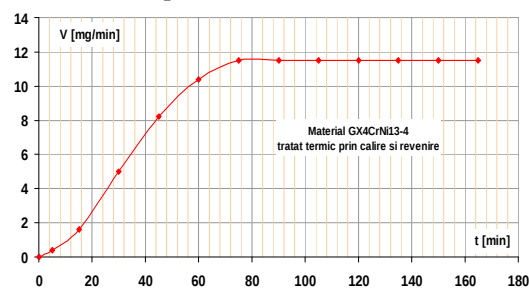
a) curba pierderii de material pentru OL 370-3k



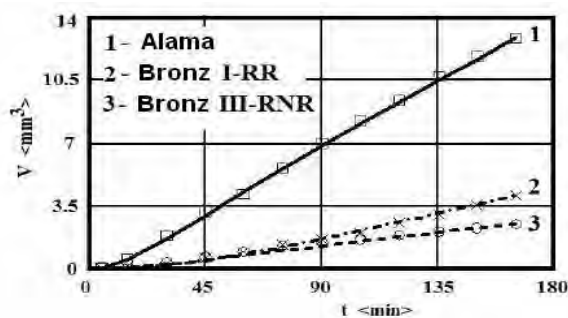
b) curba vitezei de eroziune cavitațională pentru OL 370-3k



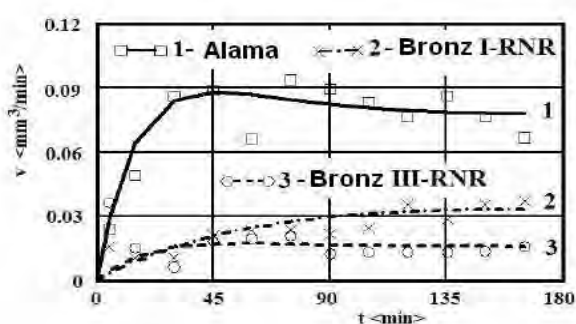
c) curba pierderii masice pentru GX4CrNi13-4



d) curba vitezei de eroziune cavitațională pentru GX4CrNi13-4



e) curbele pierderii volumice pentru alamă și bronz



f) curbele vitezei de eroziune cavitațională pentru alamă și bronz

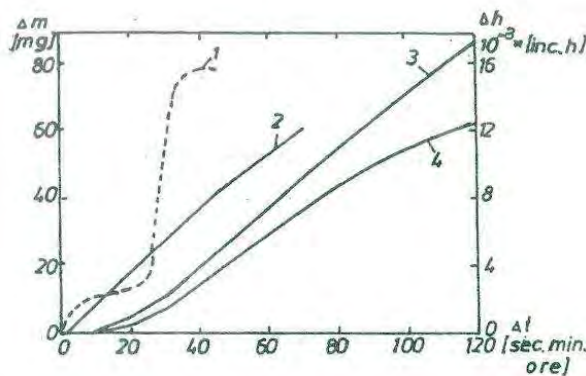
Fig. 1.6 Tipuri de curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională obținute pe aparat vibrator prin metoda directă

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

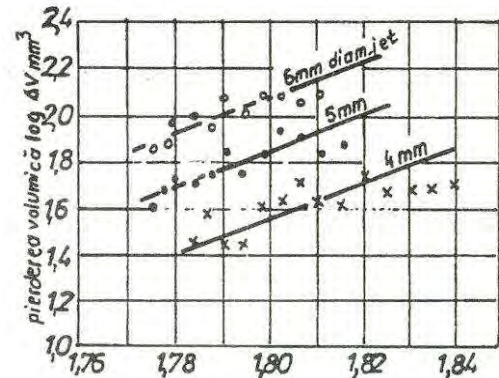
$$V = \sum \Delta V \quad (1.2)$$

$$v = \Delta V / \Delta t \quad (1.3)$$

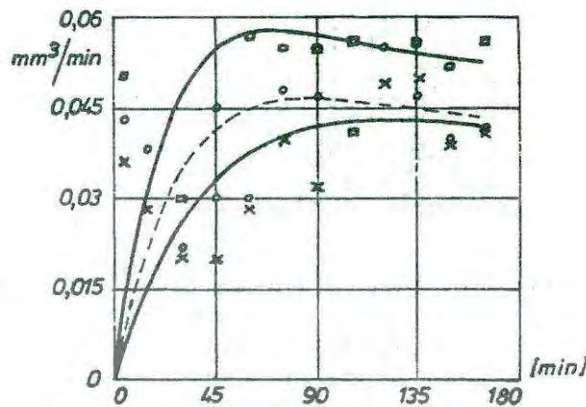
Alte tipuri de grafice caracteristice curbelor de eroziune cavitațională rezultate din măsurători efectuate pe instalații cu ultrasunete și disc rotitor sunt prezentate în **figura 1.7** [7], mărimile fiind exprimate prin **relațiile 1.4** (pentru durata de 0-30 minute) și **1.5** (pentru durata de 30-165 minute).



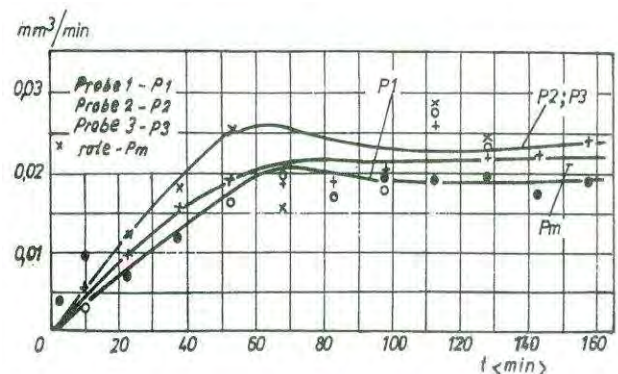
a) curbe ale pierderii masice



b) curbe ale pierderii volumetrice prin jet, în funcție de viteza de impact și diametrul jetului



c) curbele vitezei de eroziune cavitațională la bronzuri



d) curbele vitezei de eroziune cavitațională la oțelurile MoCrNi 13

Fig. 1.7 Curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională pe instalații cu ultrasunete și disc rotitor

$$v = a_1 t^2 + a_2 t \quad (1.4)$$

$$v = b_1 t^2 + b_2 t + b_3 \quad (1.5)$$

unde coeficienții a_i și b_i se obțin prin prelucrarea datelor experimentale.

În **tabelul 1.1** sunt consemnate rezultate obținute de diverși autori pe aparate vibratorii prin metoda directă de cavitație, conform următoarelor referințe bibliografice: materialele de la poziția 1-4 de [15], [16], [18], [54], materialele de la poziția 5 și 6 de [19], materialele de la poziția 7-12 de [98], [99], materialele de la poziția 13-15 de [97], materialul de la poziția 16 de [124], materialele de la poziția 17 și 18 de [33], materialele de la poziția 19-21 de [45], materialele de la poziția 22-23

de [37], materialele de la poziția 24 și 25 de [12], materialele de la poziția 26-27 de [42], [63], materialele de la poziția 28-30 de [10] și materialele de la poziția 31 și 32 de [59].

Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă

Tabel 1.1

Nr. crt.	Material	Simbolizare material	Timp total t [min]	Masa erodată cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
1	Oțel inoxidabil (cu conținut de Cr-constant și Ni- variabil)	12/10	165	40	Aparat vibrator T2, cu următorii parametrii: amplitudine pp 50 μm, frecvență 20000 Hz, diametrul probei de 15.8 mm
2		12/2		~28	
3		12/0		~15	
4		12/6		~6.5	
5	Oțel inoxidabil	G-X5 CrNi13.4	120	20	Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel, cu următorii parametrii: amplitudine pp 47 μm, frecvență 7000 ± 3Hz, apă potabilă, temperatura apei 20±1°C, diametrul probei de 14 mm, înălțime de 12 mm și filet interior M12x1
6		OH12NDL		~53	
7	Oțel inoxidabil	GX5CrNi19-10 Soluție tratament termic	165	13.2	Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, cu următorii parametrii: amplitudine pp 94 μm, frecvență 7000 ± 3Hz, apă distilată, temperatura apei 20±1°C, diametrul probei de 14 mm, filet interior
8	Oțel de îmbunătățire	40Cr10		45	
9	Oțel inoxidabil	GX4CrNi13-4		17.63	
10		GX5CrNiMo 13-6-1		32	
11		T07CuMoNiCr 165-Nb		14.5	
12		T09CuMoMnNiCr 185-Ti		15	
13	Oțel inoxidabil	GX5CrNi19-10 Soluție de tratament	165	13.5	Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, cu următorii parametrii: amplitudine pp 94 μm, frecvență 7000 ± 3Hz, apă distilată, temperatura apei 20±1°C, diametrul probei de 14 mm, filet interior
14		GX5CrNi19-10 Soluție de tratament sudare		6.7	
15		GX5CrNi19-10 Tratat termic prin punere în soluție și niturare		12.99	
16	Aliaj pe bază de nichel	Nichel 200	240	~175	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 50 μm, frecvență 20 ± 0.5 kHz, apă deionizată, diametrul probei de 15.9 mm cu înălțimea de 14-20 mm, filet exterior M10x1 sau M10x1.25
17	Oțel inoxidabil	X4CrNi13-4 cu micro pulberi	75	~18	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii:

Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă

Tabel 1.1

Nr. crt.	Material	Simbolizare material	Timp total t [min]	Masa erodată cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
18		X4CrNi13-4 cu nano pulberi		~13	amplitudine pp 50 μ m, frecvență 20 kHz, apă distilată, diametrul probei de 16 mm cu înălțimea de 15 mm
19	Oțel inoxidabil	X4CrNi13-4, cu 7 mm adaos prin sudură a unui oțel inoxidabil austenitic	120	~74	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 50 μ m, frecvență 20 kHz, apă distilată, diametrul probei de 16 mm cu înălțimea de 15 mm
20		X4CrNi13-4, cu 10 mm adaos prin sudură a unui oțel inoxidabil austenitic		~76	
21		X4CrNi13-4, cu 15 mm adaos prin sudură a unui oțel inoxidabil austenitic		~56	
22	Aliaj de titan	Ti-6Al-4V, cu 90.5 % Ti	165	60	Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, cu următorii parametrii: amplitudine pp 94 μ m, frecvență 7000 ± 3 Hz, apă distilată, Temperatura apei $20 \pm 1^\circ\text{C}$, diametrul probei de 14 mm, filet interior și masa de 7g
23	Oțel de îmbunătățire	41Cr4		114	
24	Oțel inoxidabil	X12CrMoS17	165	58	Aparat vibrator magnetostrictiv cu tub de nichel T1, cu următorii parametrii: amplitudine pp 94 μ m, frecvență 7000 ± 3 Hz, apă distilată, temperatura apei $21 \pm 1^\circ\text{C}$, diametrul probei de 14 mm, înălțime de 12 mm, filet interior M12x1
25		X22CrNi17		46	
26	Oțel inoxidabil	CrMnN tratat termic	240	25	Aparat vibrator magnetostrictiv, cu următorii parametrii: amplitudine pp 42 μ m, frecvență 19.7 kHz, apă potabilă, temperatura ambiantă, diametrul probei de 19.5 mm, înălțime de 15 mm, filet interior M10x1
27		CrNiMo tratat termic		50	
28	Aluminiu	Al 99.8	180	111.65	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 45 μ m, frecvență 19.5 kHz, temperatura apei 22°C , diametrul probei de 15.88 mm
29	Cupru	Cu 90	180	293.9	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 45 μ m, frecvență 18.1 kHz, temperatura apei 22°C , diametrul probei de 15.88 mm
30	Aluminiu	Al 99.8	20	36.3	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii:

Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă

Tabel 1.1

Nr. crt.	Material	Simbolizare material	Timp total t [min]	Masa erodată cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
					amplitudine pp 50 μ m, frecvență 20 kHz, temperatura apei 22°C, diametrul probei de 15.88 mm
31	Aliaj de cupru	Cu-Mn-Al	150	32	Aparat vibrator magnetostrictiv, cu următorii parametrii: amplitudine pp 60 μ m, frecvență 20 kHz, apă potabilă, temperatura a fost de 24 $\pm$ 1°C, lichidul de lucru a fost apa cu 3.5 % NaCl
32		Cu-Mn-Al cu sudură		7.5	

În figura 1.8 se prezintă sub formă grafică comparația datelor din tabelul 1.1.

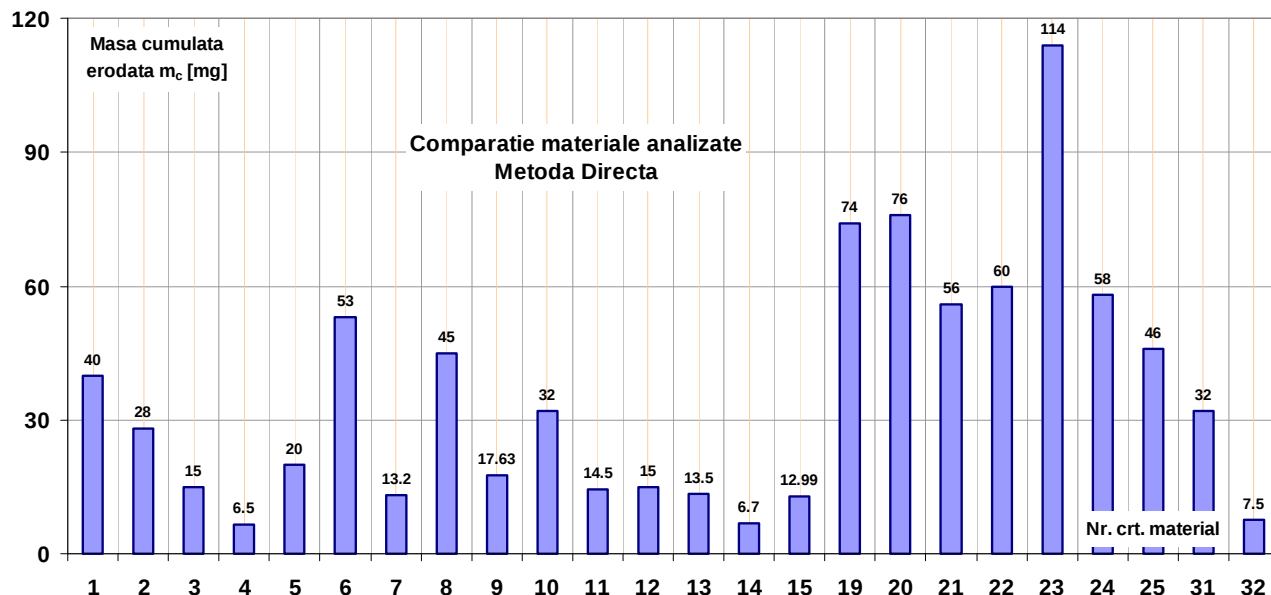


Fig. 1.8 Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda directă

Rezultă că cele mai rezistente materiale la eroziune cavitațională sunt: oțelul inoxidabil cu conținut de Cr-12% și Ni-6% - care a pierdut 6,5 mg la 165 minute, urmat de oțelul inoxidabil GX5CrNi19-10 cu soluție de tratament prin sudare - care a pierdut 6,7 mg la 165 minute și de un aliaj de cupru Cu-Mn-Al cu sudură - care a pierdut 7,5 mg la 150 minute, datele fiind obținute pe instalații diferite și în condiții de lucru diferite.

În tabelul 1.2 sunt consemnate rezultatele obținute de diverși autori pe aparate vibratorii prin metoda indirectă de cavitație, conform următoarelor referințe bibliografice: materialele de la poziția 1 și 2 de [121], materialele de la poziția 3 și 4 de [114], materialele de la poziția 5-8 de [89], materialele de la poziția 9-11 de [60], materialele de la poziția 12-17 de [122].

Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda indirectă

Tabel 1.2

Nr. crt.	Material	Simbolizare material	Timp cumulat t [min]	Masa erodată cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
1	Oțel inoxidabil	X5CrNiMo17-12-2	1200	104	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 50 μm, frecvență 20 kHz, apă distilată, distanța față de probă a fost de 1.5 mm, la temperatura de 23°C
2		Oțel inox ca material de bază cu peliculă subțire de NiTi		12	
3	Bronz	Mn-Ni-Al MAB cu 75.6% Cu	720	42	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 100 μm, frecvență 20 kHz, apă deionizată, distanța față de probă a fost de 0.5 mm, la temperatura de 23°C
4		Mn-Ni-Al MAB suprafață tratată (topită) cu un laserul Nd:YAG		6	
5	Material nemetalic	Macor sau sticlă ceramică	1200	180	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 50 μm, frecvență 20 kHz, apă distilată, distanța față de probă a fost de 1 mm, diametrul probei de 15.9 mm cu înălțimea de 4-10 mm
6		Alumină Al ₂ O ₃		100	
7		Nitrura de siliciu Si ₃ N ₄		15	
8		Dioxid de zirconiu ZrO ₂		33	
9	Oțel inoxidabil	X9CrNiSiNCe21-11-2	540	9.5	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: amplitudine pp 85 μm, frecvență 20 kHz, apă distilată, distanța față de probă a fost de 0.5 mm, la temperatura de 24.85°C, diametrul probei de 16 mm cu înălțimea de 3 mm
10	Material nemetalic	Aliajul Ni-Mn-Ga aliat		5.5	
11	Aliaj de aluminiu	Al-6802 (AlSi1MgMn)	240	58	Aparat vibrator cu generator de ultrasunete, cu următorii parametrii: temperatura de 30°C, apă de mare
12	Bronz	C92200 Cu-6Sn-2Pb-4Zn	600	110	
13	Oțel inoxidabil	S31603 (tratată) Fe-18Cr-14Ni-3Mo-2Mn		25	
14		J94651 Fe-24Ni-21Cr -6Mo		15	
15		S32654 (tratată) Fe-22Ni-24Cr -7Mo-3Mn		5	
16		S21000 (tratată) Fe-23Cr -18Ni-5.5Mo-4Mn-0.4N		2	
17		R56400 (tratată) Ti-6Al-4V		10	

În figura 1.9 se prezintă sub formă grafică comparația datelor din tabelul 1.2.

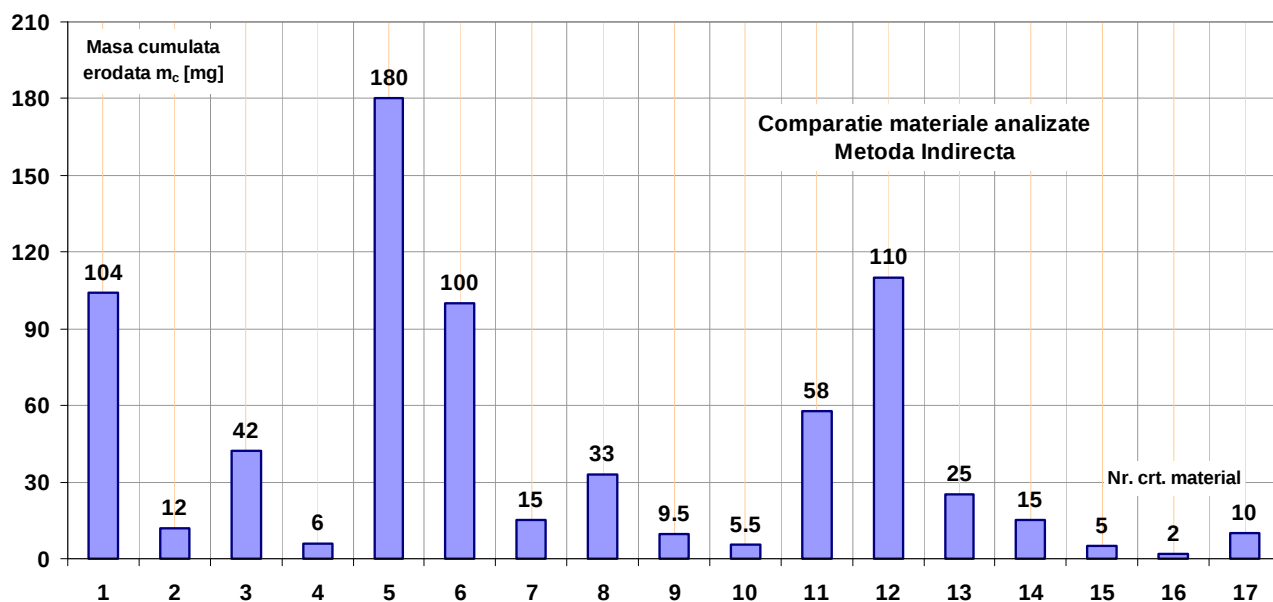


Fig. 1.9 Comparație materiale măsurate pe aparat vibrator prin metoda indirectă

Rezultă că cele mai rezistente materiale la eroziune cavitațională sunt: oțelul inoxidabil Fe-23Cr -18Ni-5.5Mo-4Mn-0.4N tratat tratament - care a pierdut 2 mg la 600 minute, urmat de oțelul inoxidabil Fe-22Ni-24Cr -7Mo-3Mn tratat tratament - care a pierdut 5 mg la 600 minute și de un aliaj nemetalic Ni-Mn-Ga aliat - care a pierdut 5,5 mg la 540 minute, datele fiind obținute pe instalații diferite și în condiții de lucru diferite.

În tabelul 1.3 se vor consemna rezultatele obținute de diverși autori pe instalații cu disc rotitor, conform următoarelor referințe bibliografice: materialele de la poziția 1 și 2 de [42], materialul de la poziția 3 de [9], [10], materialele de la poziția 4-8 de [113], materialele de la poziția 9 de [61].

Comparație materiale măsurate pe aparat cu disc rotitor

Tabel 1.3

Nr. crt.	Clasificare categorie	Simbolizare material	Timp cumulat t [min]	Masa erodata cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
1	Oțel inoxidabil	CrMnN tratat termic	360	15	Disc rotitor
2		CrNiMo tratat termic		2	
3	Aluminiu	Al	300	25	Disc rotitor, 2200rpm, diametru probă 24 mm
4	Oțel inoxidabil	JIS SCS13 GX5CrNi19-10	100	23	Disc rotitor, apă deionizată conform
5		SUS 316L X2CrNiMo17-12-2		22	

Comparație materiale măsurate pe aparat cu disc rotitor

Tabel 1.3

Nr. crt.	Clasificare categorie	Simbolizare material	Timp cumulat t [min]	Masa erodată cumulată mc [mg]	Caracteristici instalație de laborator
6	Oțel carbon	SUS 304 X5CrNi18-10		15	standardului ASTM G-134-95
7		JIS S45C C45		10	
8		JIS FC 250 EN-GJL-250		52	
9	Aliaj de titan	Ti-24Al-15Nb-1Mo	300	0.4	Disc rotitor, 2960rpm, cu viteză de 45 m/s a probei

În figura 1.10 se prezintă sub formă grafică comparația datelor din tabelul 1.3.

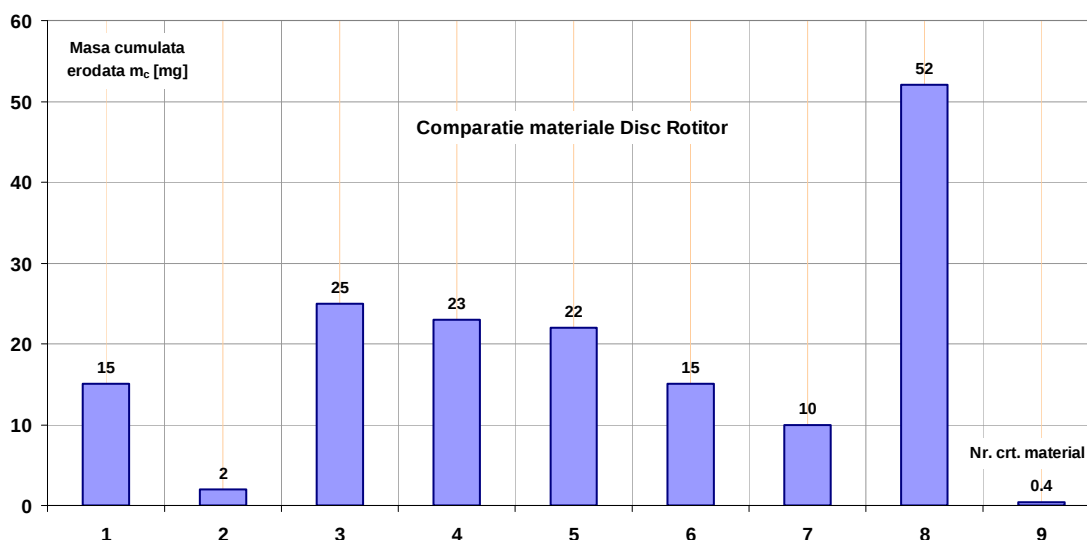


Fig. 1.10 Comparație materiale măsurate pe aparate cu disc rotitor

Rezultă că cele mai rezistente materiale la eroziune cavitațională sunt: aliajul de titan Ti-24Al-15Nb-1Mo - care a pierdut doar 0,4 mg la 300 minute, urmat de oțelul inoxidabil CrNiMo tratat termic - care a pierdut 2 mg la 360 minute și de oțelul inoxidabil CrMnN tratat termic - care a pierdut 15 mg la 360 minute, datele fiind obținute în condiții de lucru diferite.

În țara noastră, principalele centru de cercetări în domeniul cavitației și eroziunii cavitaționale sunt la Universitatea “Politehnica” din Timișoara prin *Laboratorul de Mașini Hidraulice* (I. Bordeasu, I. Pădureanu, O. Oancă, ș.a.), la Universitatea “Politehnica” din București (Gh. Băran, Șt. Zarea, M. Cazacu, ș.a.), la Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați (O. Bologa, ș.a.) și la Universitatea “Eftimie Murgu” din Reșița prin *Centrul de Cercetări în Hidraulică Automatizări și Procese Termice CCHAPT* (V. Câmpian, I. Ion, D. Nedelcu, M. Nedeloni, V. Cojocaru, ș.a.).

Cap. 2 OBIECTIVELE TEZEI DE DOCTORAT

Principalele obiective propuse spre a fi realizate în prezenta teză de doctorat sunt următoarele:

- ✓ realizarea unei sinteze bibliografice care să urmărească modul de manifestare a eroziunii prin cavitație la turbinele hidraulice, inventarierea standurilor de cercetare a materialelor privind rezistența la eroziune cavitațională, parcurgerea rezultatelor actuale și compararea materialelor cercetate până în prezent privind rezistența acestora la eroziune cavitațională, studiul standardelor în vigoare utilizate în cercetare privind procedeele de eroziune cavitațională, metodologia de experimentare, curbe și parametrii caracteristici procesului de eroziune cavitațională;
- ✓ selecția mai multor tipuri de materiale spre a fi cercetate din punct de vedere cavitațional, execuția epruvetelor;
- ✓ analiza comportării la oboseală a sonotrodelor utilizând modulul SolidWorks Simulation;
- ✓ calibrarea teoretică prin programul SolidWorks a unor sonotrode destinate încercărilor de eroziune cavitațională a epruvetelor prin metoda directă și indirectă;
- ✓ calibrarea experimentală a unor sonotrode destinate încercărilor de eroziune cavitațională a epruvetelor prin metoda directă și indirectă;
- ✓ cercetări derulate pentru compararea rezultatelor obținute prin metoda directă și indirectă;
- ✓ cercetări derulate pentru compararea rezultatelor obținute prin metoda indirectă pentru reproducerea curbelor caracteristice de cavitație;
- ✓ cercetări derulate pentru compararea rezultatelor obținute prin metoda indirectă pentru obținerea caracteristicilor cavitaționale pentru toate cele patru stadii cavitaționale: incubație, accelerare, staționare și decelerare;
- ✓ cercetări derulate pentru compararea rezultatelor obținute prin metoda indirectă pentru testarea rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate cât mai extinse ale atacului cavitațional;

Cercetările vor fi efectuate pe ștandul de eroziune cavitațională aflat în dotarea „Centrului de Cercetări în Hidraulică, Automatizări și Procese Termice” (CCHAPT) din cadrul Universității „Eftimie Murgu” din Reșița.

Cap. 3 ȘTANDUL UTILIZAT LA ÎNCERCĂRI DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ A MATERIALELOR

3.1 Generalități

În acest capitol se prezintă ștandul utilizat la eroziunea cavitațională a materialelor, standardul G 32-10 utilizat în cercetarea experimentală, procedee de eroziune cavitațională, procedura de experimentare, precum și curbe și parametrii caracteristici procesului. Ștandul de eroziune cavitațională se află în dotarea „Centrului de Cercetări în Hidraulică, Automatizări și Procese Termice” (CCHAPT) [127] din cadrul Universității „Eftimie Murgu” din Reșița.

3.2 Descriere ștand de eroziune cavitațională

Ștandul este format din următoarele componente, **figura 3.1**:

- o generatorul de ultrasunete DG-2000-2 [126], destinat pentru testarea eroziunii cavitaționale în laborator și care permite setarea, afișarea și monitorizarea tuturor parametrilor de pe panoul frontal; protecția generatorului blochează funcționarea acestuia dacă frecvența ansamblului traductor-buster-sonotrodă-epruvetă nu se încadrează în domeniul 20000 Hz $\pm$ 500 Hz;
- o un traductor piezoelectric-acustic [2], [40], [110] susținut prin intermediul unui suport; generatorul de ultrasunete este conectat la traductor printr-un cablu 6HF;
- o un transformator mecanic (*buster*), care are rolul de a amplifica valoarea amplitudinii în sonotrodă respectiv în epruvetă, de a păstra pierderile la minim în punctul nodal, precum și de a asigura rigiditatea mecanică a ansamblului;
- o sonotroda propriu-zisă;
- o epruveta de încercat, creată din diferite materiale pentru care interesează comportarea la eroziune cavitațională;
- o vasul de lichid cu apă distilată, în interiorul căruia se găsește o serpentină inclusă într-un circuit alimentat cu apă rece din rețea pentru a menține temperatura constantă a apei pe durata încercărilor;
- o termometru digital pentru măsurarea și verificarea temperaturii pe durata încercărilor;
- o balanța analitică pentru măsurarea masei epruvetei;
- o echipamentul pentru măsurarea frecvenței proprii (hardware și software), care se cuplează la laptop printr-o conexiune USB 2.0.

3.2.1 Generatorul de ultrasunete DG-2000

Generatorul de ultrasunete DG-2000 este produs în două versiuni de către firma TELSONIC. Modelul DG-2000-1 este destinat pentru utilizare în producția de sisteme cu telecomandă și pe panoul din față, conține doar elementele de afișare pentru frecvența și puterea de ieșire. Totuși, toate funcțiile sunt accesibile prin conexiunile de control plasate în partea din spate. Modelul DG-2000-2, **figura 3.2**, este destinat pentru operații de laborator și permite setarea și afișarea tuturor parametrilor pe panoul din față.



Fig. 3.1 Ștand pentru încercarea eroziunii cavitaționale



Fig. 3.2 Generatorul de ultrasunete DG-2000-2

Specificațiile tehnice ale generatorului [126] sunt:

- Puterea maximă 2000 W / 20 kHz;
- Comutarea reglării în amplitudine sau ieșire constantă;
- Domeniu de reglare a puterii 400 ÷ 2000 W;
- Domeniu de reglare a amplitudinii 50 ÷ 100 %;
- Contor de supraîncărcare programabil cu deconectare;
- Cronometru integrat 0 ÷ 9999 h (TIMER) OMRON H5CR;
- PULSER integrat între 0 ÷ 9999 h;
- Ecran LCD cu afișaj de 3½ pentru afișarea următoarelor mărimi: valoarea puterii nominale, valoarea curentă a puterii, valoarea deconectării la suprasarcină, valoarea nominală a amplitudinii, valoarea curentă a amplitudinii.
- Deconectarea la supraîncărcare de 2000 W;
- Circuit de monitorizare a răcirii traductorului;
- Control la distanță;
- Dimensiuni 530 x 225 x 460 mm;
- Masa totală 25 kg.

În partea din față generatorul are 4 panouri de operare pentru un control complet și de monitorizare a sistemului, cu următoarele funcții:

- o Comutator de pornire-oprire pentru TIMER și PULSER;
- o Afișare stare curentă și erori;
- o Selector pentru modul de operare cu ecran al valorilor nominale și al valorilor curente;
- o Afișare de tip analog a frecvenței și puterii cu posibilitatea de ajustare manuală a frecvenței.

Panoul 1 conține comutatorul principal și cronometrul OMRON. Elementele care compun acest panou sunt:

- o comutatorul ON/OFF pentru pornirea/oprirea generatorului;
- o cronometrul OMRON destinat specificării referinței de timp pentru ultrasunete;
- o butoanele START/STOP prin care se pornește/oprește cronometrul și implicit generarea ultrasunetelor;
- o butonul CONT, prin intermediul căruia ultrasunetele pot fi comutate pentru operare continuă.

Panoul 2 afișează starea generatorului. Elementele componente ale acestui panou sunt următoarele:

- o LED US-ON: led-ul se aprinde când ultrasunetele sunt pornite și când nici o alarma nu este activată;
- o LED REMOTE: led-ul se aprinde când generatorul este comutat pe interfața 25-pini, iar operațiile de pe panoul din față sunt dezactivate;
- o LED ALARM / FAULT / OUT OF REF: led-ul se aprinde dacă ultrasunetele sunt oprite sau nu este atinsă valoarea nominală de putere; în modul de control la distanță, comutatorul „OPERATION MODE” trebuie să fie setat pe amplitudine;
- o LED TUNING ERR: când numărul de supraîncărcări a frecvenței de scanare a fost depășit;
- o LED POWER LIMIT: limita puterii a fost depășită; resetarea se poate realiza prin US OFF/ON;
- o LED FLOW CONTROL: Monitorizarea curentă a fost întreruptă;
- o LED TEMPERATUR: Temperatura internă de 60° C a fost depășită.

Panoul 3 permite monitorizarea ecranului. Elementele componente ale acestui panou sunt următoarele:

- o comutator OPERATION MODE, prin intermediul căruia se poate selecta funcționarea cu putere constantă sau cu amplitudine constantă a generatorului;
- o potențiometrul SETUP cu 10 poziții pentru reglarea puterii, valoarea nominală fiind preselectabilă între $400 \div 2000$ W și pentru reglarea amplitudini constante, valoarea nominală a amplitudinii fiind preselectabilă între $50 \div 100\%$;
- o comutatorul DISPLAY SELECTOR pentru selecția unei opțiuni dintre cele disponibile; sistemul se poate regla singur la putere constantă dacă încărcarea este destul de mare; puterea produsă a generatorului poate fi selectată pe ecran utilizând opțiunea POWER; prin selecția opțiunii AMPLITUDE, se impune afișarea amplitudinii actuale în %; în scopul evitării supraîncărcării generatorului și a traductorului, pe durata reglării amplitudinii constante la valori ridicate, este activ un senzor de monitorizare a puterii, senzor care se oprește atunci când nivelul presetat este atins; puterea limită este setată standard la 2000 W; nivelul de deconectare selectat este afișat când comutatorul DISPLAY SELECTOR este setat pe opțiunea POWER LIM.
- o ecran LCD.

Panoul 4 este panoul de frecvență, reglare și încărcare. Elementele componente sunt:

- o led-ul RE-TUNE, indică dacă generatorul are nevoie de reglare a frecvenței;
- o butonul TUNING permite ajustarea manuală a frecvenței;
- o led-ul LOCKED indică o frecvență stabilă;
- o butonul TEST permite testarea frecvenței;
- o led-ul LED MANUAL, indică setarea butonului MODE pe MANUAL sau AUTOMAT;
- o comutatorul MODE permite setarea frecvenței reglate automat sau manual; acest comutator este disponibil și ca potențiometru;
- o led-ul LED AUTO, indică dacă comutatorul MODE este setat pe MANUAL sau pe AUTOMATIC;
- o bara de frecvență arată dacă frecvența nominală este în domeniul valorii de $\pm 0,5$ kHz;
- o led-ul LED OVERLOAD; generatorul este dotat cu circuite de protecție, prin intermediul cărora acesta este în întregime securizat contra scurtcircuitului și a operației de neîncărcare; în cazul depășirii puterii de ieșire maxime posibile, se va comuta singur pe oprit și va indica starea de supraîncărcare la led-ul de supraîncărcare (OVERLOAD LED);
- o bara de încărcare de pe generator corespunde cu ieșirea ultrasunetelor specificată în %;
- o led-ul de putere (LED POWER), indică faptul că generatorul funcționează.

3.2.2 Traductorul și transformatorul mecanic

Traductorul este de tip piezoelectric cu o eficiență extrem de ridicată, permițând funcționarea fără o unitate de răcire externă. În timpul funcționării, temperatura traductorului nu trebuie să depășească 90°C. În funcție de tipul traductorului este disponibilă amplitudinea între 8,5 ÷ 14 μm vârf la vârf. Această amplitudine fiind insuficientă trebuie mărită utilizând un rapel (transformator mecanic sau buster) în mod normal cu o rație de transformare de 1:2,25. Rapelul este de asemenea folosit pentru a ține pierderile într-un punct nodal la minim și să se obțină un ansamblu rigid din punct de vedere mecanic.

Specificațiile traductorului SE 50/50-4-20 kHz sunt:

- o amplitudine la 25⁰ C: 8.5 uss ±5% la 100%;
- o puterea maximă: 2000 W efectiv;
- o intensitate curent: 2 A efectiv;
- o voltajul maxim: 1700 V efectiv;
- o conexiune prin filet: UNF 1/2" – 20.

3.2.3 Sonotroda

Sonotroda are rolul de purtător al epruvetei și de a conduce semnalul astfel încât să se atingă o amplitudine de 50 μm vârf la vârf (pp). Traductorul, busterul, sonotroda și epruveta sunt fiecare individual acordate la frecvența de 20 kHz și sunt asamblate împreună pentru a putea constitui o unitate de rezonanță completă care să opereze la frecvența proprie de rezonanță.

3.2.4 Epruveta

Epruvetele pentru testare, [figura 3.3](#), sunt executate din materiale diferite, rezultând diferite greutatea. Greutatea epruvetei este un factor important ce determină frecvența la calculul și proiectarea sonotrodei. Toleranțele greutății epruvetelor trebuie să se încadreze în domeniul 13 ÷ 16 grame pentru epruvete din oțel respectiv 2,7 ÷ 6 grame pentru epruvete din aluminiu. De aceea, o epruvetă se poate folosi la mai multe încercări pentru erodarea suprafeței acesteia. Această operație poate fi executată însă numai până când se atinge minimul de greutate al probei pentru sonotroda asociată. De asemenea, amplitudinea este limitată de către greutate și rezistența epruvetei, maximul tolerabil al amplitudinii fiind de 50 μm vârf la vârf pentru epruvete din oțel, respectiv 60 μm vârf la vârf pentru epruvete din aluminiu.

Este foarte important ca suprafețele de contact ale epruvetelor să fie curățate și netede.

3.2.5 Balanța analitică

Balanța analitică se utilizează la măsurarea masei epruvetelor. Deoarece pierderea de masă a acestora este foarte mică, este necesară o balanță care să măsoare la nivel de zecimale. Balanța utilizată pentru măsurare este balanța METTLER TOLEDO XS205DU, **figura 3.4**, care oferă facilități precum: reglare automată (calibrare și linearizare) folosind o greutate internă, aplicații incluse pentru cântărire normală, statistică și determinarea densității, terminal grafic sensibil la atingere.

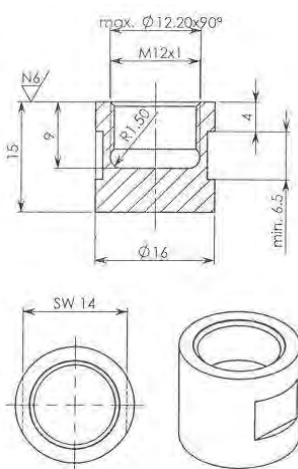


Fig. 3.3 *Desen de execuție epruvetă*



Fig. 3.4 *Balanța analitică METTLER TOLEDO*



Caracteristicile tehnice ale balanței sunt:

- o sarcina maximă 220 g;
- o sarcina maximă (pentru domeniu fin) 81 g;
- o capacitate de citire 0,1 g;
- o capacitate de citire (pentru domeniu fin) 0,01 g;
- o timp de cântărire 4s.

3.2.6 Echipamentul pentru măsurarea frecvenței proprii

Frecvența oscilatorie a probei de test trebuie să fie 20000 ± 500 kHz. Întregul sistem traductor-sonotrodă-epruvetă trebuie să fie conceput pentru rezonanța longitudinală la această frecvență. Cunoașterea frecvențelor proprii ale sonotrodelor sunt importante deoarece excitația electrică se acordează strict cu una dintre aceste frecvențe. Echipamentul utilizat este compus din modulul de achiziție tip USB 6212, producător National Instruments, **figura 3.5**, precum și softul de analiză tip Fastview, **figura 3.6**, producător Digitline. Pe lângă precizia ridicată de măsurare a frecvențelor proprii, este importantă și utilizarea unei metode simple de măsurare.

Metoda de măsurare se bazează pe funcționarea reversibilă a cristalului piezoelectric care stă la baza sonotrodei: sub influența curentului electric are loc o schimbare a dimensiunilor acestuia (deplasarea sonotrodei) iar, reciproc, la aplicarea unor forțe externe, are loc generarea unui semnal electric proporțional cu forța respectivă. Practic, metoda a constat în fixarea sonotrodei testate pe suportul propriu și conectarea la bornele acestuia (bornele destinate alimentării electrice) a unui echipament de achiziție și analiză a semnalelor. Modulul de achiziție USB 6212 are viteza de eșantionare de 400 kS/s și se conectează prin USB la un laptop. Plecând de la teoremele eșantionării, care limitează frecvența maximă a unui semnal la jumătate din frecvența de achiziție și cunoscând faptul că frecvența proprie a sonotrodei este situată în jurul valorii de 20 kHz, s-a ales ca frecvența de eșantionare valoarea de 200 kS/s. Ca urmare, domeniul maxim de frecvență măsurabilă este de 100 kHz. Lungimea bufferului de analiză a fost stabilită la valoarea de 32768 eșantioane fapt ce a condus la un număr de linii spectrale de 16384. Rezultă o rezoluție în frecvență de 6.1 Hz.

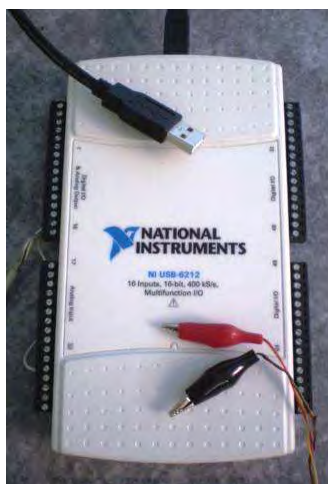


Fig. 3.5 Modulul de achiziție tip USB 6212

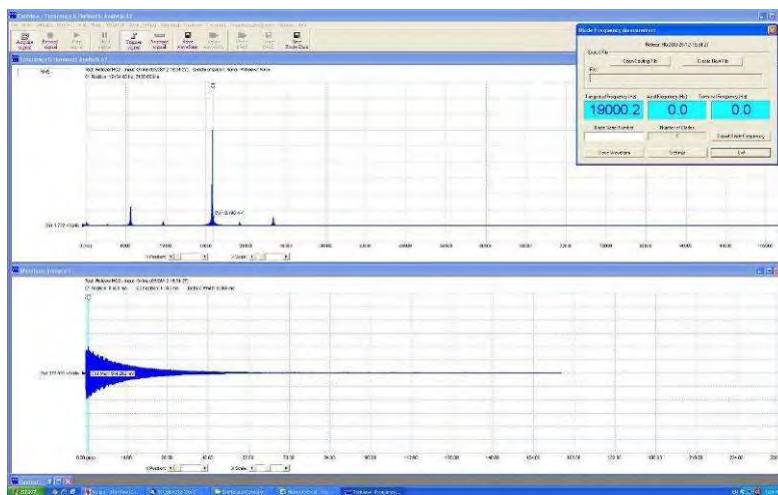


Fig. 3.6 Aplicația Fastview pentru măsurarea frecvenței proprii

Softul de analiză Fastview oferă funcții de achiziție, procesare și analiză de uz general, precum și specifice analizei frecvențelor proprii, exemplificate în [figura 3.7](#), [figura 3.8](#), [figura 3.9](#).

Determinarea experimentală a frecvenței proprii se realizează prin excitarea sonotrodei și a probei printr-un șoc aplicat instantaneu, iar aplicația specializată Fastview afișează frecvența măsurată, analiza de frecvență și armonicile, precum și forma semnalului. Aplicația poate fi setată să afișeze numai frecvențele dintr-un domeniu specificat, setare care poate fi salvată într-un fișier de configurare, împreună cu alți parametri. Butonul „Acquire signal” declanșează procesul de achiziție continuă, iar butonul „Trigger signal” impune vizualizarea numai la momentul aplicării șocului. Corectitudinea achiziției este semnalizată prin forma continuu descrescătoare a formei semnalului, [figura 3.7](#).

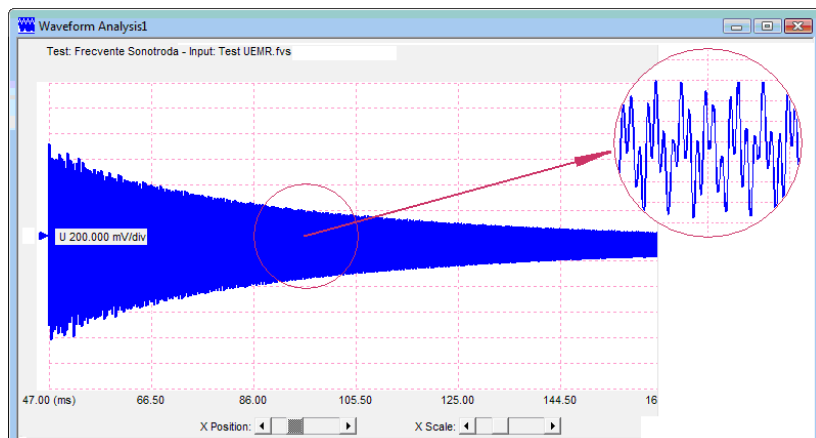


Fig. 3.7 Forma de undă a semnalului furnizat de sonotrodă la aplicarea unui impact

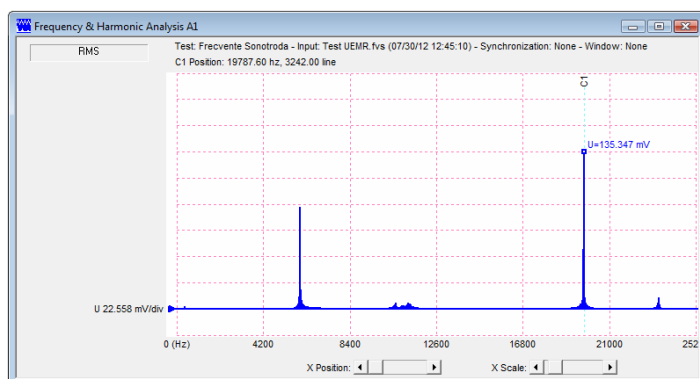


Fig. 3.8 Spectrul de frecvență al semnalului furnizat de sonotrodă la aplicarea unui impact

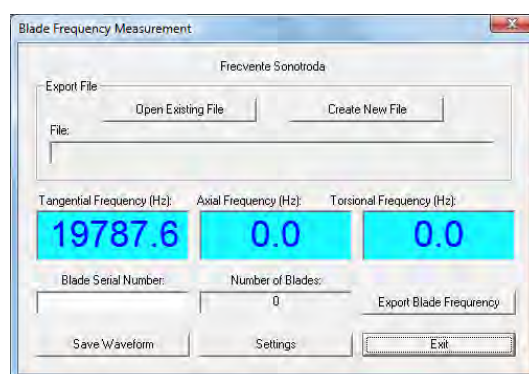


Fig. 3.9 Măsurarea automată a frecvenței de rezonanță

3.3 Standardul G 32-10 utilizat în cercetarea experimentală

Cercetarea experimentală s-a bazat pe standardul G 32-10 [124], care se referă la metode de testare standard pentru eroziune cavitațională utilizând aparate vibratorii. Deși mecanismul pentru generarea cavitației prin această metodă diferă de cea întâlnită la turbinele hidraulice, se consideră că tipul mecanismului distrugerii materialului este în principiu similar. Metoda cu aparatul vibrator oferă un test la o scară mică, relativ simplu și controlabil, care poate fi folosit pentru a compara rezistența eroziunii la cavitație a diferitelor materiale și pentru a studia în detaliu natura și progresul distrugerii pentru un anumit material. Standardul G32-10 specifică condiții de experimentare referitoare la diametru, amplitudinea și frecvența vibrațiilor epruvetelor, fluidul de testare, precum și recipientul utilizat. De asemenea, standardul oferă informații referitoare la noțiunile specifice fenomenului de eroziune cavitațională, aparate vibratorii, epruvete, calibrare, condiții de testare, proceduri, calcularea și interpretarea rezultatelor, curbe de referință. Se prezintă în continuare câteva dintre indicațiile specificate în standard.

Aparatul vibrator folosit pentru această metodă produce oscilații axiale pe o probă imersată la o adâncime specificată în fluid. Vibrațiile sunt generate de traductorul magnetostrictiv sau piezoelectric prin intermediul generatorului de ultrasunete. Puterea generatorului trebuie să fie suficientă pentru a permite o amplitudine constantă a probei în aer sau în fluid. O putere acustică de ieșire la 250 W până la 1000 W este suficientă.

În general, cavitățile iau naștere în zone cu scădere locală a presiunii în lichid. Pentru a eroda suprafața solidă, bulele sau cavitățile trebuie să apară lângă sau pe suprafața expusă. Epruveta se cântărește cu precizie înainte de a începe testarea și periodic pe durata testării, în scopul obținerii unui istoric de pierdere de masă în funcție de timp. Astfel, rezultatele între materiale sau între fluide diferite sau alte condiții se pot compara între ele.

Frecvența de oscilație a epruvetei trebuie să fie $20 \pm 0,5$ kHz. Întregul sistem traductor–sonotrodă–epruvetă trebuie să fie conceput pentru rezonanța longitudinală la această frecvență.

Recipientul cu lichid trebuie să fie destul de mic pentru a permite un control al temperaturii satisfăcător și destul de mare pentru a evita posibilele efecte ale reflecției undelor produse și a resturilor de eroziune. Vasul trebuie să fie cilindric și adâncimea lichidului din el trebuie să fie de 100 ± 10 mm. Diametrul interior al vasului depinde și de metoda de răcire; dacă se introduce o serpentină pentru răcire, atunci un vas de 1000 până la 1500 ml ar fi potrivit.

Trebuie utilizate mijloace tehnice pentru a menține temperatura lichidului de testare la o temperatură specifică de $25 \pm 2^\circ$ C. Serpentina pentru răcirea lichidului din vas și pentru menținerea temperaturii trebuie să aibă un spațiu de aproximativ 3 mm în jurul probei și să fie la o adâncime de cufundare de aproximativ 3 mm sub suprafața acelei probe.

Epruvetele ar trebui să aibă diametru de $15,9 \pm 0,05$ mm. Suprafața de test trebuie să fie netedă și fină la îmbinarea filetată a acesteia cu sonotroda, cât și la suprafața care va fi expusă atacului cavitațional. Strângerea probei în sonotrodă trebuie făcută cu grijă prin intermediul unei chei.

3.4 Procedee de eroziune cavitațională

Pentru aparate vibratorii sunt disponibile două procedee de eroziune cavitațională: metoda directă, [figura 3.10](#) respectiv metoda indirectă de cavitație, [figura 3.11](#) [75].

Prin metoda directă, aparatul vibrator generează oscilații ale epruvetei imersată în lichid la o anumită adâncime. Prin metoda indirectă, epruveta este fixă, iar sonotroda vibrează deasupra probei la o distanță controlată, ambele fiind imersate în apă.

În ambele cazuri, frecvența de oscilație trebuie să fie 20000 ± 500 Hz, iar amplitudinea de $50 \mu\text{m}$. La perioade determinate de timp se măsoară masa epruvetei, rezultând astfel variația neliniară a pierderii de masă funcție de timp. La începutul procesului, există o perioadă inițială la care pierderea de masă este mai mică. Un material este considerat cu atât mai rezistent la cavitație cu cât durata acestei perioade inițiale este mai lungă.

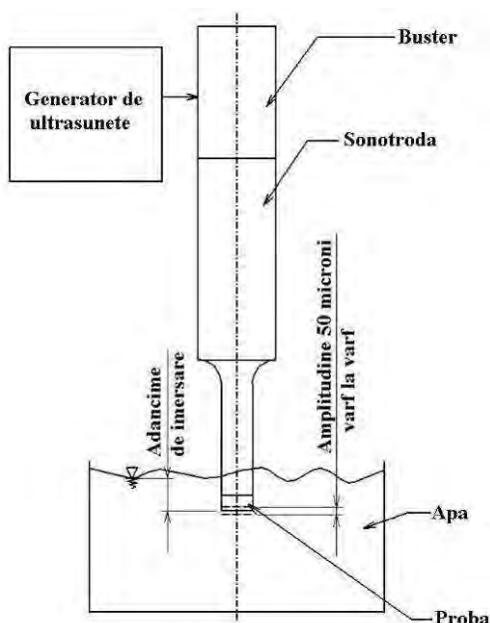


Fig. 3.10 Principiul metodei de cavitație directe

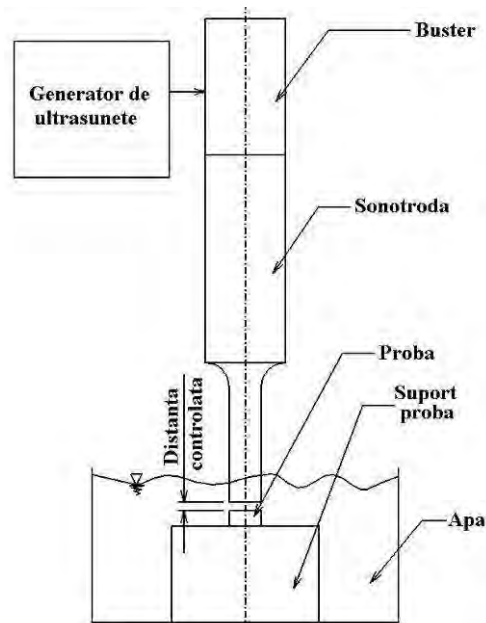


Fig. 3.11 Principiul metodei de cavitație indirecte

Prin metoda directă, pentru materiale diferite trebuie utilizate sonotrode diferite, astfel încât ansamblul traductor-buster-sonotrodă-epruvetă să se încadreze cu frecvența proprie în domeniul de 20000 ± 500 Hz. De asemenea asamblarea prin filet este foarte sensibilă la astfel de frecvențe ridicate. Aceste elemente constituie dezavantaje pentru metoda directă.

Pentru metoda indirectă, deoarece epruveta nu este asamblată cu sonotroda, ea poate fi calibrată o singură dată și utilizată pentru diferite materiale. Sonotroda din titan este cea mai recomandată în asemenea încercări, aceasta nu se încălzește și nu influențează temperatura internă a generatorului de ultrasunete.

Avantajul metodei directe este dat de faptul că procesul de eroziune cavitațională este mult mai accentuat în raport cu metoda indirectă.

3.5 Procedura de experimentare

Etapele care trebuie parcurse pentru testarea unei epruvete sunt, **figura 3.12**:

- curățirea recipientului și umplerea cu apă distilată pentru fiecare epruvetă;
- curățirea epruvetei și măsurarea masei înainte de test;

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

- c) montarea epruvetei pe sonotrodă, în cazul cavitației directe sau pe suport, în cazul cavitației indirecte, **figura 3.12a**;
- d) inserare în recipientul cu lichid; în cazul cavitației indirecte se impune o distanță controlată între sonotrodă și epruvetă;
- e) pornirea aparatului vibrator;
- f) impunerea valorii amplitudinii și a perioadei de testare;
- g) la sfârșitul unei perioade de testare, epruveta se demontează și, prin intermediul unei pensete, este imersată în alcool sanitar, **figura 3.12b**, pentru a elimina orice impurități, apoi este uscată prin jeturi de aer cu ajutorul unui compresor, **figura 3.12c** și se măsoară masa, **figura 3.12d**; deși manipularea epruvetei cu penseta și spălarea în alcool poate părea exagerată, acest mod de operare se impune deoarece precizia masei măsurate la nivel de zecimale poate fi influențată chiar și de contactul epruvetei cu degetele;
- h) înregistrarea valorilor măsurate, **figura 3.12e**;
- i) reluarea pașilor c) ÷ h), cel puțin până la atingerea unui maxim urmat de o diminuare a ratei medii de eroziune, definită, pentru un punct de măsură, prin raportul dintre masa cumulată de material erodat raportată la durata cumulată a atacului cavitațional.

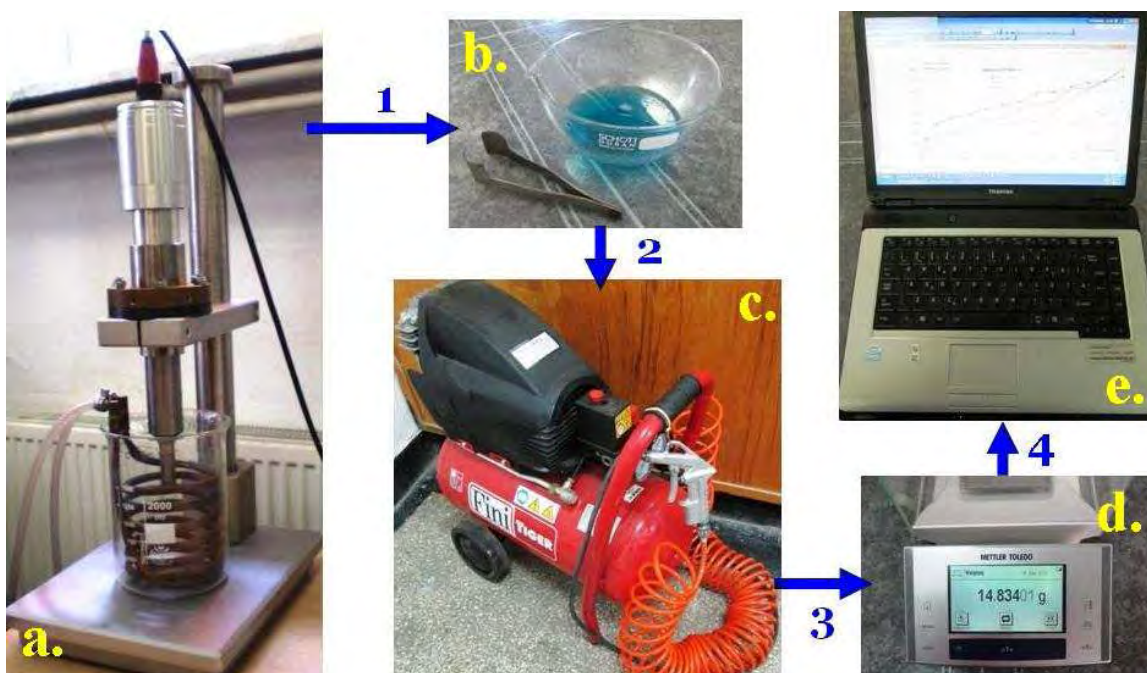


Fig. 3.12 Etapele testării unei epruvete

Pe parcursul derulării încercărilor prin metoda de eroziune indirectă, pentru prinderea epruvetelor s-a încercat utilizarea unor suporturi de prindere a epruvetei, **figura 3**:

- o suport cu filet exterior, **figura 3.13-1**;
- o suport cu gaură de $\varnothing 16$ mm pentru epruvete circulare, **figura 3.13-2**;
- o suport menghină, **figura 3.13-3**;
- o suport cu 1 șurub, **figura 3.13-4**;
- o suport cu 4 șuruburi pentru epruvete circulare cât și sub forma unui cub, **figura 3.13-5**.



Fig. 3.13 Suporturi pentru fixarea epruvetelor pentru de metoda de eroziune indirectă

Dintre aceste variante cel mai eficient s-a dovedit a fi suportul cu 4 șuruburi, **figura 3.14** [73], [76] și 3.15, care permite atât fixarea probelor cilindrice cât și a celor paralelipedice.

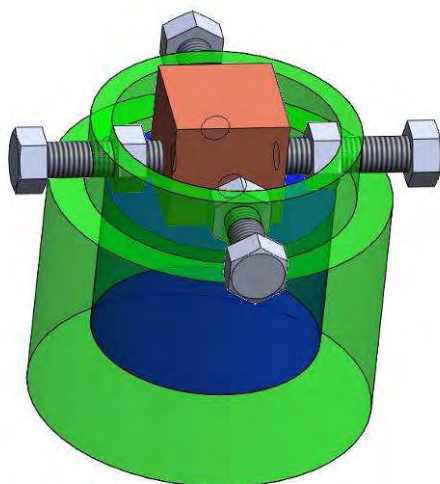


Fig. 3.14 Suport cu 4 șuruburi - geometrie SolidWorks



Fig. 3.15 Suport cu 4 șuruburi – vedere de sus

3.6 Curbe și parametrii caracteristici ale procesului de eroziune cavitațională

3.6.1 Curbe caracteristice procesului de eroziune cavitațională

Conform standardului G 32-10 [124] curba de pierdere de material și a vitezei de eroziune funcție de timp sunt prezentate în **figura 3.16**, din care rezultă și stadiile caracteristice ale procesului cavitațional: incubație, accelerare, staționare, decelerare.

Anton și Bordeasă prezintă în [4], [11], [13] diverse alte forme ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru diverse materiale, **figura 3.17**, unde:

- o materiale fragile (fonte) și cu structuri neomogene, **figura 3.17 a), b), g)**;
- o oțeluri și bronzuri înalt aliate, **figura 3.17 c), d), f)**;
- o fonte, metale monofazice (fier, alamă), **figura 3.17 h)**;
- o aliaje fier carbon și bronzuri de înaltă rezistență, **figura 3.17 f), g)**;
- o materiale cu comportament cavitațional aleatoriu, **figura 3.17 e)**.

În lucrarea [13], Bordeasă evidențiază faptul că „*pentru testele de cavitație efectuate pe aparate vibratorii, perioada de incubație este foarte redusă, datorită intensității ridicate de distrugere a acestor aparate. În primele minute ale atacului cavitațional, se elimină praful abraziv și vârfurile microasperităților suprafeței atacate, motiv pentru care vitezele de eroziune au în această perioadă valori foarte mari*”.

3.6.2 Pierdere de material

Pierdere de material se determină experimental prin cântărire și reprezintă cantitatea de material erodată prin atacul cavitațional. Cântărirea se face la intervale periodice de timp cu o balanță de foarte mare precizie, pentru minimizarea erorilor. Notând cu „mc” masa cumulată de material și cu „t” timpul cumulat, se poate trasa curba de pierdere masică (curba de eroziune cumulată sau curba de pierdere de material) sub forma „mc(t)”, **figura 3.16**, unde abscisa reprezintă timpul exprimat în minute sau ore, iar ordonata reprezintă pierdere de masă exprimată în mg sau g.

Dacă se dorește reprezentarea sub formă de pierdere volumică „Vol(t)”, atunci transformarea se calculează cu **relația 3.1**, unde „ ρ ” reprezintă densitatea materialului, iar pierdere se exprimă în mm^3 . Dacă se dorește reprezentarea sub formă de pierdere gravimetrică „G(t)”, atunci transformarea se calculează cu **relația 3.2**, unde „g” reprezintă accelerația gravitațională.

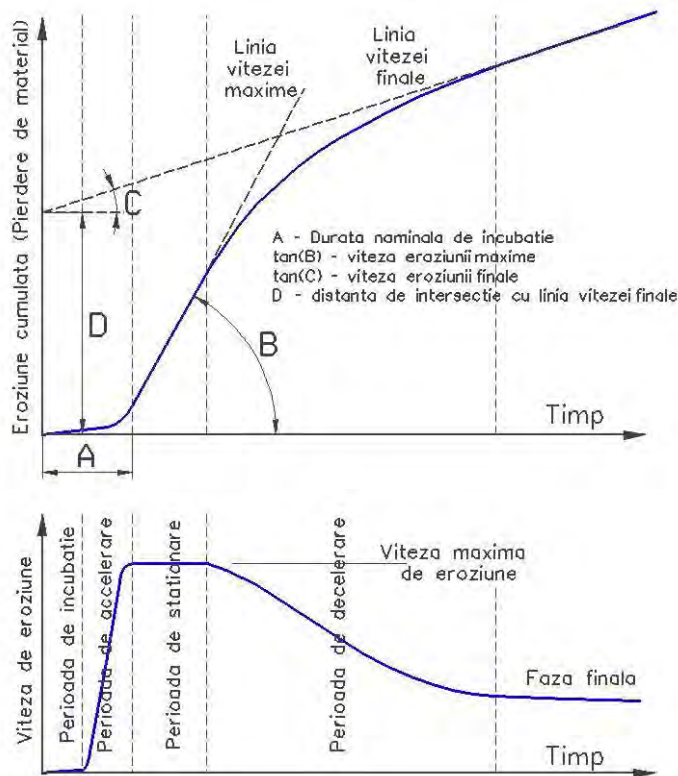


Fig. 3.16 Curba de pierdere de material și a vitezei de eroziune funcție de timp

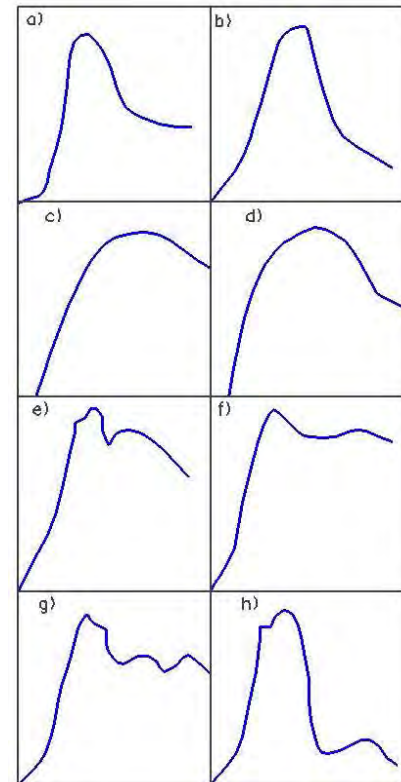


Fig. 3.17 Tipuri de curbe ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp

$$Vol(t) = \frac{mc(t)}{\rho} \quad (3.1)$$

$$G(t) = g \cdot mc(t) \quad (3.2)$$

3.6.3 Viteza de eroziune cavitațională

Viteza de eroziune cavitațională „v” se calculează prin derivarea pierderii masice în raport cu timpul, conform relației 3.3; în consecință se poate trasa curba vitezei de eroziune cavitațională sub forma „v(t)”, figura 3.16, unde abscisa reprezintă timpul exprimat în minute sau ore, iar ordonata reprezintă viteza de eroziune exprimată în mg/min sau mg/h.

Datorită dificultății de exprimare sub formă analitică curbei „mc(t)”, ale cărei puncte sunt măsurate experimental, se necesită aplicarea unui algoritm de derivare numerică, descris succint în continuare. Pentru un șir dat de puncte (X_i , Y_i), unde $i=1...N$, se pune problema calculării derivatei în abscisele X_i . Derivata într-un punct reprezintă tangenta unghiului format între direcția abscisei și tangenta la curbă în punctul respectiv. Algoritmul se bazează pe aproximarea cu o dreaptă a curbei dintre două puncte consecutive X_i respectiv X_{i+1} , astfel încât derivata Y' în punctul X_i se poate aproxima prin relația 3.4.

$$v(t) = \frac{d mc(t)}{dt} \quad (3.3)$$

$$Y' = \frac{dY}{dx} \Big|_{X_i} \cong \frac{Y_{i+1} - Y_i}{X_{i+1} - X_i} \quad (3.4)$$

O altă posibilitate de calcul a derivatei este oferită de modulul „*XlXtrFun.xll*”, disponibil liber pe Internet, modul care se adaugă în Microsoft Excel [74] în lista de componente incluse la cerere, prin opțiunea de meniu: **Tools** → **Add-Ins**, după salvarea fișierului pe calculator. Pentru calculul derivatei, modulul „*XlXtrFun.xll*” oferă funcția *dydx*, care are sintaxa conform relației 3.5:

$$\text{dydx} (\text{domeniu de abscise, domeniu de ordinate, abscisa derivată}) \quad (3.5)$$

unde:

- o domeniu de abscise - domeniul de celule Excel care conține valorile absciselor X_i ;
- o domeniu de ordinate - domeniul de celule Excel care conține valorile ordonatelor Y_i ;
- o abscisa derivată - abscisa în care se dorește calculul derivatei (referință relativă).

Obs: Domeniul de abscise respectiv ordinate trebuie exprimate ca referințe absolute.

Deoarece rezultatele oferite de ambele metode sunt apropiate, se va aplica a doua metodă de derivare numerică, care este mai simplă și mai rapidă.

3.6.4 Adâncimea medie de pătrundere

Adâncimea medie de pătrundere MDP (mean depth of penetration) se definește prin raportul dintre volumul erodat în timpul atacului cavitațional „*Vol*” și suprafața epruvetei „*A*” cu diametru „*d*” [4], relația 3.6. Bordeasă [11] consideră că suprafața care trebuie considerată este cea erodată cavitațional, definită prin diametrul echivalent „ d_{pata} ”, caz în care MDP se calculează prin relația 3.7.

$$MDP = \frac{Vol}{A} = \frac{mc}{\rho \cdot A} = \frac{4 \cdot mc}{\rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.6) \quad MDP = \frac{Vol}{A} = \frac{mc}{\rho \cdot A} = \frac{4 \cdot mc}{\rho \cdot \pi \cdot d_{pata}^2} \quad (3.7)$$

Viteza adâncimii medie de pătrundere MDPR (mean depth of penetration rate) se calculează prin raportul dintre MDP la durată atacului cavitațional „*t*”, relațiile 3.8 respectiv 3.9.

$$MDPR = \frac{MDP}{t} = \frac{Vol}{A \cdot t} = \frac{mc}{\rho \cdot A \cdot t} = \frac{4 \cdot mc}{\rho \cdot \pi \cdot d^2 \cdot t} \quad (3.8)$$

$$MDPR = \frac{MDP}{t} = \frac{Vol}{A \cdot t} = \frac{mc}{\rho \cdot A \cdot t} = \frac{4 \cdot mc}{\rho \cdot \pi \cdot d_{pata}^2 \cdot t} \quad (3.9)$$

Funcție de timpul considerat în relațiile (3.8) respectiv (3.9), parametrul „MDPR” corespunde timpului cumulat după fiecare perioadă de încercare, iar „MDPR_{max}” corespunde timpului maxim cumulat de atac cavitațional.

Cap. 4 CERCETĂRI PENTRU CALIBRAREA DE SONOTRODE DESTINATE ÎNCERCĂRILOR DE EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ A EPRUVETELOR

4.1 Generalități

În acest capitol se prezintă cercetările realizate pentru calibrarea de sonotrode destinate testării eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda directă respectiv indirectă. Cercetările s-au axat pe următoarele obiective importante:

- investigarea cauzelor care produc blocarea funcționării generatorului;
- proiectarea și calibrarea de sonotrode pentru încercarea eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda directă respectiv indirectă;
- selecția metodei de testare a eroziunii cavitaționale a epruvetelor (directă sau indirectă).

Aparatul vibrator TELSONIC [126], & 3.2, proiectat special pentru studii cavitaționale, a venit echipat cu două sonotrode din titan pentru: epruvete din aluminiu respectiv din oțel, ambele cu filet exterior M12x1 pentru atașarea prin filetare a epruvetei. Cu aceste sonotrode se pot efectua încercări cavitaționale prin metoda directă.

În urma unor încercări cavitaționale preliminare, efectuate pe aparatul cavitațional DG-2000 TELSONIC, s-a constatat fisurarea/ruperea sonotrodei, conform *figurii 4.1* și *4.2*. Sonotroda deteriorată a fost utilizată la încercarea cavitațională a epruvetelor din oțel. După cum rezultă din & 3.2 protecția generatorului blochează funcționarea acestuia dacă frecvența ansamblului traductor-buster-sonotrodă-epruvetă nu se încadrează în domeniul $20000 \text{ Hz} \pm 500 \text{ Hz}$, ceea ce a avut ca efect imposibilitatea de a continua încercări cavitaționale cu această sonotrodă.



Fig. 4.1 Sonotroda cu filet exterior M12x1 cu ruptură în zona filetului



Fig. 4.2 Sonotroda cu filet exterior M12x1 cu ruptură în zona filetului (detaliu)

Conform manualului de utilizare [126], pot apare erori în funcționare datorită filetului, deoarece forțele accelerate sunt apropiate de limita de curgere a materialului și pot crește semnificativ în zona de contact a filetului. Ultrasunetele nu sunt transmise prin filet, ci prin suprafețele de contact ale acestuia. Astfel în zona de contact pot apare încărcări foarte ridicate.

Deteriorarea sonotrodei a impus deci realizarea de cercetări pentru analiza fisurării și ruperii sonotrodei, respectiv proiectarea și calibrarea de sonotrode pentru încercarea eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda directă respectiv indirectă.

4.2 Analiza fisurării și ruperii sonotrodei

În prezentul subcapitol se analizează cauzele fisurării/ruperii sonotrodei și se propun soluții pentru rezolvarea acestei probleme.

4.2.1 Geometria sonotrodei

Geometria sonotrodei este prezentată în figura 4.3. La capătul inferior al acesteia se observă filetul exterior M12x1, necesar cuplării cu epruveta cavitațională, zonă în care s-a produs fisurarea/ruperea sonotrodei. Analiza va include un calcul static și un calcul la oboseală [67], [68], [69], [77], ambele efectuate pe sonotroda cu filet exterior M12x1, utilizând modulul Simulation din aplicația CAD SolidWorks [78], [79], [80], [81], [82].

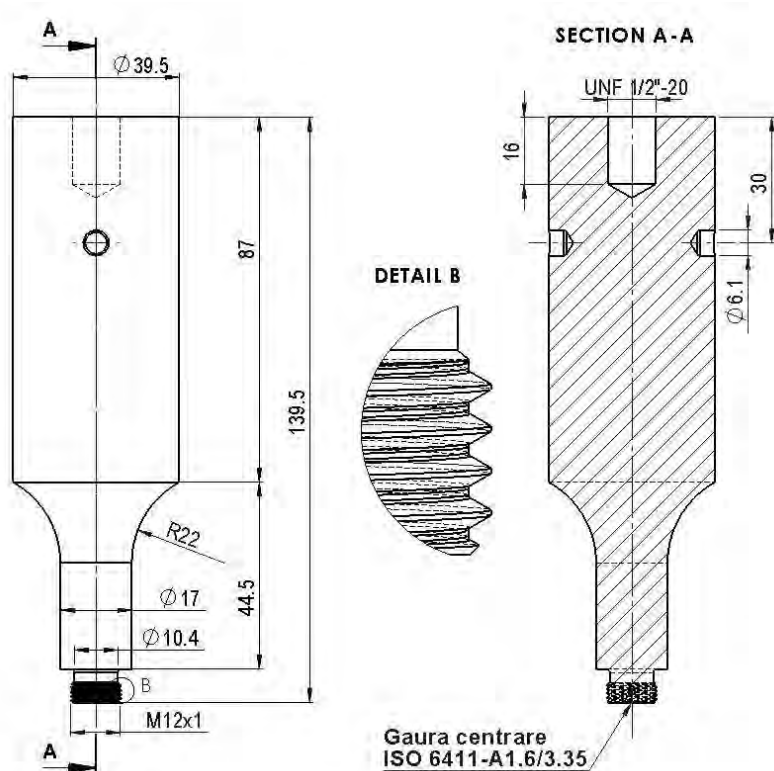


Fig. 4.3 Geometrie sonotrodă cu filet exterior M12x1

4.2.2 Analiza statică a sonotrodei cu filet exterior M12x1

Din & 3.2 al manualului de utilizare al aparatului cavitațional DG-2000 rezultă amplitudinea recomandată a traductorului în domeniul $35 \div 50 \mu\text{m}$. În consecință, analiza statică se va efectua pentru amplitudinea maximă recomandată de producătorul aparatului, respectiv $50 \mu\text{m}$, amplitudine la care au fost efectuate și încercările cavitaționale preliminare. Sonotroda se încastrează pe fața 1, iar pe fața 2 se va impune o deplasare de $50 \mu\text{m}$, figura 4.4. Materialul barei este titan Ti-6Al-4V, cu modulul de elasticitate $E = 1.048 \times 10^{11} \text{ E}+5 \text{ MPa}$, coeficientul lui Poisson $\nu = 0.31$ și limita de curgere 1050 MPa , figura 4.5.

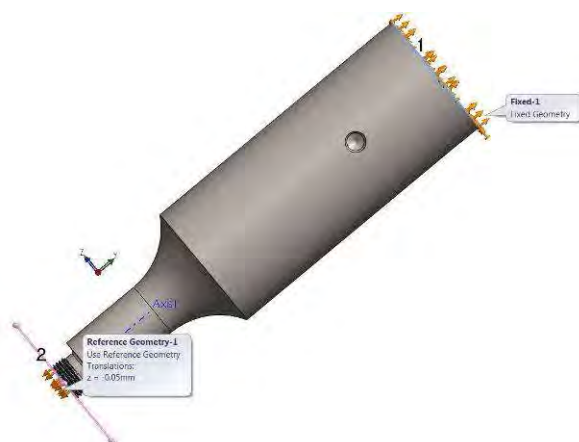


Figura 4.4 Restrângeri aplicate pe sonotroda cu filet exterior M12x1

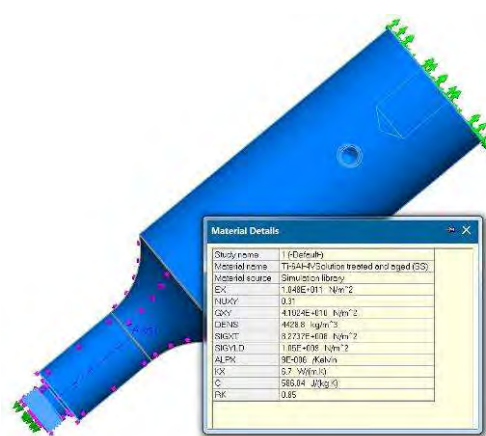


Figura 4.5 Material (Titan Ti-6Al-4V) asociat sonotrodei cu filet exterior M12x1

Pentru a verifica convergența soluției, analiza statică a fost efectuată pentru 3 cazuri de discretizare, conform condițiilor prezentate în tabelul 4.1. Pentru cele trei cazuri de discretizare, condițiile de discretizare aplicate sonotrodei cu filet exterior M12x1 sunt prezentate în figurile 4.6, 4.8, 4.10, iar discretizările în figurile 4.7, 4.9, 4.11. Din tabelul 4.1 se observă faptul că numărul de elemente finite pentru cazul 1 este de aproximativ 3 ori mai mare decât în cazul 3. Tensiunile von Mises și deplasările rezultate sunt prezentate în figurile 4.12, 4.14, 4.16 respectiv 4.13, 4.15, 4.17.

Discretizare sonotrodă cu filet exterior M12x1

Tabel 4.1

Caz	Zona 1 Curvature based mesh	Zona 2 Local Mesh control	Zona 3 Local Mesh control
1	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 0.6 mm Ratio → 1.5	Element size → 0.4 mm Ratio → 1.5
	Număr elemente finite → 459774	Număr noduri → 652760	
2	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 1 mm Ratio → 1.5	Element size → 0.4 mm Ratio → 1.5
	Număr elemente finite → 207807	Număr noduri → 298874	
3	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 2 mm Ratio → 1.5	Element size → 0.4 mm Ratio → 1.5
	Număr elemente finite → 152074	Număr noduri → 219948	

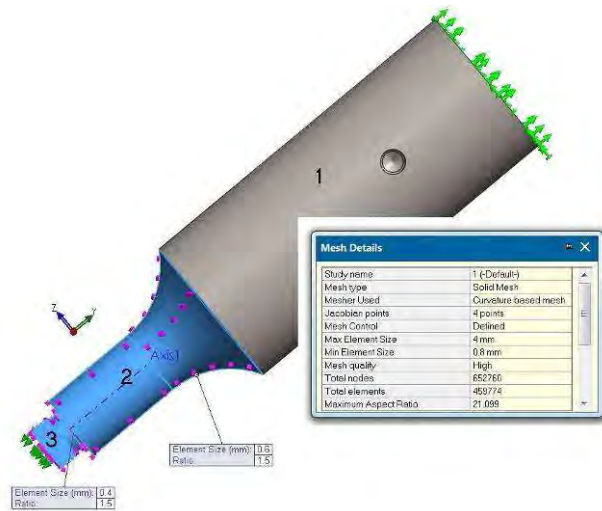


Fig. 4.6 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu fillet exterior M12x1 – Caz 1

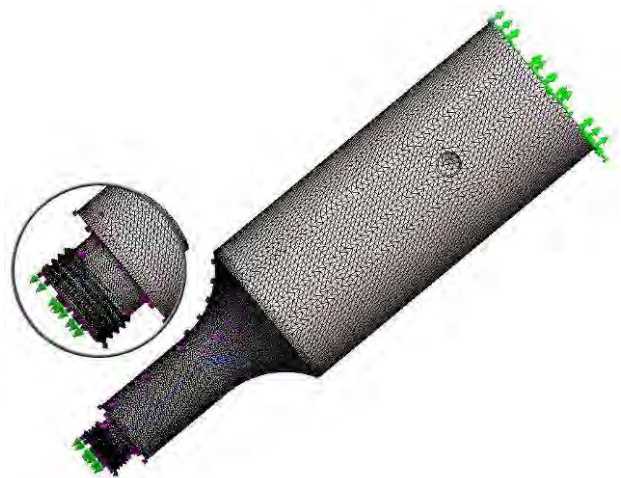


Fig. 4.7 Discretizare sonotrodă cu fillet exterior M12x1 – Caz 1

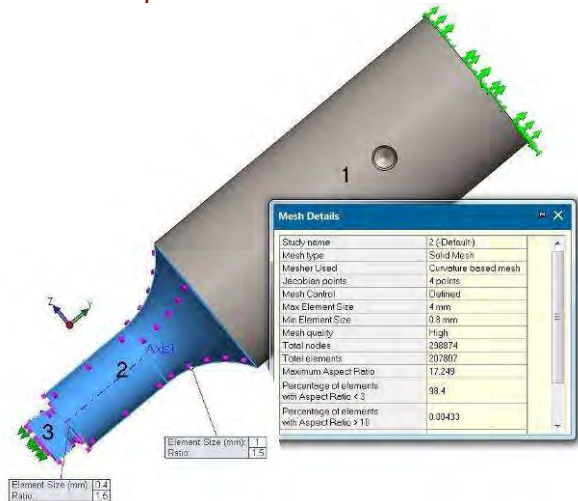


Fig. 4.8 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu fillet exterior M12x1 – Caz 2

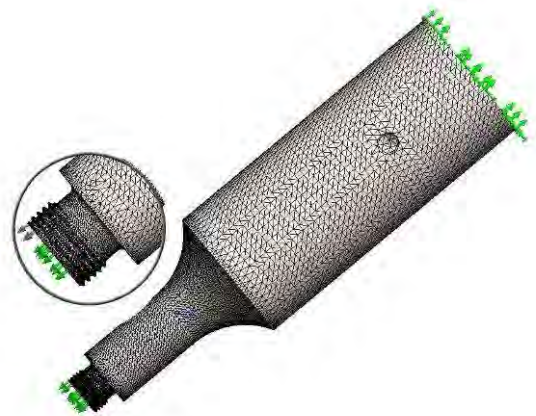


Fig. 4.9 Discretizare sonotrodă cu fillet exterior M12x1 – Caz 2

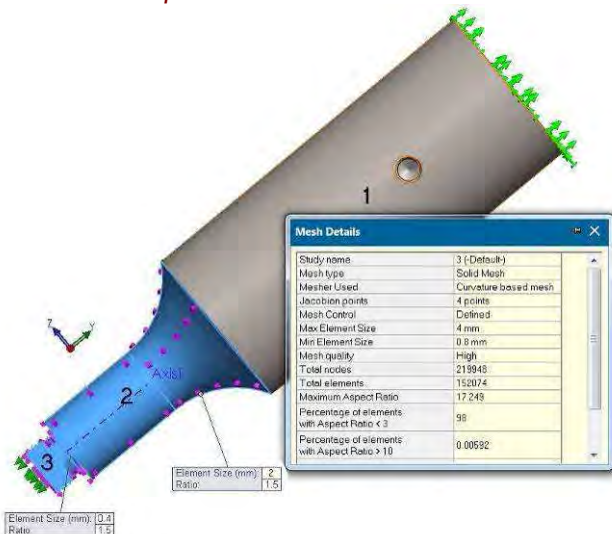


Fig. 4.10 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu fillet exterior M12x1 – Caz 3

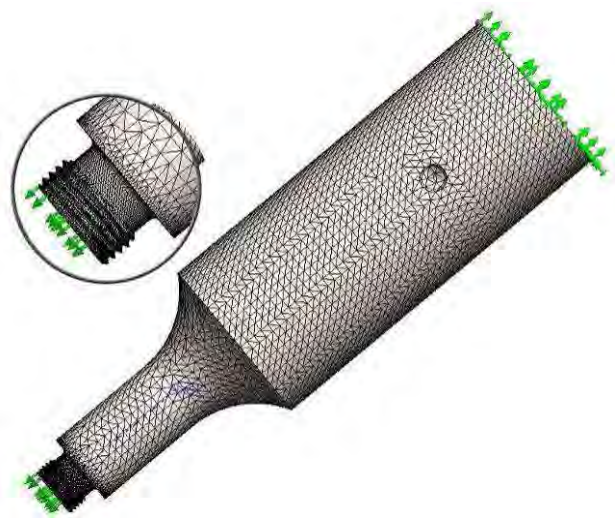


Fig. 4.11 Discretizare sonotrodă cu fillet exterior M12x1 – Caz 3

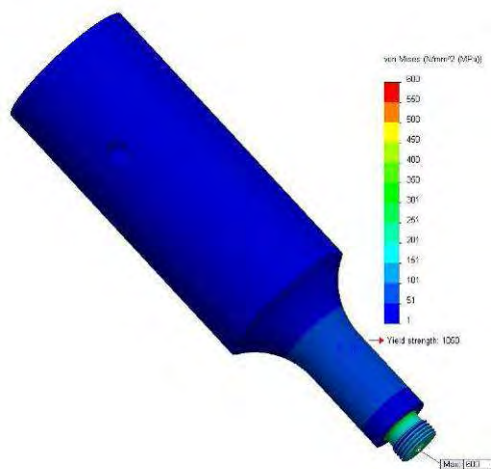


Fig. 4.12 Tensiunea von Mises 600 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 1

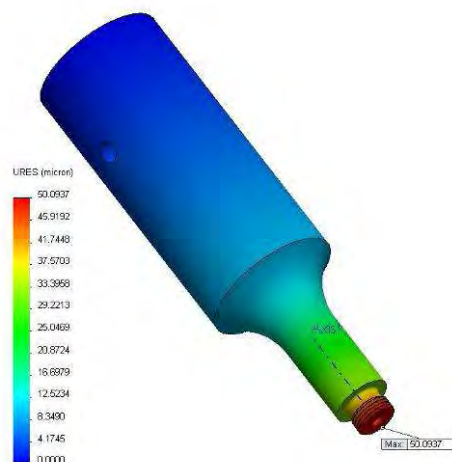


Fig. 4.13 Deplasarea rezultantă 50.0937 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 1

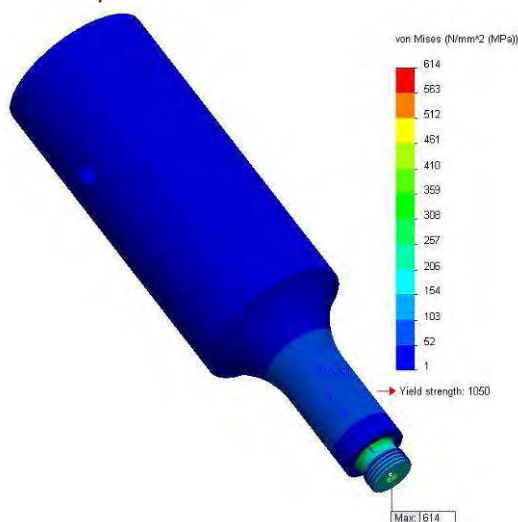


Fig. 4.14 Tensiunea von Mises 614 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 2

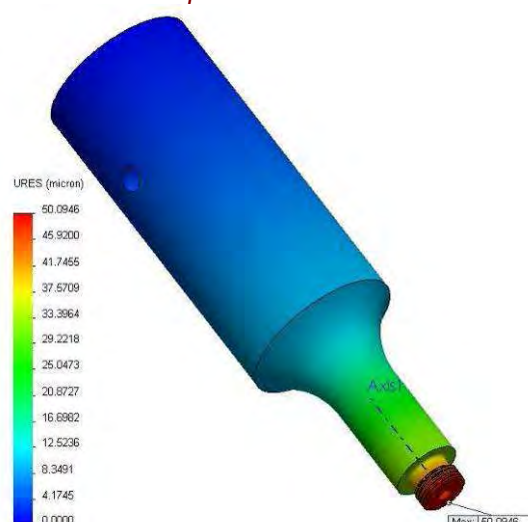


Fig. 4.15 Deplasarea rezultantă 50.0946 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 2

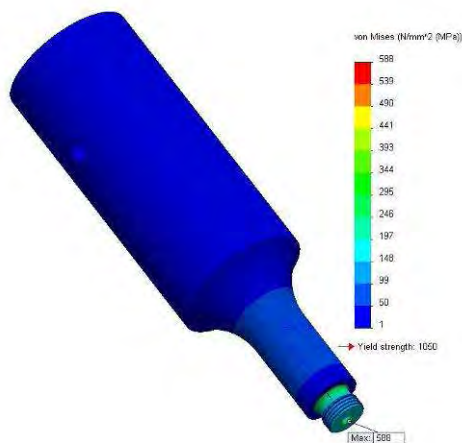


Fig. 4.16 Tensiunea von Mises 588 MPa Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 3

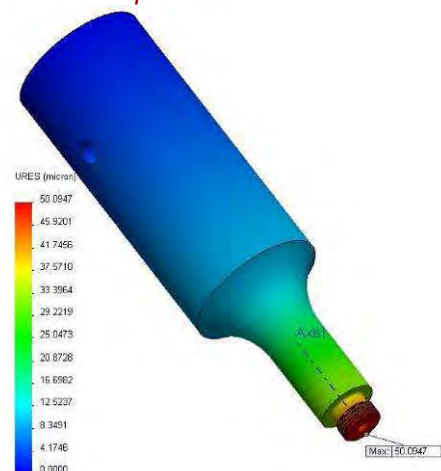


Fig. 4.17 Deplasarea rezultantă 50.0947 μm Sonotroda cu filet exterior M12x1 – Caz 3

Tabelul 4.2 centralizează rezultatele analizei statice pentru cele 3 cazuri, de unde rezultă valorile tensiunii von Mises în domeniul $588 \div 614$ MPa, iar deplasarea pe valori de $50 \mu\text{m}$.

Rezultate analiză statică pentru sonotroda cu filet exterior M12x1

Tabel 4.2

Caz	Număr elemente finite / noduri	Tensiune von Mises [MPa]	Deplasare [μm]
1	459774 / 652760	600	50.0937
2	207807 / 298874	614	50.0946
3	152074 / 219948	588	50.0947

4.2.3 Calculul la oboseală a sonotrodei cu filet exterior M12x1

Oboseala materialului apare la aplicarea, în timp și în mod repetat, a unor cicluri de încărcări/descărcări, astfel încât după un număr de cicluri parcurse apare ruperea. Oboseala nu poate fi calculată printr-o analiză statică, deoarece acest tip de analiză consideră ca încărcările aplicate nu variază în timp. Aplicația CAD SolidWorks include modulul **Fatigue**, specializat pe calculul la oboseală. Pentru a efectua un calcul la oboseală este necesar, să fie efectuată anterior, o analiză statică, analiză din care să fie preluate rezultatele pentru calculul la oboseală. Etapele unui calcul la oboseală sunt următoarele: analiza statică a piesei, crearea unui studiu de oboseală, definirea unei curbe SN pentru materialul piesei, definirea unuia sau mai multor evenimente, calculul propriu-zis și vizualizarea rezultatelor. Calculul la oboseală se bazează pe curbele SN determinate experimental, curbe care conțin pe ordonată tensiunea alternantă S (**Alternating stress**), iar pe abscisă numărul de cicluri N la care se produce ruperea prin oboseală. **Tabelul 4.3** respectiv **figura 4.18** prezintă curba SN pentru materialul titan Ti-6Al-4V, curbă preluată din biblioteca SolidWorks.

Modulul **Fatigue** oferă posibilitatea aplicării unui factor de corecție K_f (**Fatigue strength reduction factor**), cu valori cuprinse între $0 \div 1$, pentru a lua în considerare diferențele dintre condițiile reale și cele existente la momentul determinării experimentale a curbei SN. Programul divide tensiunile alternante cu acest factor, ceea ce este echivalent cu a reduce numărul de cicluri, care cauzează ruperea, la o valoare specificată a tensiunii. În cadrul prezentei analize se va admite valoarea 1 a acestui factor.

Atunci când pentru definirea proprietăților materialului se utilizează o singură curbă SN cu rația 1, se poate selecta o metodă de corecție pentru a ține cont de influența mediei nenule a tensiunii alternante. Amplitudinea tensiunilor alternante este calculată ca medie a tensiunilor extreme ale ciclului. Dar proporția defectelor generate prin oboseală depinde nu numai de domeniul tensiunilor extreme, ci și de media acestora. Media tensiunilor este nulă numai pentru cazul alternant simetric pentru care corespunde rația -1. Modulul **Fatigue** oferă posibilitatea aplicării următoarelor metode de corecție: Goodman, Gerber respectiv Soderberg. În cadrul prezentei analize nu se va utiliza nici una din aceste metode.

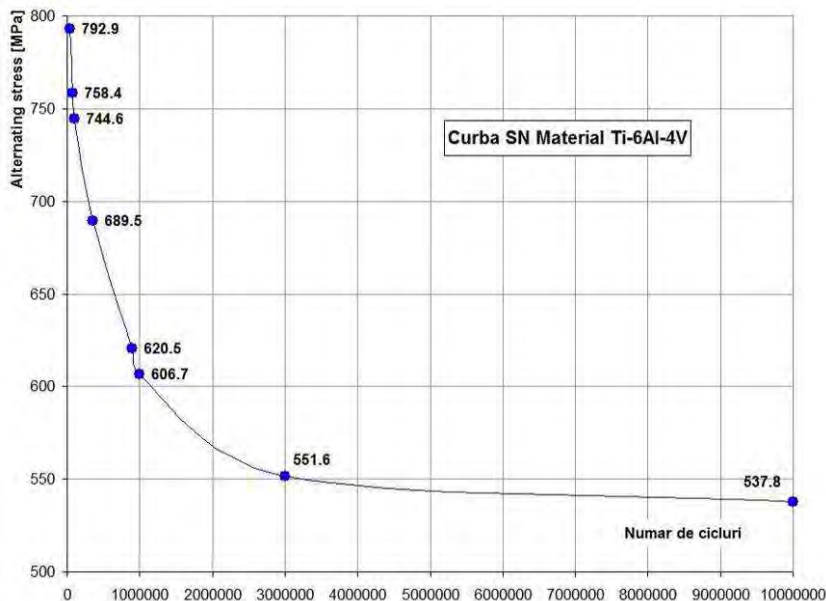


Figura 4.18 Curba SN pentru Ti-6Al-4V

Tabel 4.3

Valori numerice ale curbei SN pentru Ti-6Al-4V

Număr de cicluri N	Tensiune
-	MPa
35000	792.8971
80000	758.4233
100000	744.6338
350000	689.4757
900000	620.5282
1000000	606.7386
3000000	551.5806
10000000	537.7911

În calculul la oboseală, un eveniment se bazează pe un studiu de analiză statică și permite specificarea numărului de cicluri pentru care se face calculul și tipul încărcării.

În cadrul prezentei analize, pentru sonotroda cu filet exterior M12x1, figura 4.19, calculul la oboseală va fi definit prin:

- o numărul de cicluri $N=10000000$;
- o tipul încărcării - alternant simetric (**Fully Reversed**), cu rația $R = -1$, ceea ce înseamnă că toate încărcările și deci și tensiunile își inversează simultan direcția, pentru numărul de cicluri specificat anterior; pentru fiecare nod programul va impune valoarea tensiunii alternante egală cu valoarea corespunzătoare a tensiunii von Mises preluată din studiul de analiză statică în nodul respectiv, astfel încât valorile maxime și minime ale componentelor tensiunii sunt egale și de semn contrar;
- o calculul la oboseală se va baza pe cazul 1 din paragraful anterior, pentru care numărul de elemente finite este 459774, tensiunea maximă von Mises este 600 MPa și deplasarea maximă este de 50.0937 μm .

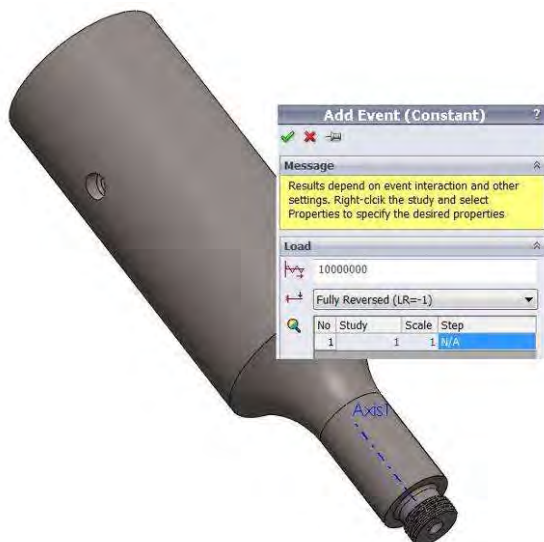
Pentru un eveniment și un tip de încărcare, programul va calcula valorile tensiunii alternante în fiecare nod, rezultând o matrice de puncte (S,N).

În calculul de oboseală interesează punctul cel mai defavorabil, care se va plasa diagrama SN, prin coordonatele (S,N) ale acestuia. Sunt posibile 3 situații:

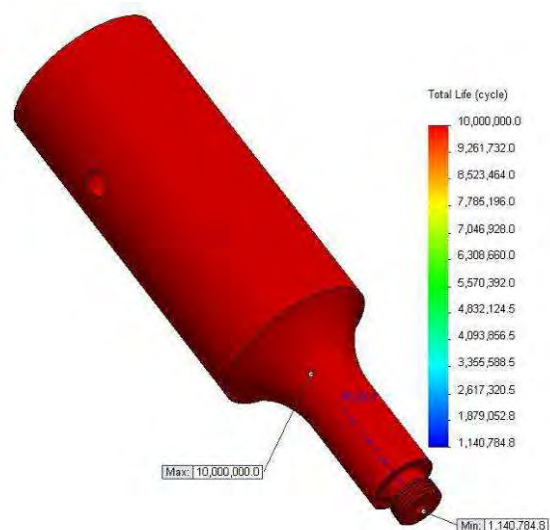
- o punctul se situează deasupra curbei SN, ceea ce înseamnă că ruperea prin oboseală va apare în nodul respectiv;

- o punctul se situează sub curba SN, ceea ce înseamnă că ruperea prin oboseală nu va apare;
- o punctul se situează în afara domeniului curbei SN; valoarea cea mai mare a tensiunii alternante din piesa analizată ar trebui să se încadreze în interiorul domeniului de tensiuni al curbei SN; aceeași condiție ar trebui să fie îndeplinită și pentru numărul de cicluri; în caz contrar, indiferent de punctul de intersecție, programul va utiliza în calcul punctul de capăt al curbei SN.

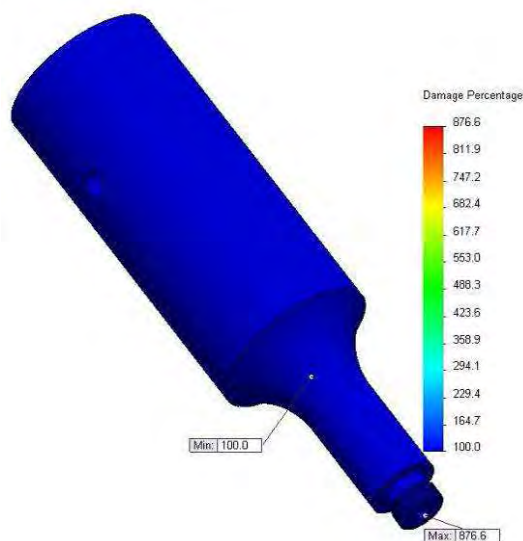
Rezultatele calculului la oboseală se prezintă sub forma hărților de culori corespunzătoare următoarelor mărimi: durata de viață (**Total Life**) – figura 4.20, procentul de distrugere (**Damage Percentage**) – figura 4.21, coeficientul de încărcare (**Load factor**) – figura 4.22.



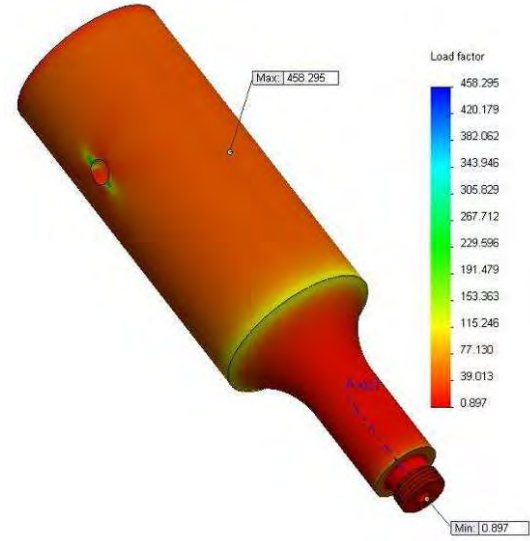
*Fig. 4.19 Sonotroda cu filet exterior M12x1
Definirea evenimentului*



*Fig. 4.20 Sonotroda cu filet exterior M12x1
Durata de viață min. 1140785 cicluri*



*Fig. 4.21 Sonotroda cu filet exterior M12x1
Procentul de distrugere max. 876.6%*



*Fig. 4.22 Sonotroda cu filet exterior M12x1
Coeficient de încărcare min. 0.897*

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Pentru cazul analizat și punctul cel mai defavorabil, rezultă valorile din **tabelul 4.4** respectiv **figura 4.23**. Deoarece punctul se situează deasupra curbei SN, rezultă că, pentru sonotroda cu filet exterior M12x1, va apare ruperea prin oboseală.

Rezultate ale calculului la oboseală a sonotrodei cu filet exterior M12x1

Tabel 4.4

Mărimă	Simbol / relație	UM	Valoare	Preluată din
Numărul de cicluri	N	Cicluri	10000000	Data de intrare
Durata de viață	Life = N-ΔN	Cicluri	1140785	Figura 4.20
Diferența de cicluri	ΔN = N-Life	Cicluri	8859215	Calcul
Procentul de distrugere	N x 100 / Life	%	876.6	Figura 4.21
Tensiune alternantă maximă în piesă	$\sigma_{\max}$	MPa	600	Analiza statică
Tensiune alternantă de pe curba SN a materialului Ti-6Al-4V pentru numărul de cicluri specificat 1×10^7	σ_{SN}	MPa	537.79	Figura 4.18 Tabel 4.3
Coeficientul de încărcare	$\sigma_{SN} / \sigma_{\max}$	-	0.897	Figura 4.22

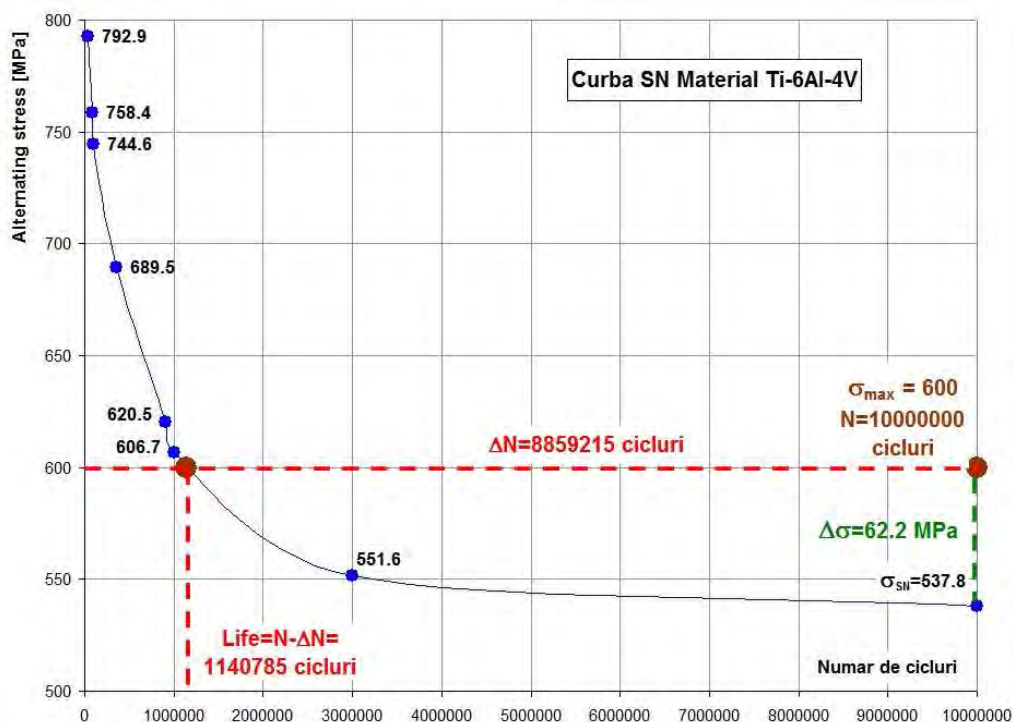


Fig. 4.23 Sonotroda cu filet exterior M12x1

Poziționarea punctului cel mai defavorabil în diagrama SN

Durata de viață (**Total Life**) reprezintă numărul de cicluri minim care cauzează ruperea prin oboseală într-un punct al sonotrodei; valoarea acesteia depinde numai de valoarea tensiunii într-un punct și de curba SN, fără a depinde de numărul de cicluri N. În diagrama SN, durata de viață rezultă ca număr de cicluri prin proiecția pe axa absciselor a punctului de intersecție dintre curba SN și linia orizontală corespunzătoare tensiunii alternante maxime în piesă $\sigma_{\max}$, **figura 4.23**. Pentru cazul analizat durata de viață este de 1140785 cicluri.

Procentul de distrugere (**Damage Percentage**) exprimă procentual cât consumă evenimentul specificat (solicitarea aplicată) din durata de viață a sonotrodei. De exemplu, un procent de 100% exprimă faptul că durata de viață a sonotrodei este consumată în totalitate. În cazul de față, interesează valoarea maximă a acestei mărimi (**max damage**), care, pentru cazul analizat, este de 876.6%, **figura 4.21**, ceea ce confirmă producerea ruperii datorită oboselii, după un număr de cicluri calculabil prin relația:

$$N / (\text{max damage} / 100) = N / (876.6 / 100) = 1140785 \text{ cicluri} \quad (4.1)$$

valoare care coincide cu valoarea minimă din **figura 4.20**.

Coeficientul de încărcare (**Load factor**) este raportul dintre tensiune alternantă din curba SN a materialului pentru numărul de cicluri specificat și tensiune alternantă din sonotroda într-un punct al acesteia. De exemplu, un coeficient de încărcare cu valoarea 2 într-un punct preconizează ruperea prin oboseală în acel punct dacă încărcările aplicate sunt multiplicare cu 2. Interesează valoarea minimă a acestei mărimi care, pentru cazul analizat, este de 0.897, **figura 4.22**. Valoarea subunitară a coeficientului înseamnă ca ruperea prin oboseală va apare.

4.2.4 Geometria sonotrodelor reproiectate cu filet interior M12x1, M10x1, M8x1

Soluția propusă pentru evitarea fisurării sonotrodei este reproiectarea sonotrodei cu filet interior. Vor fi analizate trei variante de sonotrode cu filet interior: M12x1, M10x1 respectiv M8x1. Analiza va include un calcul static și un calcul la oboseală, efectuate pe cele trei sonotrode cu filete interioare: M12x1, M10x1 și M8x1.

Figurile 4.24, 4.25 și 4.26 prezintă geometria sonotrodelor cu filete interioare (M12x1, M10x1 respectiv M8x1). Cele trei sonotrode diferă prin dimensiunea filetelui interior.

4.2.5 Analiza statică a sonotrodelor reproiectate cu filet interior

Analiza statică se va efectua pentru amplitudinea maximă recomandată de producătorul aparatului, respectiv 50 μm, amplitudine la care au fost efectuate și încercările cavitaționale preliminare. Restrângerile aplicate sonotrodelor cu filet interior M12x1, M10x1 respectiv M8x1 și materialul sunt similare cu cele aplicate sonotrodei cu filet exterior M12x1, **figura 4.4** și **figura 4.5**.

Analiza statică a fost efectuată pentru 4 cazuri de discretizare, identice pentru cele 3 geometrii, conform condițiilor din **tabelul 4.5**. Condițiile de discretizare aplicate sonotrodelor cu filet interior sunt prezentate, numai pentru varianta M12x1, în **figurile 4.27, 4.29, 4.31, 4.33**, iar discretizările în **figurile 4.28, 4.30, 4.32, 4.34**. Din **tabelul 4.5** se observă faptul că numărul de elemente finite descrește dinspre cazul 1 spre 4.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

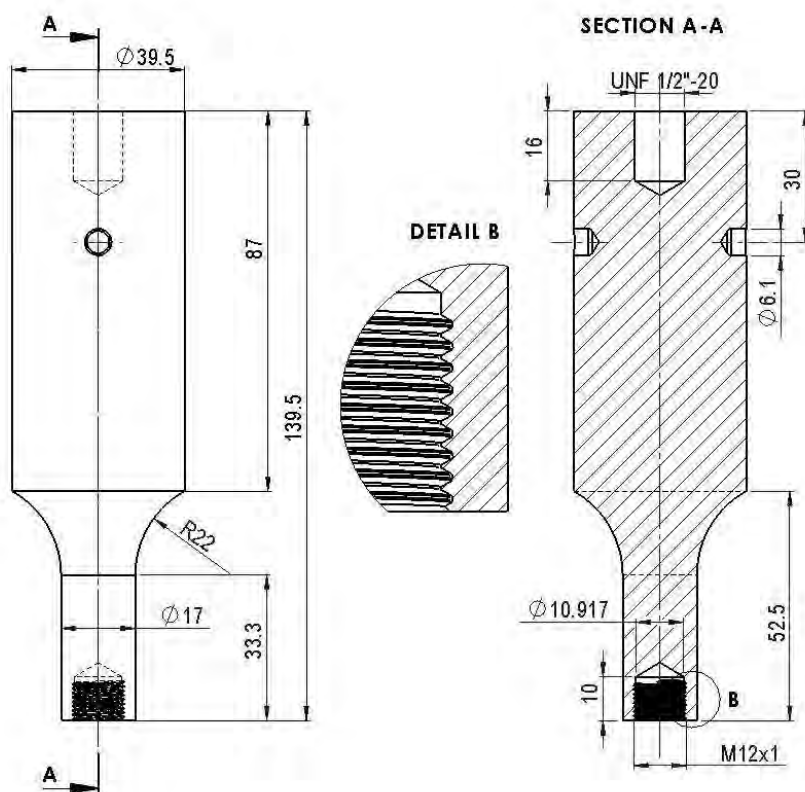


Fig. 4.24 Geometrie sonotrodă cu filet interior M12x1

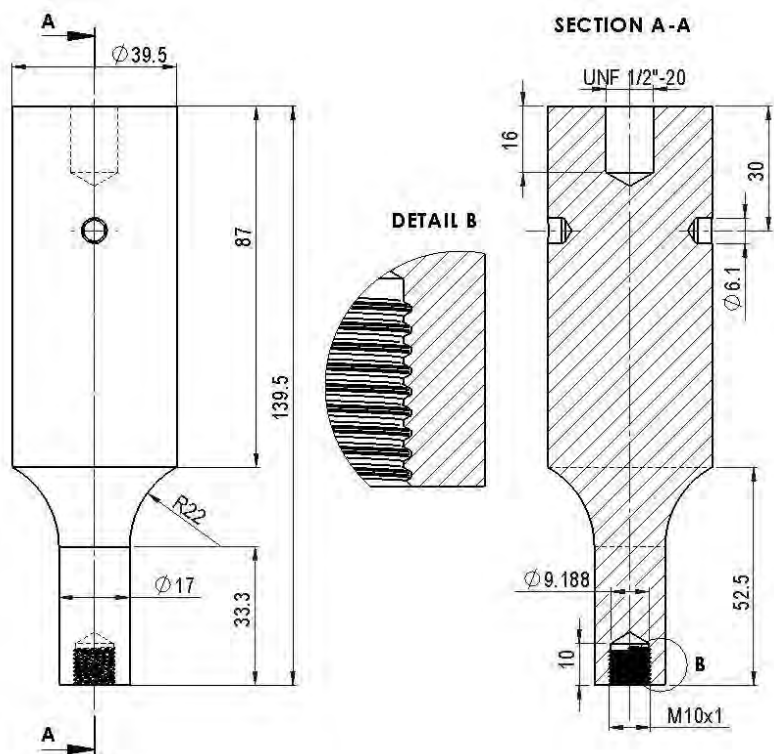


Fig. 4.25 Geometrie sonotrodă cu filet interior M10x1

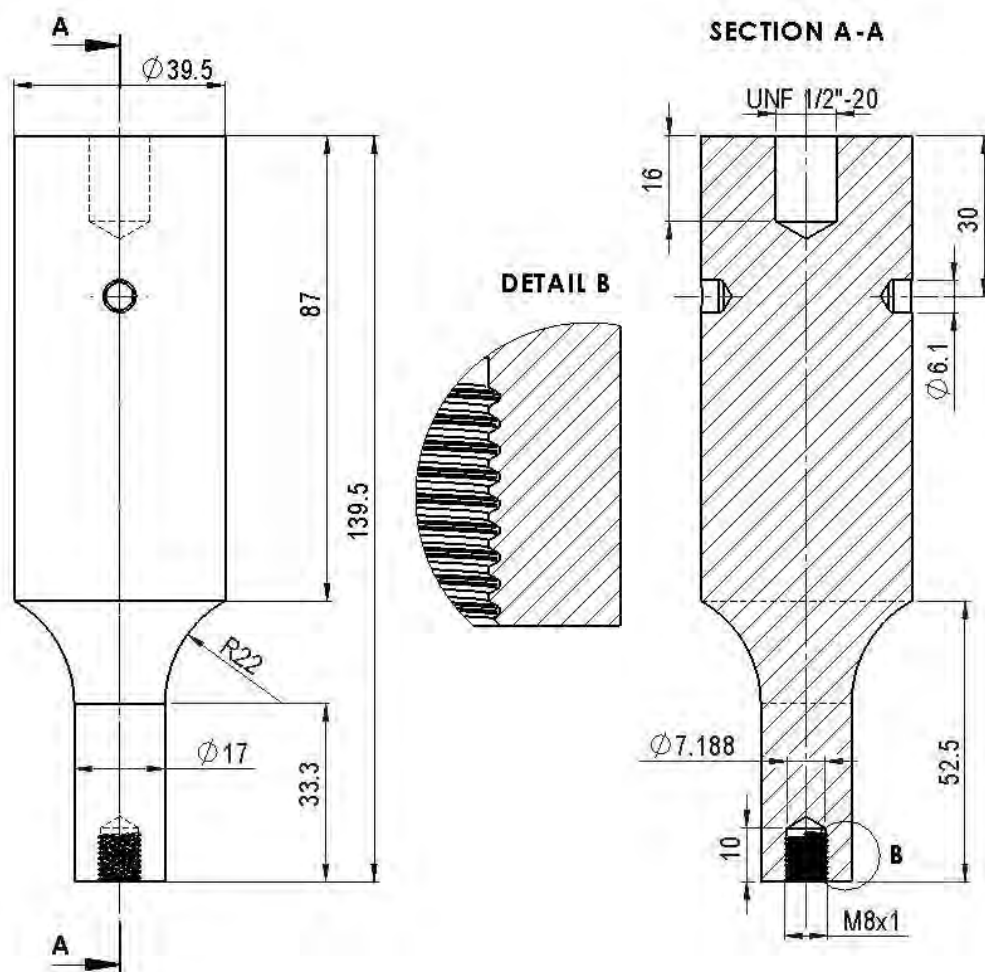


Fig. 4.26 Geometrie sonotrodă cu filet interior M8x1

Discretizare sonotrode cu filet interior M12x1, M10x1, M8x1

Tabel 4.5

Caz	Zona 1 Curvature based mesh	Zona 2 (Porțiunea filetată) Local Mesh control	Număr elemente finite / Număr noduri		
			M12x1	M10x1	M8x1
1	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 1 mm Ratio → 1.5	497349	449544	393376
			741628	662591	575740
2	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 2 mm Ratio → 1.5	176727	158874	144123
			269949	239854	215333
3	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	Element size → 3 mm Ratio → 1.5	102658	92252	84233
			159507	141099	127277
4	Max / Min element size → 4 / 0.8 Mesh quality → High	-	39796	38953	37746
			62451	60325	57642

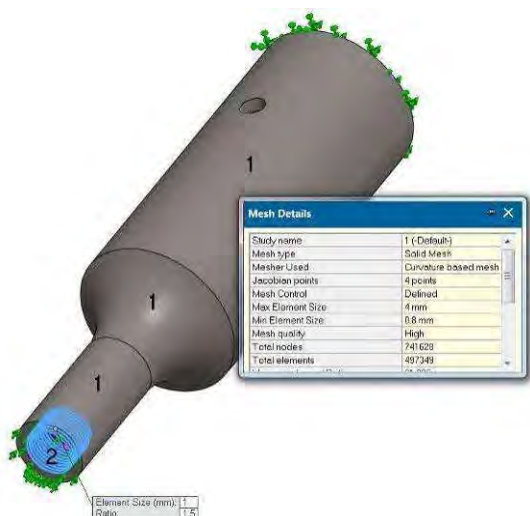


Fig. 4.27 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 1

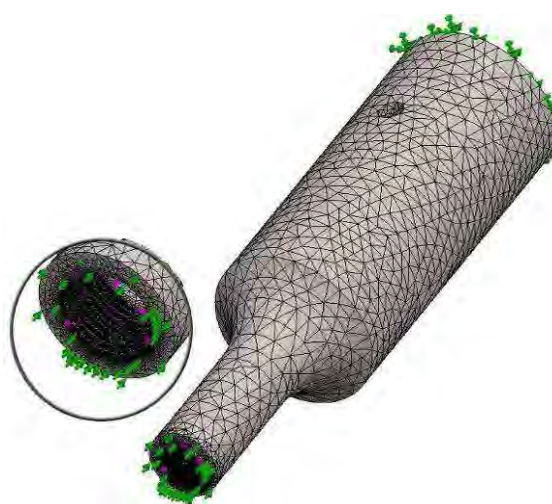


Fig. 4.28 Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 1

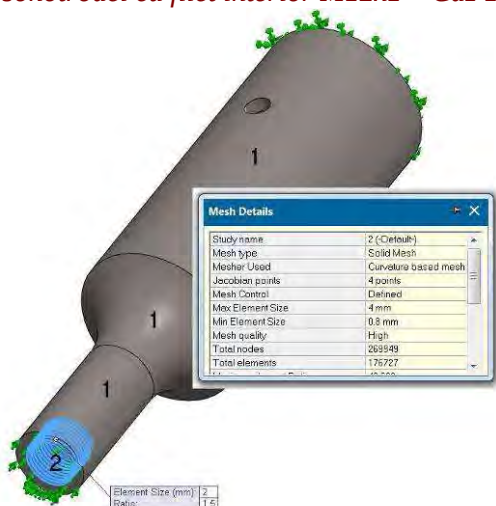


Fig. 4.29 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 2

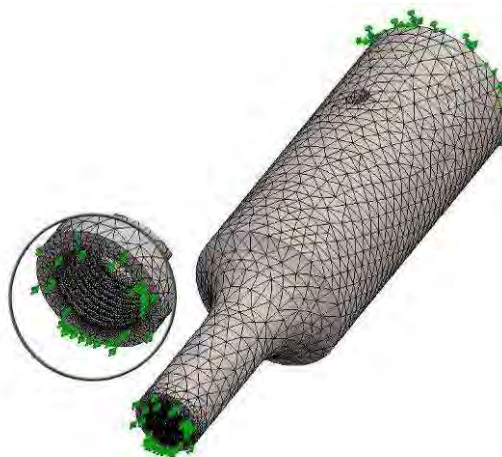


Fig. 4.30 Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 2

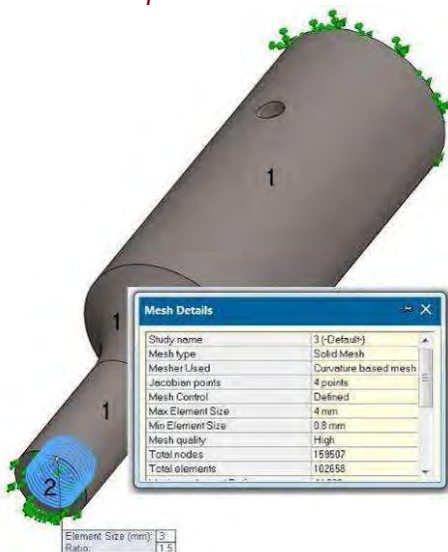


Fig. 4.31 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 3

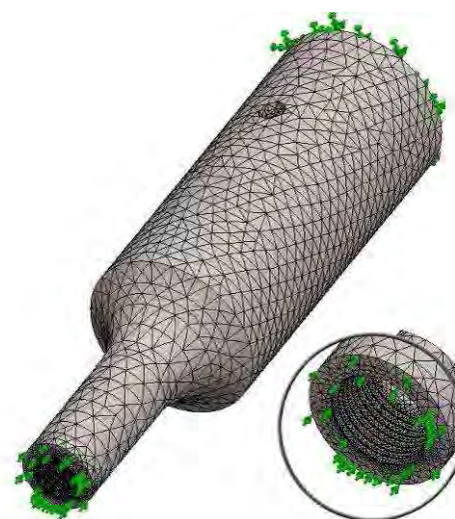


Fig. 4.32 Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 3

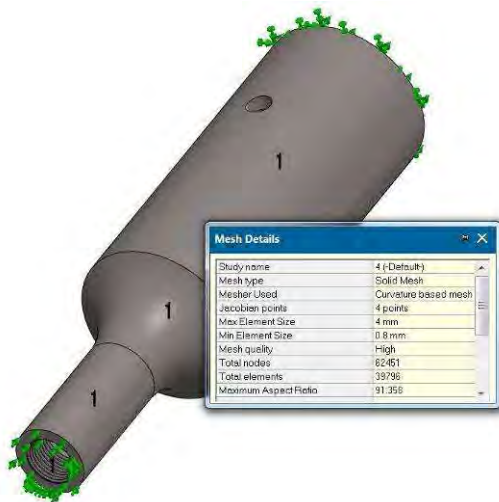


Fig. 4.33 Condiții de discretizare aplicate sonotrodei cu filet interior M12x1 – Caz 4

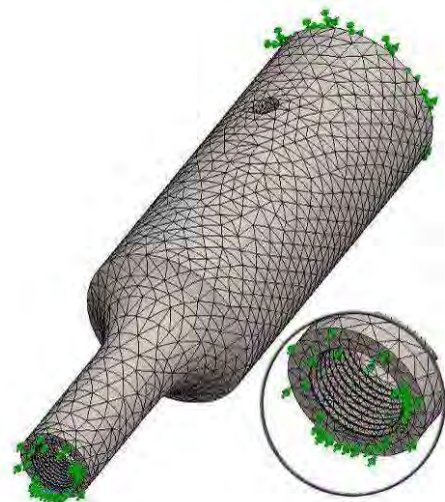


Fig. 4.34 Discretizare sonotrodă cu filet interior M12x1 – Caz 4

Tabelele 4.6 și 4.7 centralizează rezultatele analizei statice pentru cele 3 geometrii (filete interioare M12x1, M10x1 și M8x1) și 4 cazuri de discretizare, comparativ cu valorile corespunzătoare pentru geometria cu filet exterior M12x1. Comparăția convergenței rezultatelor analizelor statice (tensiunea von Mises) pentru sonotrodele cu filet exterior M12x1 respectiv cu filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1) este prezentată grafic în figura 4.35, iar hărțile de culori în figurile 4.36, 4.37, 4.38. Calculul la oboseală pentru sonotrodele cu filet interior se va baza pe cazul 1 din analizele statice, punct marcat prin cruce în figura 4.35.

Tensiuni von Mises obținute din analiză statică pentru sonotrode cu filet interior

Tabel 4.6

Caz	Filet interior M8x1		Filet interior M10x1		Filet interior M12x1		Filet exterior M12x1	
	Număr elemente finite	$\sigma_{\text{von Mises}}$ max	Număr elemente finite	$\sigma_{\text{von Mises}}$ max	Număr elemente finite	$\sigma_{\text{von Mises}}$ max	Număr elemente finite	$\sigma_{\text{von Mises}}$ max
		MPa		MPa		MPa		MPa
1	393376	394.6	449544	475.7	497349	545.5	459774	600.0
2	144123	359.5	158874	451.5	176727	514.9	207807	614.0
3	84233	350.3	92252	394.4	102658	501.9	152074	588.0
4	37746	297.5	38953	338.6	39796	512.4	-	-

Deplasări obținute din analiză statică pentru sonotrode cu filet interior

Tabel 4.7

Caz	Filet interior M8x1		Filet interior M10x1		Filet interior M12x1		Filet exterior M12x1	
	Număr elemente finite	Deplasare	Număr elemente finite	Deplasare	Număr elemente finite	Deplasare	Număr elemente finite	Deplasare
		μm		μm		μm		μm
1	393376	50.067	449544	50.087	497349	50.123	459774	50.0937
2	144123	50.067	158874	50.087	176727	50.122	207807	50.0946
3	84233	50.067	92252	50.087	102658	50.123	152074	50.0947
4	37746	50.067	38953	50.087	39796	50.122	-	-

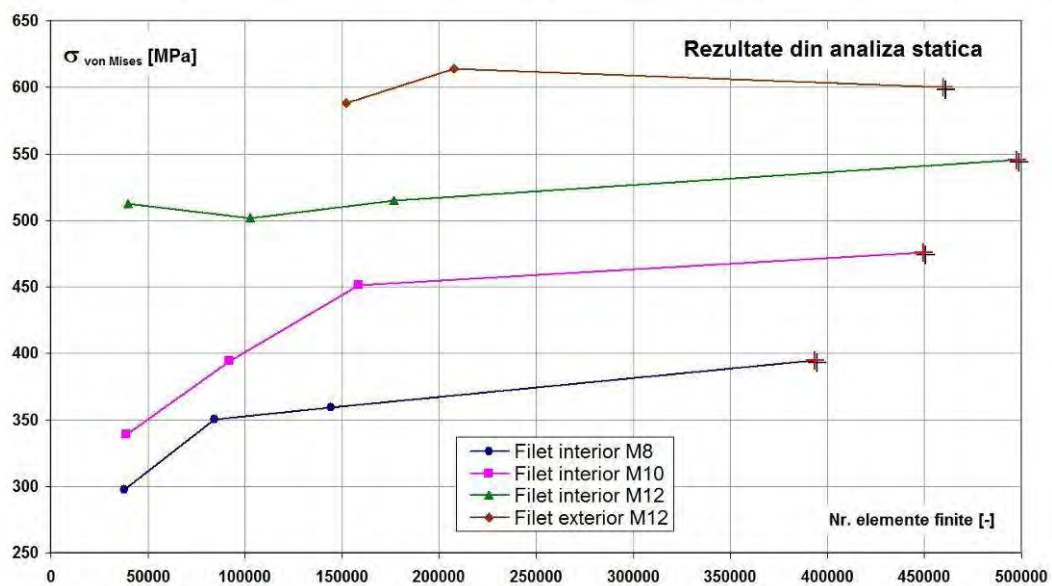


Fig. 4.35 Comparația convergenței rezultatelor analizei statice pentru sonotrodele cu filet exterior (M12x1), respectiv cu filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1)

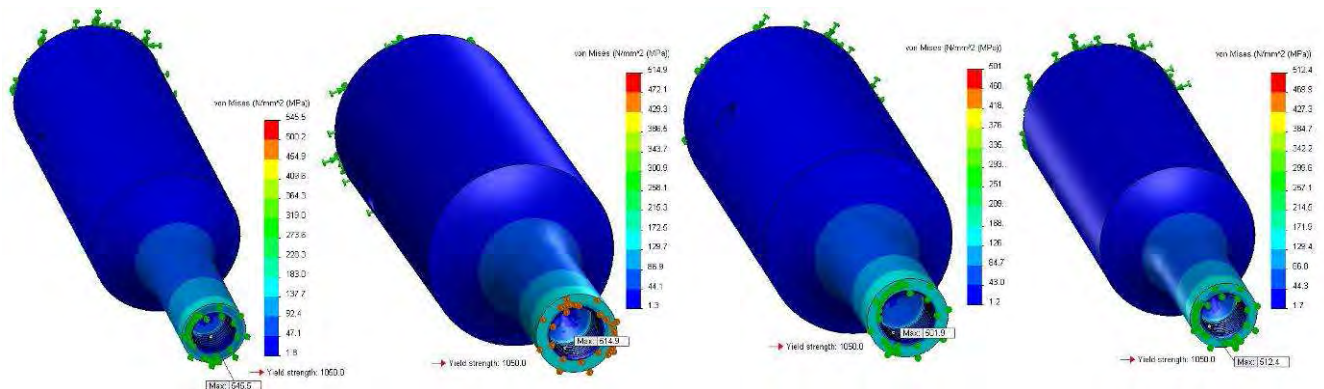


Fig. 4.36 Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M12x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 545.1$ MPa ; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 514.9$ MPa ; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 501.9$ MPa ; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 512.4$ MPa

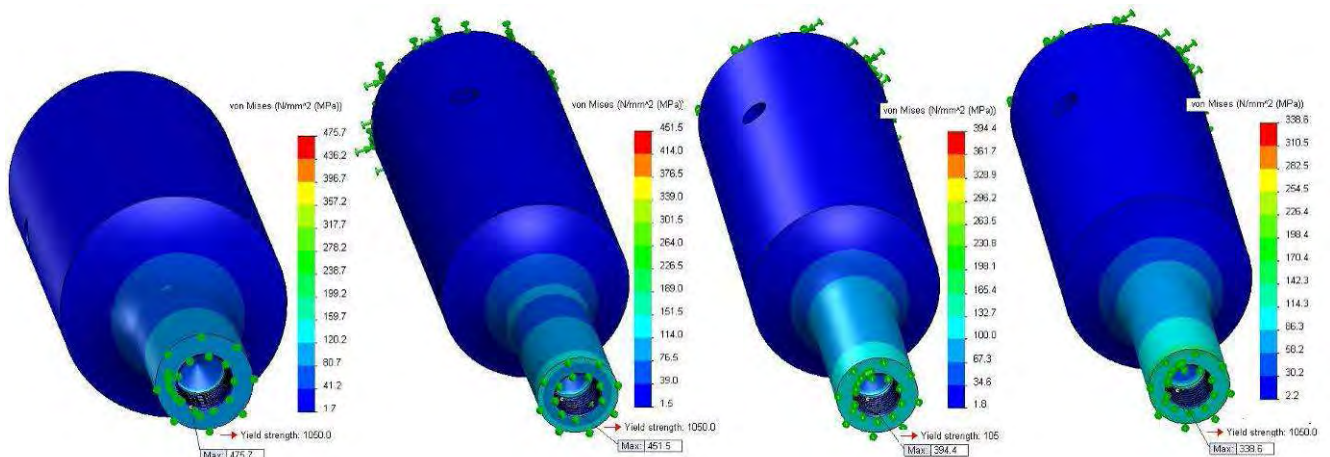


Fig. 4.37 Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M10x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 475.7$ MPa ; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 451.5$ MPa ; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 394.4$ MPa ; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}} = 338.6$ MPa

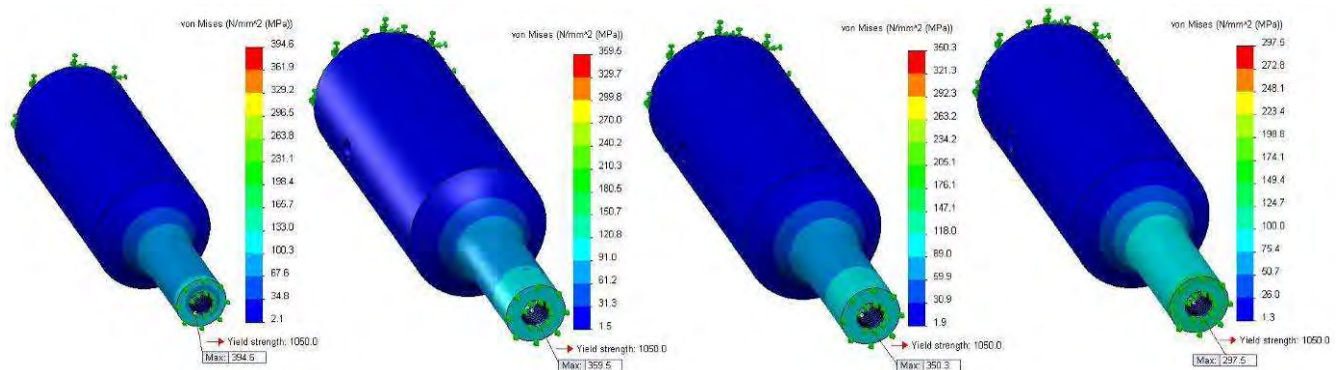


Fig. 4.38 Tensiunea von Mises Sonotroda cu filet interior M8x1 Caz 1 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=394.6 \text{ MPa}$; Caz 2 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=359.5 \text{ MPa}$; Caz 3 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=350.3 \text{ MPa}$; Caz 4 - $\sigma_{\text{von Mises max}}=297.5 \text{ MPa}$

4.2.6 Calculul la oboseală al sonotrodelor reproiectate cu filet interior

În cadrul prezentei analize, pentru sonotrodele cu filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1) calculul la oboseală va fi definit prin:

- o numărul de cicluri $N=10000000$;
- o tipul încărcării: alternant simetric (**Fully Reversed**), cu rația $R = -1$;
- o pentru sonotroda cu filet interior M12x1 calculul la oboseală se va baza pe cazul 1 din paragraful anterior, pentru care numărul de elemente finite este 497349, tensiunea maximă von Mises este 545.5 MPa, iar deplasarea maximă este de 50.123 μm ;
- o pentru sonotroda cu filet interior M10x1 calculul la oboseală se va baza pe cazul 1 din paragraful anterior, pentru care numărul de elemente finite este 449544, tensiunea maximă von Mises este 475.7 MPa, iar deplasarea maximă este de 50.087 μm ;
- o pentru sonotroda cu filet interior M8x1 calculul la oboseală se va baza pe cazul 1 din paragraful anterior, pentru care numărul de elemente finite este 393376, tensiunea maximă von Mises este 394.6 MPa, iar deplasarea maximă este de 50.067 μm .

Rezultatele calculului la oboseală se prezintă sub forma hărților de culori corespunzătoare următoarelor mărimi:

- o pentru sonotroda cu filet interior M12x1 - durata de viață (**Total Life**), procentul de distrugere (**Damage Percentage**), coeficientul de încărcare (**Load factor**) – figura 4.39, tabelul 4.8;
- o pentru sonotroda cu filet interior M10x1 - coeficientul de încărcare (**Load factor**) – figura 4.40, tabelul 4.9;
- o pentru sonotroda cu filet interior M8x1 - coeficientul de încărcare (**Load factor**) – figura 4.41, tabelul 4.10.

Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M12x1

Tabel 4.8

Mărime	Simbol / relație	UM	Valoare	Preluată din
Numărul de cicluri	N	Cicluri	10000000	Data de intrare
Durata de viață	Life = N-ΔN	Cicluri	5072270	Figura 4.39
Diferența de cicluri	ΔN = N-Life	Cicluri	4927730	Calcul
Procentul de distrugere	N x 100 / Life	%	197.2	Figura 4.39
Tensiune alternantă maximă în piesă	$\sigma_{\max}$	MPa	545.1	Analiza statică
Tensiune alternantă de pe curba SN a materialului Ti-6Al-4V pentru numărul de cicluri specificat 1×10^7	σ_{SN}	MPa	537.79	Figura 4.18 Tabel 4.3
Coeficientul de încărcare	$\sigma_{\text{SN}} / \sigma_{\max}$	-	0.987	Figura 4.39

Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M10x1

Tabel 4.9

Mărime	Simbol / relație	UM	Valoare	Preluată din
Numărul de cicluri	N	Cicluri	10000000	Data de intrare
Durata de viață	Life = N-ΔN	Cicluri	10000000	SolidWorks Fatigue
Diferența de cicluri	ΔN = N-Life	Cicluri	0	Calcul
Procentul de distrugere	N x 100 / Life	%	100.0	SolidWorks Fatigue
Tensiune alternantă maximă în piesă	$\sigma_{\max}$	MPa	475.7	Analiza statică
Tensiune alternantă de pe curba SN a materialului Ti-6Al-4V pentru numărul de cicluri specificat 1×10^7	σ_{SN}	MPa	537.79	Figura 4.18 Tabel 4.3
Coeficientul de încărcare	$\sigma_{\text{SN}} / \sigma_{\max}$	-	1.131	Figura 4.40

Rezultate ale calculului la oboseală pentru sonotroda cu filet interior M8x1

Tabel 4.10

Mărime	Simbol / relație	UM	Valoare	Preluată din
Numărul de cicluri	N	Cicluri	10000000	Data de intrare
Durata de viață	Life = N-ΔN	Cicluri	10000000	SolidWorks Fatigue
Diferența de cicluri	ΔN = N-Life	Cicluri	0	Calcul
Procentul de distrugere	N x 100 / Life	%	100.0	SolidWorks Fatigue
Tensiune alternantă maximă în piesă	$\sigma_{\max}$	MPa	394.6	Analiza statică
Tensiune alternantă de pe curba SN a materialului Ti-6Al-4V pentru numărul de cicluri specificat 1×10^7	σ_{SN}	MPa	537.79	Figura 4.18 Tabel 4.3
Coeficientul de încărcare	$\sigma_{\text{SN}} / \sigma_{\max}$	-	1.363	Figura 4.41

Relațiile de calcul utilizate în **tabelele 4.8÷4.10** sunt următoarele:

$$\text{Durata de viață: Life} = N - \Delta N \quad (4.2)$$

$$\text{Diferența de cicluri: } \Delta N = N - \text{Life} \quad (4.3)$$

$$\text{Procentul de distrugere: } N \times 100 / \text{Life} \quad (4.4)$$

$$\text{Coeficientul de încărcare: } \sigma_{\text{SN}} / \sigma_{\max} \quad (4.5)$$

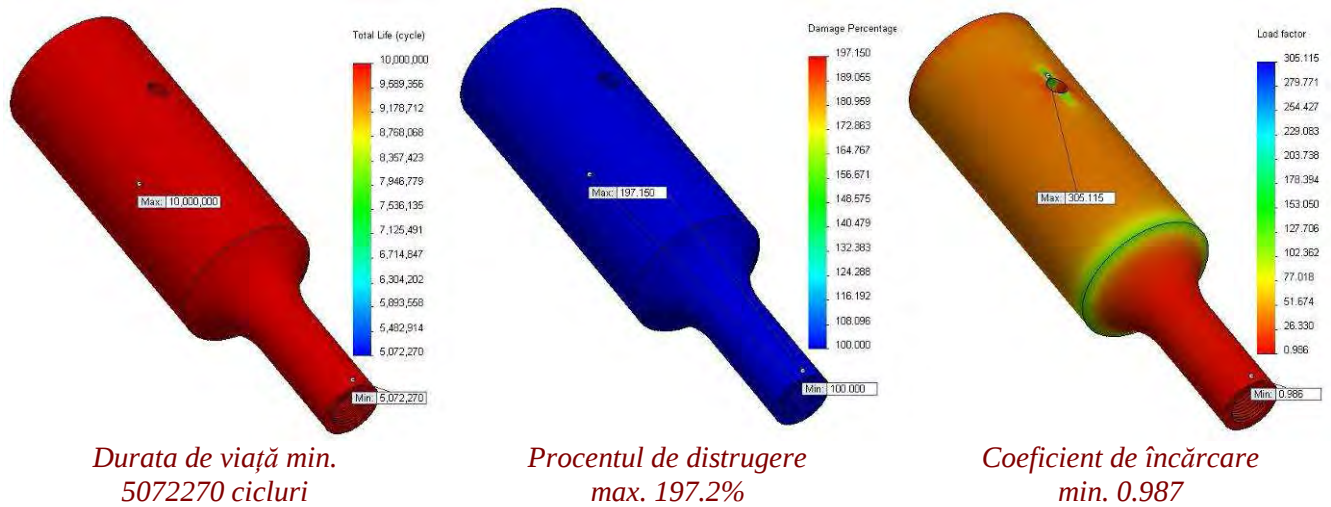


Fig. 4.39 Sonotroda cu filet interior M12x1

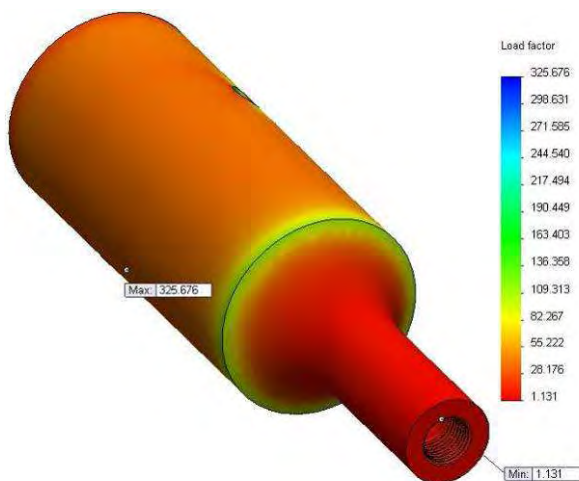


Fig. 4.40 Sonotroda cu filet interior M10x1
Coefficient de încărcare min. 1.131

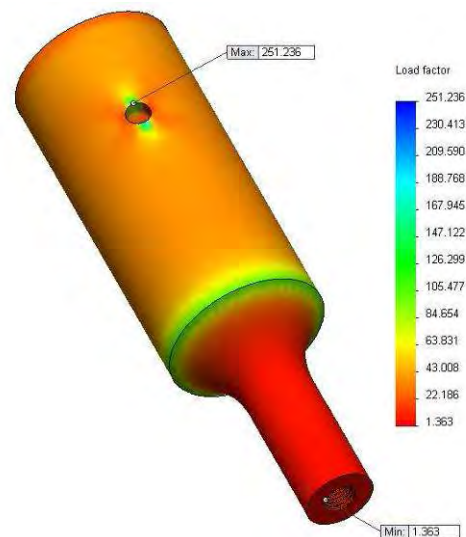


Fig. 4.41 Sonotroda cu filet interior M8x1
Coefficient de încărcare min. 1.363

Pentru numărul de cicluri impus în analiză 1×10^7 , din curba materialului Ti-6Al-4V, preluată din biblioteca SolidWorks, rezultă tensiunea $\sigma_{SN} = 537.79107$ MPa. Plasarea celor mai defavorabile puncte pentru sonotroda cu filet exterior M12x1 și pentru sonotrodele cu filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1) este prezentată comparativ în figura 4.42, din care se observă că:

- o pentru varianta cu filet exterior M12x1 punctul este situat deasupra curbei $\sigma_{max} > \sigma_{SN}$ ($\sigma_{max} = 600$ MPa), deci ruperea prin oboseală se va produce; aceeași concluzie rezultă și din valoarea coeficientul de încărcare subunitar 0.897, conform tabel 4.4 respectiv figura 4.22; durata de viață este calculată la 1140785 cicluri, conform tabel 4.4 respectiv figura 4.20;

- o pentru varianta cu filet interior M12x1 punctul este situat pe curbă $\sigma_{\max} \approx \sigma_{SN}$ ($\sigma_{\max} = 545.1$ MPa), ceea ce corespunde inițierii ruperii prin oboseală; aceeași concluzie rezultă și din valoarea coeficientul de încărcare subunitar 0.987 dar apropiat de 1, conform **tabel 4.8** respectiv **figura 4.39**; durata de viață este calculată la 5072270 cicluri, conform **tabel 4.8** respectiv **figura 4.39**;
- o pentru variantele cu filet interior, M10x1 și M8x1, punctul este situat sub curbă $\sigma_{\max} < \sigma_{SN}$, ($\sigma_{\max} = 475.7$ MPa - varianta M10x1 respectiv $\sigma_{\max} = 394.6$ MPa - varianta M8x1) ceea ce înseamnă că fenomenul de rupere nu va apare; evident marja de siguranță este mai mare pentru varianta filet M8x1 comparativ cu varianta de filet M10x1; aceeași concluzie rezultă și din valoarea coeficientul de încărcare supraunitar (1.131 - varianta M10x1 respectiv 1.363 - varianta M8x1), conform **tabel 4.9** și **4.10** respectiv **figura 4.40** și **4.41**; referitor la durata de viață, din **tabelele 4.9** și **4.10** rezultă valoarea 1×10^7 , care însă este generată de program deoarece, pentru numărul de cicluri impus în analiză 1×10^7 - care corespunde ultimului punct al curbei SN - programul va utiliza în calcul punctul de capăt al acestei curbe; valoarea reală a duratei de viață s-ar putea obține corect dacă orizontala dusă prin ordonata $\sigma_{\max}$ s-ar intersecta cu prelungirea curbei SN.

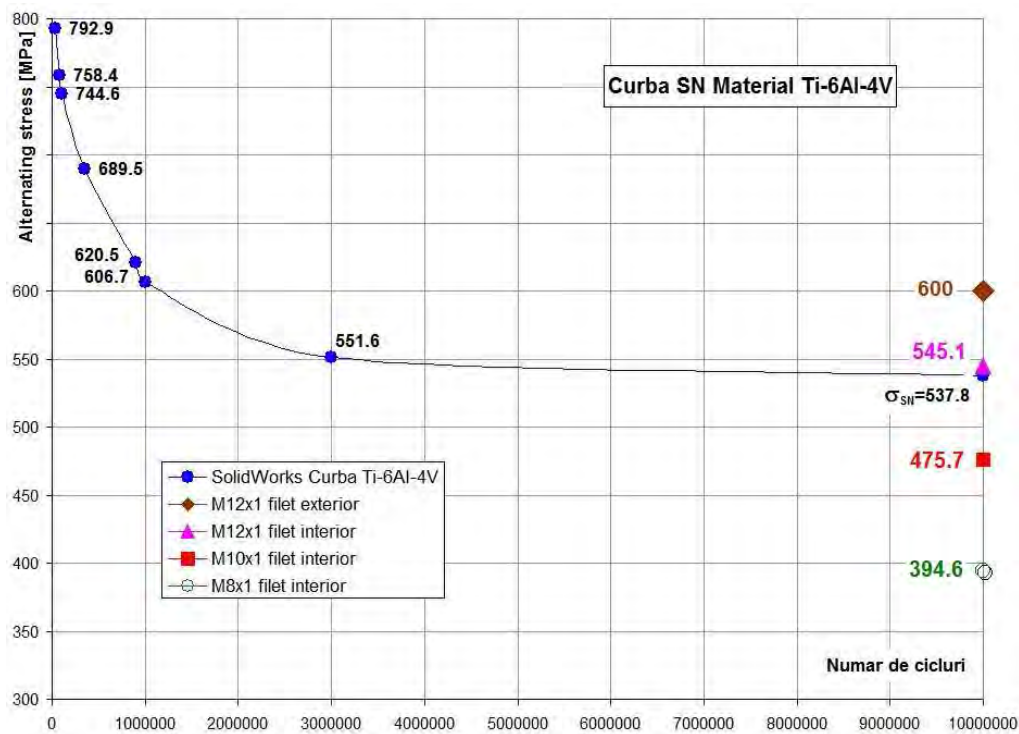


Fig. 4.42 Sonotrode cu filet exterior (M12x1) și filete interioare (M12x1, M10x1 și M8x1). Poziționarea punctelor cele mai defavorabile în diagrama SN

În concluzie, soluția de evitare a ruperii prin oboseală o reprezintă varianta cu filet interior M10x1 sau M8x1, soluții care corespund geometriilor din **figura 4.25** respectiv **4.26**.

4.3 Calibrarea unei sonotrode cu filet interior M12x1 din titan și știft intermediar pentru încercări de eroziune de cavitațională prin metoda directă

4.3.1 Introducere

Obiectivul acestui subcapitol este de a prezenta cercetările realizate pentru calibrarea unei sonotrode destinate testării eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda directă. În cazul cavitației directe, epruveta este atașată la vârful sonotrodei prin intermediul unei asamblări filetate. Prin calibrare se urmărește atingerea frecvenței proprii de 20000 Hz a sonotrodei asamblate cu proba, frecvență impusă de standardul [124]. Plecând de la o geometrie impusă, calibrarea se va realiza prin scurtarea lungimii sonotrodei. Verificarea frecvenței se va realiza prin măsurarea directă a acesteia, comparativ cu cea calculată prin analiza modală efectuată prin intermediul programului SolidWorks. Abaterea de la frecvența se poate încadra în domeniul 20000 ± 500 Hz. Determinarea experimentală a frecvenței proprii se realizează prin procedura detaliată în & 3.2.6.

Pentru a putea refolosi atât sonotroda fisurată din titan (figura 4.3), cât și epruvetele deja existente cu filet exterior M12x1, soluția a fost modificarea sonotrodei originale fisurate din titan prin eliminarea filetului exterior și crearea unui filet interior M12x1 și asamblarea cu epruveta prin intermediul unui știft intermediar M12x1 de lungime inițială 16 mm. Știftul intermediar s-a impus constructiv, deoarece, în această nouă soluție, atât sonotroda cât și epruveta aveau filet interior.

4.3.2 Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă

Geometria 3D buster-sonotrodă-probă s-a realizat în aplicația SolidWorks [76] și se prezintă în figura 4.43.a, iar elementele componente în figura 4.43.b. Epruveta este asamblată cu sonotrodă prin intermediul unui știft intermediar M12 x 1. Sonotroda se assemblează cu busterul printr-un știft prin intermediul tijei buster. Busterul este prevăzut cu 6 șuruburi de fixare. Sonotroda este generată prin revoluția conturului din figura 4.44 în jurul axei de simetrie.

4.3.3 Etape pentru calculul frecvenței proprii prin analiză modală în SolidWorks

Pentru calculul frecvenței proprii se parcurg următoarele etape:

- a) Creare geometrie piese în SolidWorks: buster, sonotrodă, știft filetat M12x1, știft filetat buster-sonotrodă, tijă buster, șurub filetare buster, epruvetă;
- b) Creare ansamblu 3D piese în SolidWorks: buster + sonotrodă + epruvetă;
- c) Activare modul *Simulation*:
 - o Click *Tools* → *Add-Ins*;

- o Selecție modul *Simulation*; bara de meniu *Simulation* se va adăuga la meniul principal.
- d) Creare studiu de simulare de tip frecvență și denumire studiu; din opțiunea studiului de tip frecvență se activează *Properties*, unde se setează numărul modurilor de frecvență calculate, în cazul de față 25 de moduri;
- e) Selecția material din librăria de materiale SolidWorks; pentru sonotrodă se va selecta materialul *Ti-6Al-4V*, iar pentru restul pieselor *Alloy Steel*;
- f) Aplicare restrângeri; ansamblul este fixat în partea superioară pe cele 6 șuruburi de fixare ale busterului prin opțiunea *Fixed Geometry*;
- g) discretizare în elemente finite (*mesh*) și calcul analiză;
- h) Vizualizare rezultate; pentru identificarea modurilor de vibrație axiale (direcția axială fiind orientată pe axa Y a sistemului de referință) se va activa opțiunea *List Mass Participation*, care va afișa tabelar, **figura 4.45**, numărul de ordine al modului de vibrație, frecvența calculată și coeficientul de participare masică pe direcțiile normalizate X, Y și Z; dintre cele 25 de moduri de vibrație calculate interesează numai cele axiale, adică cele pentru care coeficienții pe direcțiile X respectiv Z sunt nuli sau cu valori ne semnificative comparativ cu valoarea coeficientului pe direcția Y; pe ultima linie a tabelului se va afișa suma coeficienților pe cele 3 direcții;
- i) Reducerea lungimii sonotrodei, a cărei valoare de start este 129.50 mm (conform **figurii 4.44**) și reluarea calcului de frecvență proprie; obiectivul urmărit este apropierea frecvenței de lucru de valoarea de 20000 ± 500 Hz, simultan cu realizarea condiției ca modul de vibrație să fie de tip axial.

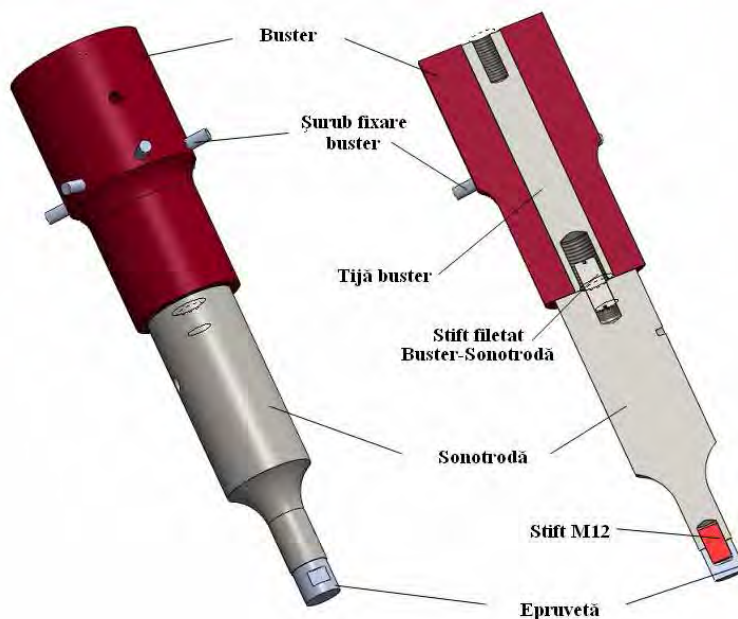


Fig. 4.43.a Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice



Fig. 4.43.b Elemente componente ale ansamblului 3D buster-sonotrodă-epruvetă

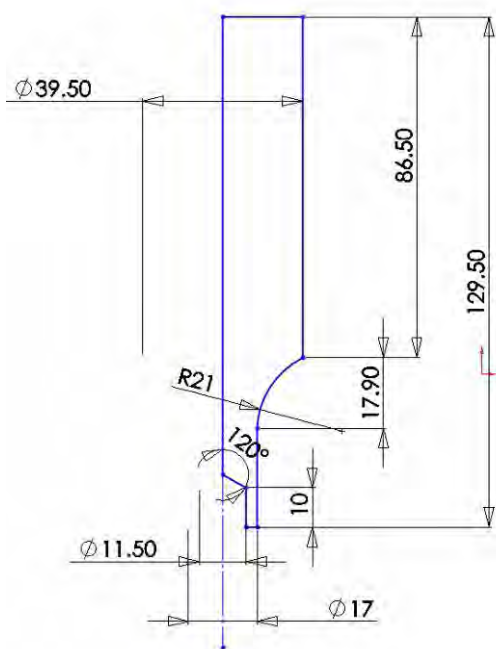


Fig. 4.44 Geometria sonotrodei din titan

Mass Participation (Normalized)

Study name: Fixare buster top

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z dir
1	966.68	0.35209	4.8715e-011	0.003
2	967.44	0.003623	2.7356e-010	0.352
3	3084.5	0.07419	8.8821e-010	3.682
4	3092.5	3.6764e-005	1.1201e-009	0.073
5	5438.7	2.4372e-008	2.4014e-008	1.834
6	6097.3	0.034628	5.6945e-007	7.235
7	6106.5	6.8294e-005	3.0126e-006	0.034

Close Save Help

Fig. 4.45 Coeficientul de participare masică pe direcțiile normalizate X, Y și Z

4.3.4 Rezultate obținute la calibrarea sonotrodei cu filet interior M12x1 și știft intermediar

Pornind de la lungimea inițială de 129.5 mm a sonotrodei, lungimea acesteia s-a redus gradat, în 13 etape cu 3.8 mm, până la valoarea de 125.7, pentru care frecvența calculată și cea măsurată s-au încadrat în domeniul impus de 20000 ± 500 Hz. Reducerea lungimii s-a realizat pe strung, prin eliminarea unui cilindru de înălțime între $0.1 \div 0.71$ mm de la capătul sonotrodei cu diametrul cel mai mic al acesteia. Datorită acestei reduceri de lungime, începând de la un moment dat a fost necesară și scurtarea gradată a lungimii știftului.

Pentru fiecare din lungimile obținute ale sonotrodei s-a măsurat frecvența proprie simultan cu calcularea acesteia în SolidWorks prin analiză modală. Rezultatele sunt prezentate în tabelele și figurile specificate în **tabelul 4.11**:

Centralizator tabele și figuri pentru rezultate obținute la calibrarea sonotrodei cu filet interior M12x1 din titan și știft intermediar

Tabel 4.11

Lungime Sonotrodă L mm	Lungime eliminată ΔL mm	Număr figură cu schiță sonotrodă	Număr figură cu înregistrarea frecvenței măsurate	Tabel cu frecvențe calculate
129.50	0	Figura 4.46	Figura 4.47	Tabel 4.12
129.15	0.41	Figura 4.48	Figura 4.49	Tabel 4.13
128.93	0.22	Figura 4.50	Figura 4.51	Tabel 4.14
128.67	0.26	Figura 4.52	Figura 4.53	Tabel 4.15
128.51	0.16	Figura 4.54	Figura 4.55	Tabel 4.16
128.17	0.34	Figura 4.56	Figura 4.57	Tabel 4.17
127.72	0.45	Figura 4.58	Figura 4.59	Tabel 4.18
127	0.72	Figura 4.60	Figura 4.61	Tabel 4.19
126.3	0.7	Figura 4.62	Figura 4.63	Tabel 4.20
126.2	0.1	Figura 4.64	Figura 4.65	Tabel 4.21
126.1	0.1	Figura 4.66	Figura 4.67	Tabel 4.22
125.9	0.2	Figura 4.68	Figura 4.69	Tabel 4.23
125.7	0.2	Figura 4.70	Figura 4.71	Tabel 4.24
Suma	3.8			

Pe fiecare tabel cu frecvențe calculate sunt marcate cu fundal galben modurile de vibrație axiale, iar cu linie îngroșată modul de vibrație axial cel mai apropiat de valoarea de 20000 Hz.

În partea dreapta a figurilor cu înregistrarea frecvenței măsurate rezultă valoarea numerică a frecvenței, iar în figură se poate observa saltul corespunzător acesteia.

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=129.5$ mm

Tabel 4.12

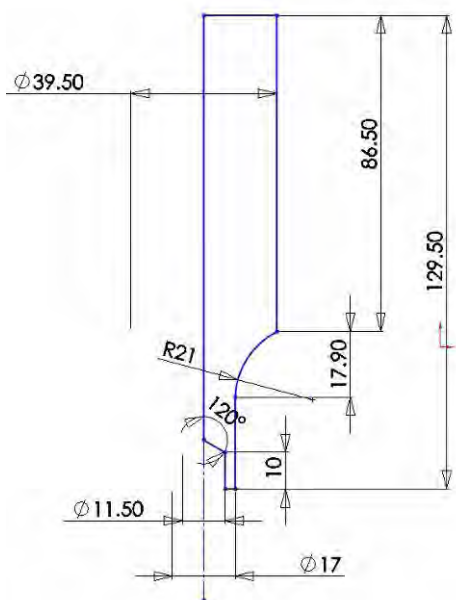


Fig. 4.46 Schiță sonotrodă: $L=129.5$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1193.3	0.249900	0.000000	0.000001
2	1196.4	0.000002	0.000000	0.250530
3	3603.1	0.073467	0.000000	0.000117
4	3610.9	0.000116	0.000000	0.072517
5	6059.4	0.000001	0.000000	0.000000
6	6454.4	0.006366	0.000000	0.000003
7	6475	0.000001	0.000001	0.005195
8	7343.5	0.387780	0.000021	0.024754
9	7345	0.024609	0.000001	0.389430
10	7421.5	0.000011	0.618790	0.000004
11	12483	0.000016	0.000000	0.000000
12	12780	0.091126	0.000000	0.000026
13	12811	0.000022	0.000001	0.089785
14	13376	0.000005	0.000000	0.000000
15	14532	0.000000	0.338460	0.000000
16	15023	0.000000	0.000001	0.000000
17	18125	0.069053	0.000000	0.012396
18	18135	0.011981	0.000001	0.071565
19	19034	0.000000	0.013287	0.000005
20	21099	0.000760	0.000000	0.042044
21	21125	0.043808	0.000000	0.000729
22	23884	0.000019	0.000000	0.001169
23	23968	0.001619	0.000000	0.000013
24	24385	0.000000	0.000618	0.000000
25	24721	0.000000	0.000000	0.000000

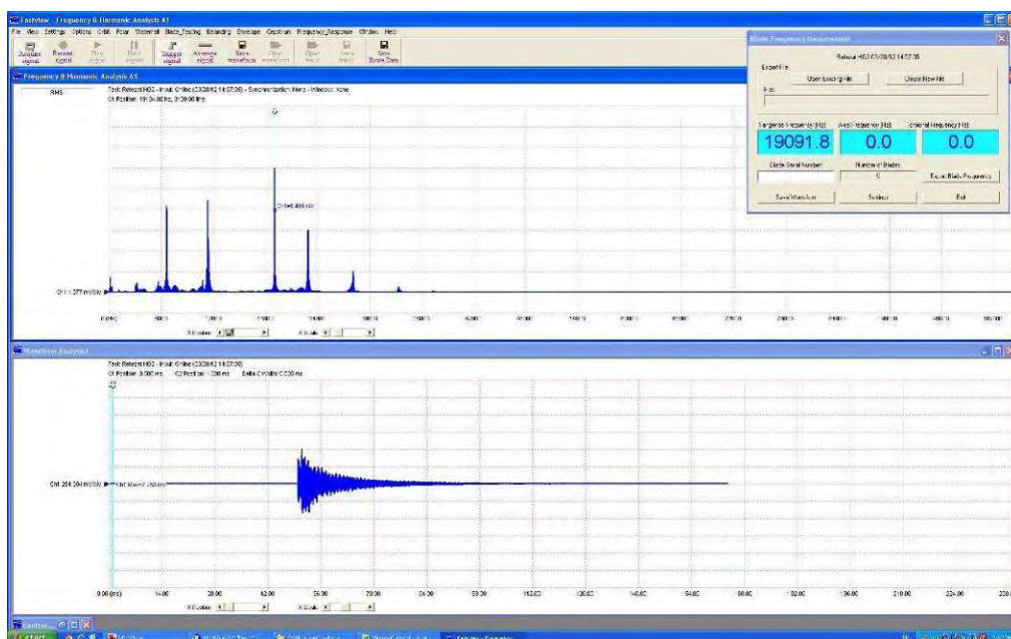


Fig. 4.47 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=129.5$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=129.15$ mm

Tabel 4.13

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1208.6	0.245100	0.000000	0.000595
2	1211.7	0.000594	0.000000	0.245790
3	3508.1	0.072130	0.000000	0.000781
4	3515.3	0.000780	0.000000	0.071296
5	6144.3	0.000001	0.000000	0.000000
6	6462.1	0.006318	0.000000	0.000004
7	6484.2	0.000002	0.000000	0.005134
8	7348.5	0.412460	0.000001	0.005612
9	7350.2	0.005557	0.000012	0.414310
10	7483.1	0.000000	0.620690	0.000009
11	12475	0.000005	0.000000	0.000000
12	12876	0.090041	0.000000	0.000424
13	12907	0.000417	0.000002	0.088525
14	13221	0.000028	0.000000	0.000000
15	14546	0.000000	0.335490	0.000001
16	14904	0.000001	0.000000	0.000000
17	18012	0.065599	0.000000	0.010246
18	18018	0.009957	0.000008	0.068357
19	18937	0.000003	0.014277	0.000032
20	20950	0.000021	0.000000	0.047926
21	20979	0.049909	0.000000	0.000016
22	23902	0.000011	0.000000	0.001171
23	23984	0.001619	0.000000	0.000011
24	24476	1.84E-09	0.00069459	5.61E-08
25	25112	2.36E-10	6.48E-09	8.96E-10

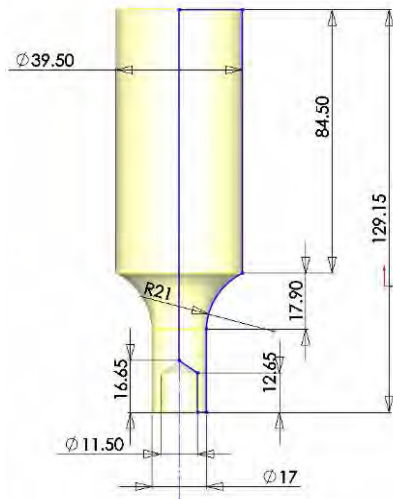


Fig. 4.48 Schiță sonotrodă: $L=129.15$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

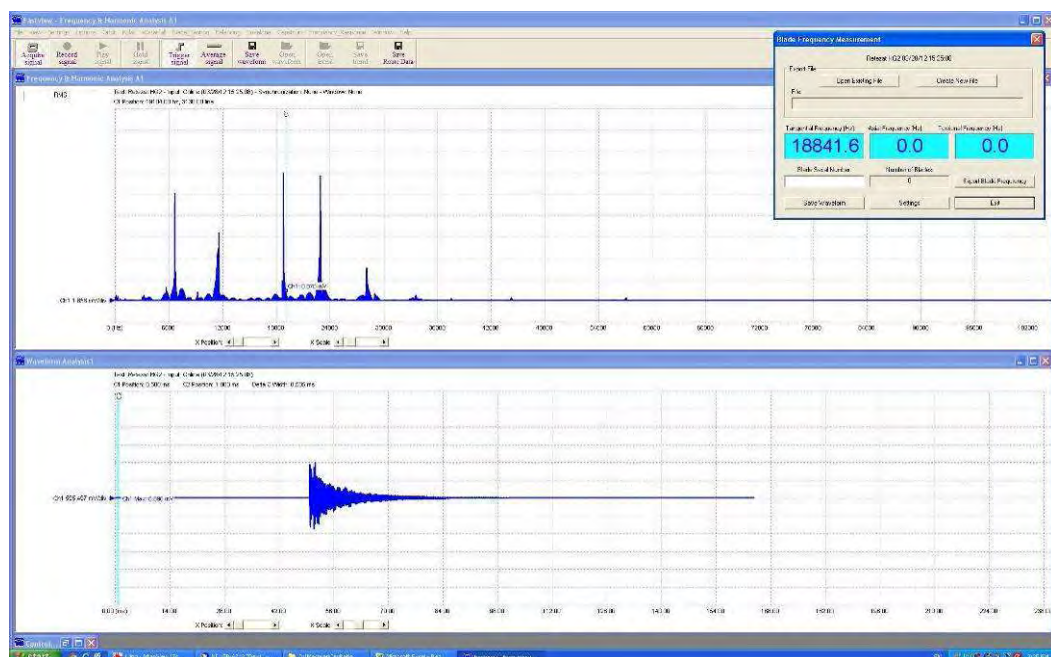


Fig. 4.49 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=129.15$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.93$ mm

Tabel 4.14

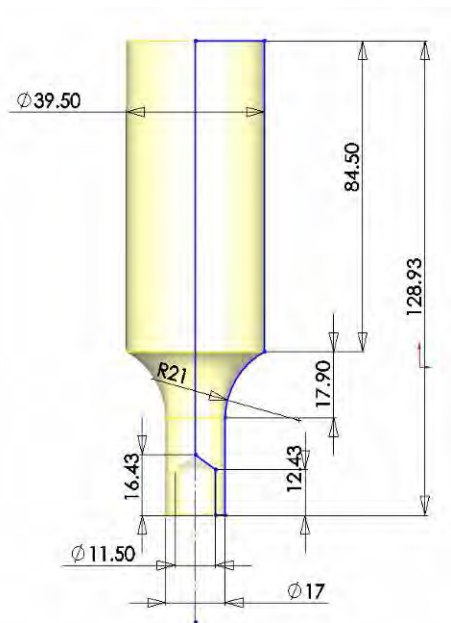


Fig. 4.50 Schiță sonotrodă: $L=128.93$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1221.3	0.244690	0.000000	0.001107
2	1224.4	0.001106	0.000000	0.245380
3	3512.3	0.070773	0.000000	0.000000
4	3518.3	0.000000	0.000000	0.069911
5	6148	0.000001	0.000000	0.000000
6	6442.5	0.007442	0.000001	0.000007
7	6462.4	0.000005	0.000001	0.006300
8	7345.1	0.291390	0.000002	0.127770
9	7347.4	0.126980	0.000000	0.292510
10	7510.6	0.000001	0.621830	0.000002
11	12479	0.000003	0.000000	0.000000
12	12907	0.091549	0.000000	0.000155
13	12938	0.000146	0.000001	0.090201
14	13214	0.000027	0.000000	0.000000
15	14553	0.000000	0.332610	0.000000
16	14868	0.000000	0.000000	0.000000
17	18155	0.036101	0.000004	0.044225
18	18161	0.042712	0.000003	0.037469
19	18713	0.000001	0.016013	0.000027
20	21067	0.000016	0.000000	0.043992
21	21099	0.045944	0.000000	0.000017
22	23921	0.000008	0.000000	0.001064
23	24001	0.001515	0.000000	0.000010
24	24214	0.000000	0.000539	0.000000
25	25092	2.20E-08	1.04E-08	4.16E-08

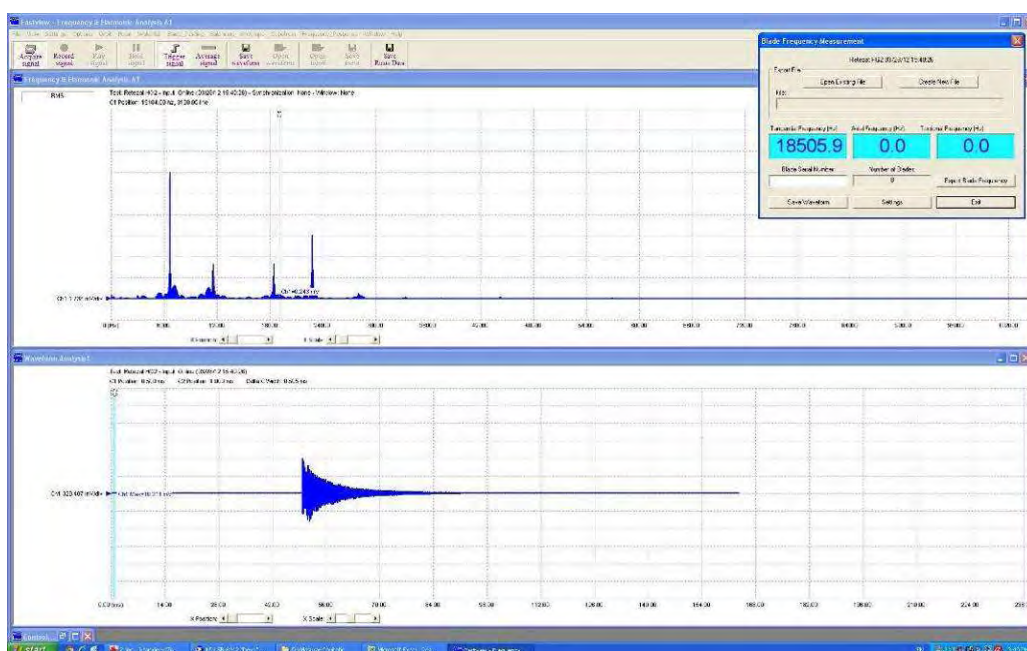


Fig. 4.51 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.93$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.67$ mm

Tabel 4.15

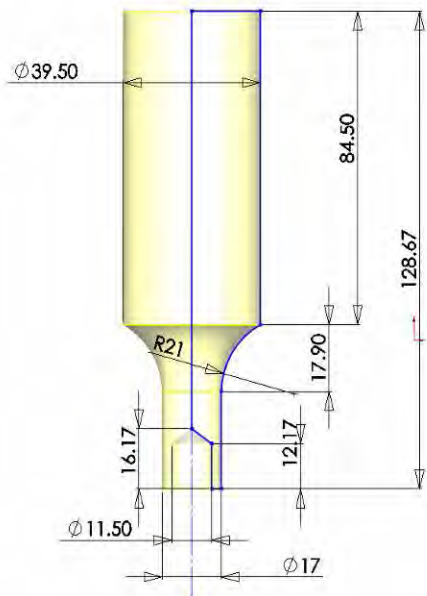


Fig. 4.52 Șchiță sonotrodă: $L=128.67$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1222.9	0.246050	0.000000	0.000182
2	1226	0.000182	0.000000	0.246710
3	3533.8	0.070875	0.000000	0.000018
4	3540.3	0.000017	0.000000	0.070019
5	6149.4	0.000001	0.000000	0.000000
6	6455	0.006813	0.000000	0.000004
7	6476.7	0.000003	0.000001	0.005676
8	7347.8	0.410210	0.000000	0.008669
9	7348.3	0.008583	0.000007	0.412100
10	7512.4	0.000000	0.622210	0.000003
11	12482	0.000002	0.000000	0.000000
12	12919	0.091617	0.000000	0.000297
13	12952	0.000291	0.000001	0.090165
14	13254	0.000015	0.000000	0.000000
15	14562	0.000000	0.332920	0.000000
16	14901	0.000001	0.000002	0.000000
17	18188	0.006344	0.000006	0.076030
18	18197	0.073341	0.000001	0.006661
19	18776	0.000002	0.015325	0.000025
20	21109	0.000002	0.000000	0.042650
21	21137	0.044703	0.000000	0.000001
22	23942	0.000011	0.000000	0.000992
23	24027	0.001416	5.72E-09	9.19E-06
24	24245	4.31E-08	0.000556	7.50E-09
25	25108	7.13E-09	2.87E-09	4.38E-09

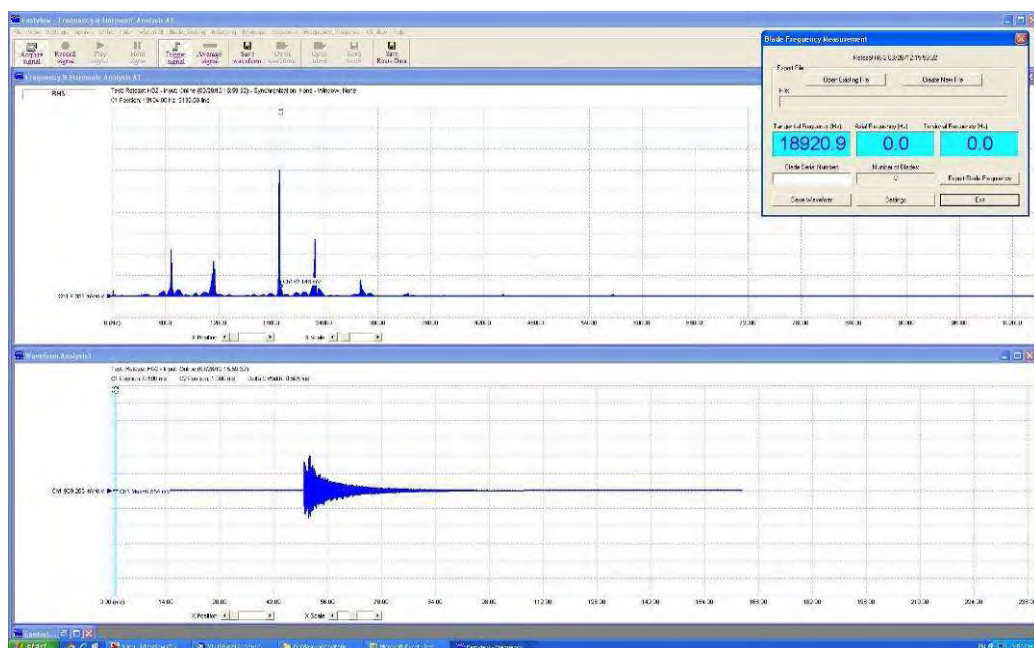


Fig. 4.53 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.67$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.51$ mm

Tabel 4.16

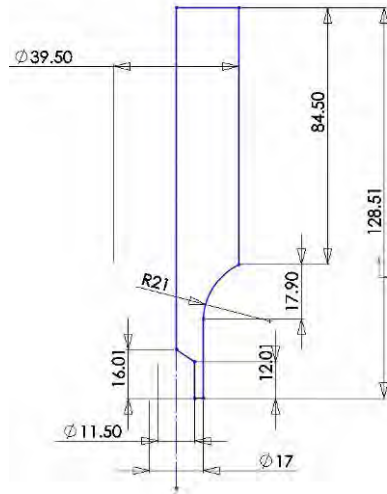


Fig. 4.54. Schiță sonotrodă: $L=128.51$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1223.8	0.246030	0.000000	0.000399
2	1226.9	0.000398	0.000000	0.246740
3	3547.5	0.070945	0.000000	0.000037
4	3553.8	0.000034	0.000000	0.070057
5	6149.5	0.000001	0.000000	0.000000
6	6464.5	0.006300	0.000000	0.000003
7	6485	0.000000	0.000002	0.005266
8	7348.9	0.364820	0.000001	0.054822
9	7351.4	0.054385	0.000005	0.366190
10	7514.8	0.000000	0.622200	0.000006
11	12479	0.000004	0.000000	0.000000
12	12928	0.091167	0.000001	0.000685
13	12961	0.000667	0.000003	0.089787
14	13275	0.000018	0.000000	0.000000
15	14575	0.000000	0.333260	0.000000
16	14921	0.000001	0.000004	0.000000
17	18212	0.013793	0.000001	0.068662
18	18220	0.066404	0.000000	0.014403
19	18817	0.000001	0.014899	0.000007
20	21132	0.000070	0.000000	0.042024
21	21165	0.044071	0.000000	0.000061
22	23958	0.000000	0.000000	0.000949
23	24046	0.001332	2.65E-08	6.11E-07
24	24263	1.19E-08	0.000571	9.16E-08
25	25112	1.85E-09	7.04E-09	2.65E-08

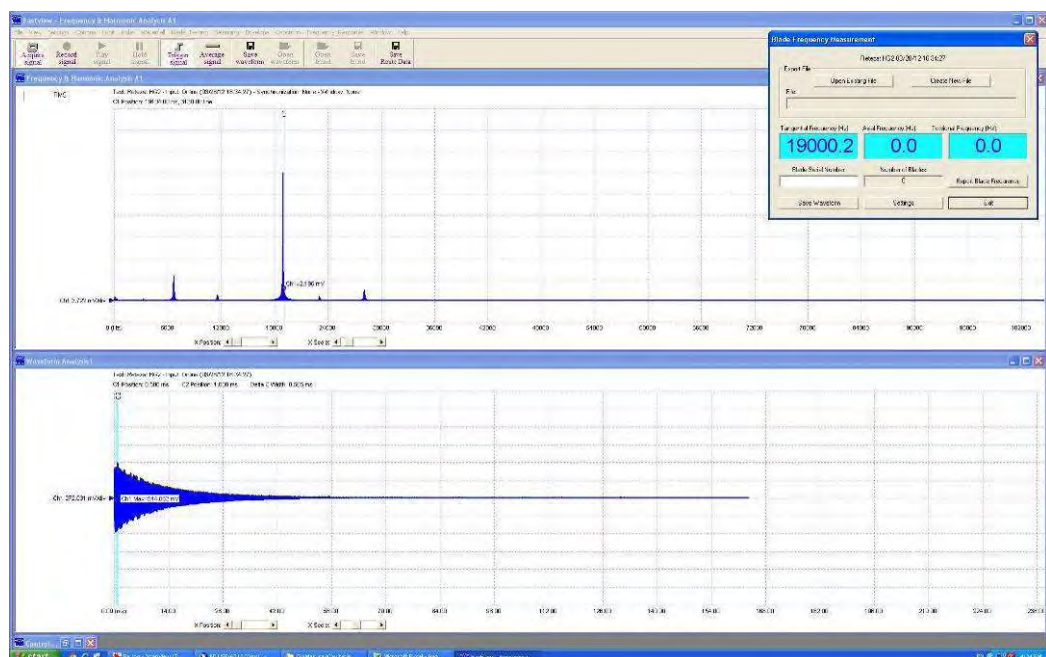


Fig. 4.55 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.51$ mm

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Frecvența măsurată pentru
lungimea sonotrodei $L=128.17$ mm

Tabel 4.17

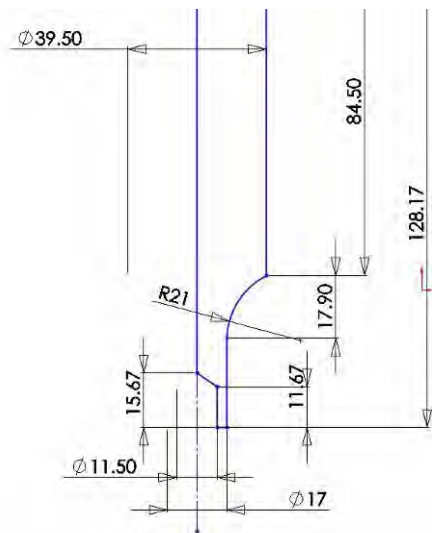


Fig. 4.56 Schiță sonotrodă: $L=128.17$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1225.8	0.246610	0.000000	0.000324
2	1228.9	0.000325	0.000000	0.247270
3	3575.7	0.070886	0.000000	0.000231
4	3583.2	0.000225	0.000000	0.069982
5	6149.4	0.000000	0.000000	0.000000
6	6481.8	0.005310	0.000000	0.000001
7	6502.3	0.000000	0.000000	0.004191
8	7349.8	0.001553	0.000017	0.420310
9	7351.5	0.418170	0.000000	0.001579
10	7515.5	0.000000	0.623040	0.000009
11	12482	0.000002	0.000001	0.000001
12	12945	0.092082	0.000000	0.000077
13	12980	0.000075	0.000000	0.090671
14	13323	0.000013	0.000000	0.000000
15	14571	0.000000	0.333290	0.000000
16	14965	0.000001	0.000000	0.000000
17	18257	0.012415	0.000006	0.071237
18	18264	0.068994	0.000004	0.012909
19	18887	0.000008	0.014133	0.000034
20	21192	0.000173	0.000000	0.040405
21	21216	0.042454	0.000000	0.000185
22	24005	0.000007	0.000000	0.000808
23	24086	0.001208	1.14E-07	4.78E-06
24	24312	5.78E-07	0.000595	2.39E-07
25	25112	3.64E-10	7.58E-08	4.53E-10

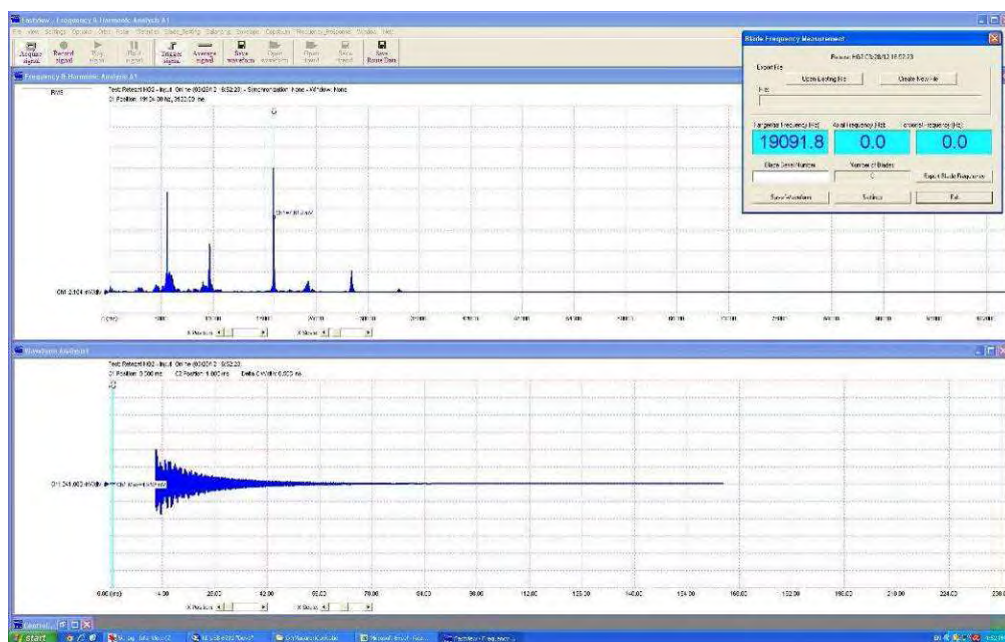


Fig. 4.57 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=128.17$ mm

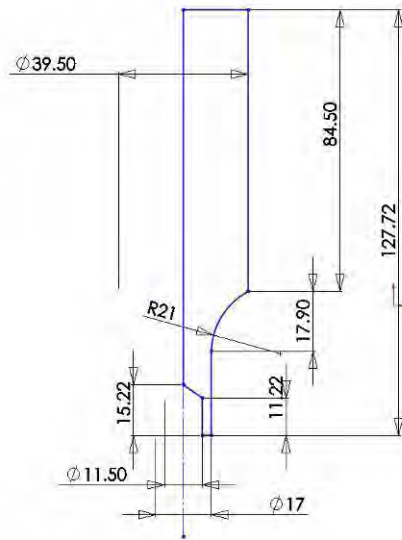


Fig. 4.58 Schiță sonotrodă: $L=127.72$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 16 mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=127.72$ mm

Tabel 4.18

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1228.4	0.247150	0.000000	0.000362
2	1231.5	0.000362	0.000000	0.247820
3	3614.2	0.071145	0.000000	0.000242
4	3621.6	0.000240	0.000000	0.070194
5	6151.9	0.000000	0.000000	0.000000
6	6507.1	0.004162	0.000000	0.000011
7	6526.4	0.000013	0.000002	0.003036
8	7357.1	0.416980	0.000001	0.003339
9	7358.1	0.003310	0.000034	0.418700
10	7521.1	0.000000	0.622940	0.000025
11	12489	0.000000	0.000000	0.000000
12	12971	0.091966	0.000000	0.000351
13	13007	0.000338	0.000005	0.090576
14	13385	0.000006	0.000000	0.000000
15	14594	0.000000	0.334230	0.000001
16	15024	0.000000	0.000002	0.000000
17	18312	0.004480	0.000003	0.080831
18	18317	0.078244	0.000000	0.004702
19	18991	0.000000	0.013174	0.000028
20	21265	0.000012	0.000000	0.039215
21	21294	0.041078	0.000000	0.000009
22	24054	0.000034	0.000000	0.000646
23	24125	0.000987	7.78E-07	2.45E-05
24	24373	4.54E-07	0.000631	5.18E-07
25	25118	6.99E-08	2.11E-10	3.24E-08

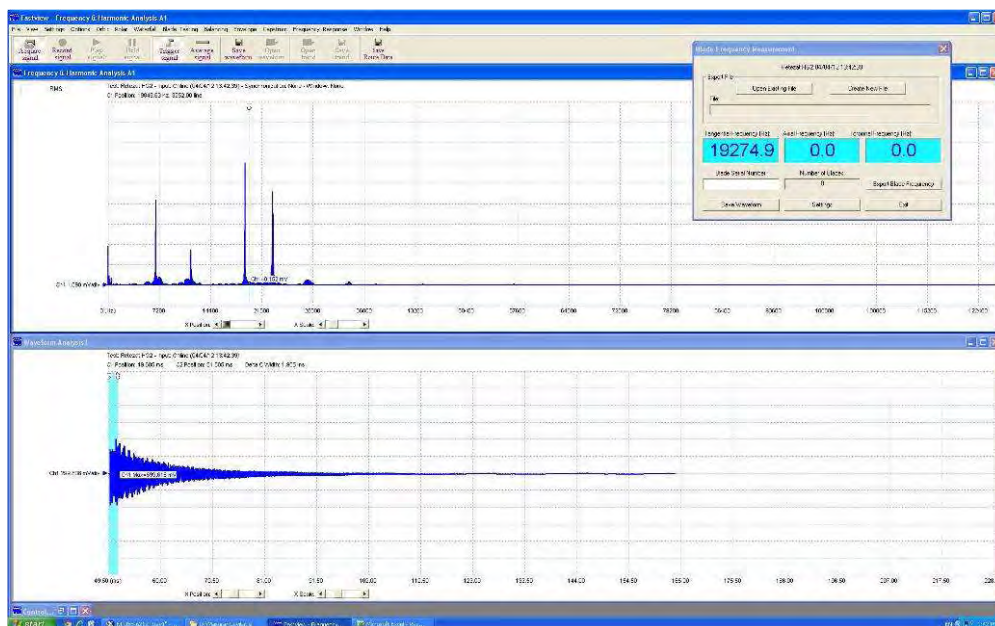


Fig. 4.59 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=127.72$ mm

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=127$ mm

Tabel 4.19

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1232.5	0.247950	0.000000	0.000505
2	1235.6	0.000505	0.000000	0.248620
3	3676.2	0.071766	0.000000	0.000118
4	3684.4	0.000116	0.000000	0.070845
5	6152.5	0.000001	0.000000	0.000000
6	6548	0.002254	0.000000	0.000003
7	6567.2	0.000000	0.000001	0.001509
8	7362.5	0.378840	0.000009	0.042792
9	7364.9	0.042527	0.000001	0.380120
10	7525.6	0.000004	0.623940	0.000004
11	12492	0.000000	0.000000	0.000000
12	13011	0.092498	0.000000	0.000124
13	13047	0.000121	0.000001	0.091152
14	13475	0.000009	0.000000	0.000000
15	14610	0.000000	0.334690	0.000000
16	15136	0.000000	0.000000	0.000000
17	18391	0.000165	0.000003	0.087624
18	18403	0.084725	0.000000	0.000177
19	19151	0.000001	0.011749	0.000018
20	21385	0.000046	0.000000	0.036147
21	21412	0.038223	0.000000	0.000038
22	24152	0.000000	0.000000	0.000456
23	24218	0.000782	7.04E-08	7.44E-07
24	24484	6.46E-08	0.000692	2.14E-09
25	25127	1.86E-13	7.07E-09	9.00E-09

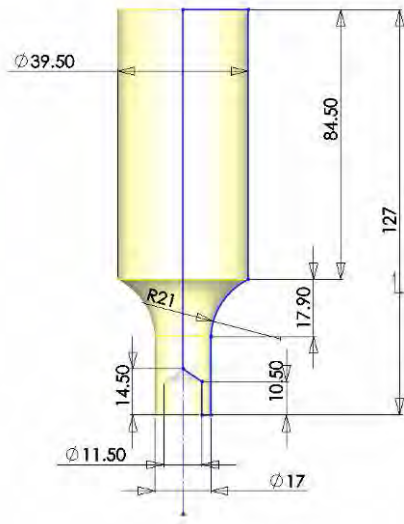


Fig. 4.60 Schiță sonotrodă: $L=127$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 14,3 mm

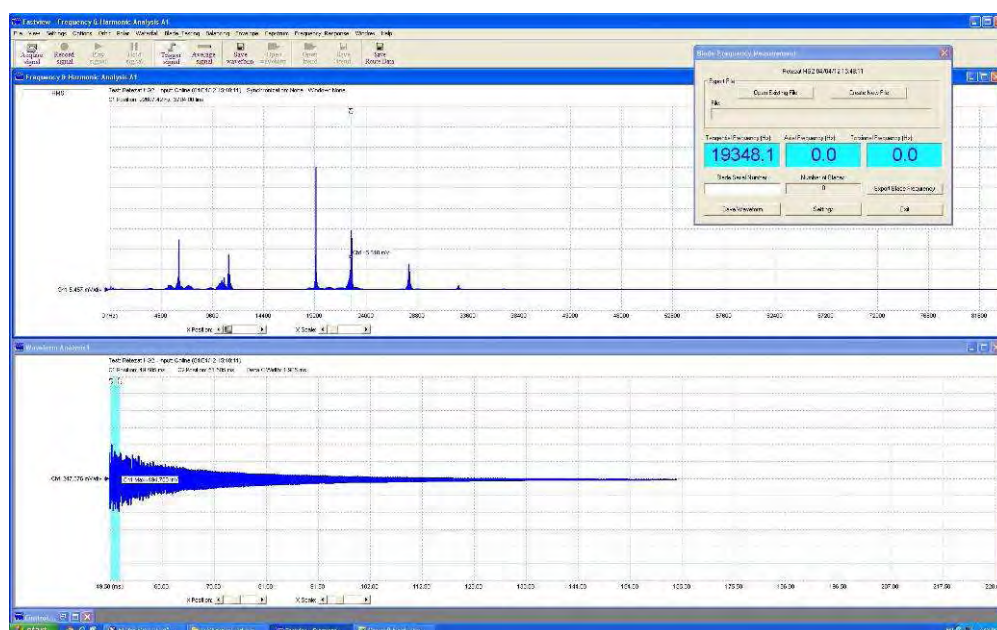


Fig. 4.61 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=127$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=126.3$ mm

Tabel 4.20

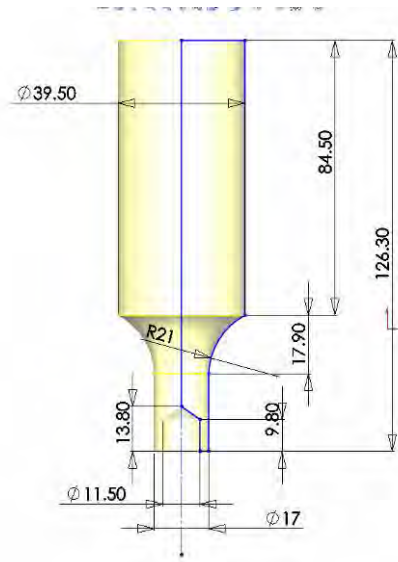


Fig. 4.62 Schiță sonotrodă: $L=126.3$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 12,75 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1236.4	0.248950	0.000000	0.000390
2	1239.6	0.000391	0.000000	0.249580
3	3737.3	0.072243	0.000000	0.000156
4	3746.3	0.000155	0.000000	0.071304
5	6154.6	0.000000	0.000000	0.000000
6	6591.2	0.000880	0.000000	0.000001
7	6609	0.000003	0.000001	0.000404
8	7372	0.421780	0.000000	0.000025
9	7375.6	0.000023	0.000001	0.423040
10	7530.7	0.000000	0.624520	0.000001
11	12498	0.000000	0.000000	0.000000
12	13050	0.092778	0.000000	0.000092
13	13087	0.000086	0.000000	0.091533
14	13556	0.000004	0.000000	0.000000
15	14629	0.000000	0.335330	0.000000
16	15264	0.000000	0.000000	0.000000
17	18481	0.000252	0.000002	0.089386
18	18488	0.086746	0.000000	0.000276
19	19318	0.000000	0.010505	0.000013
20	21506	0.000114	0.000000	0.033701
21	21537	0.035576	0.000000	0.000121
22	24283	0.000011	0.000002	0.000255
23	24316	0.000559	4.39E-07	9.55E-06
24	24605	2.81E-08	0.000757	4.27E-07
25	25118	2.23E-07	2.49E-07	2.27E-08

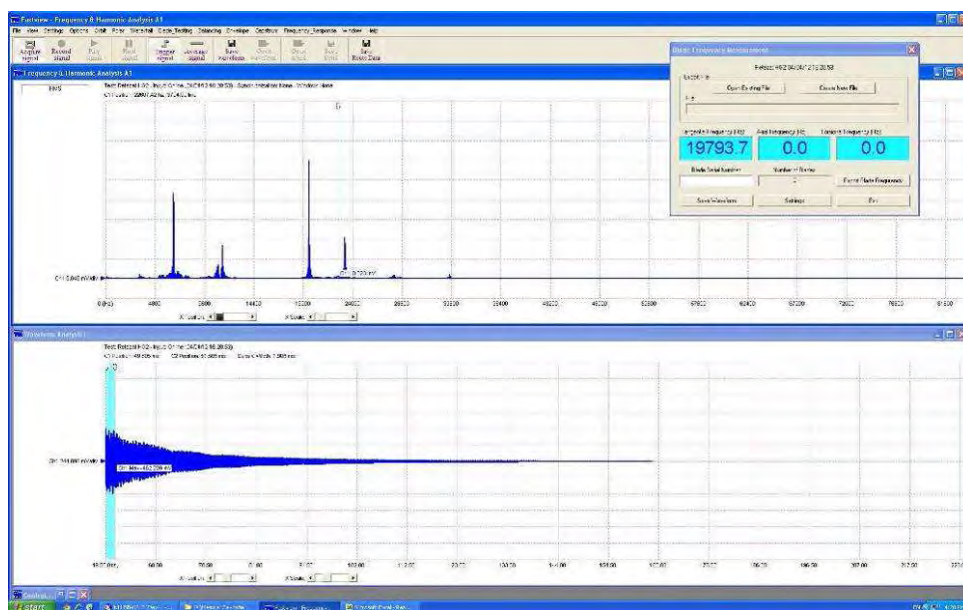


Fig. 4.63 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=126.3$ mm

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=126.2$ mm

Tabel 4.21

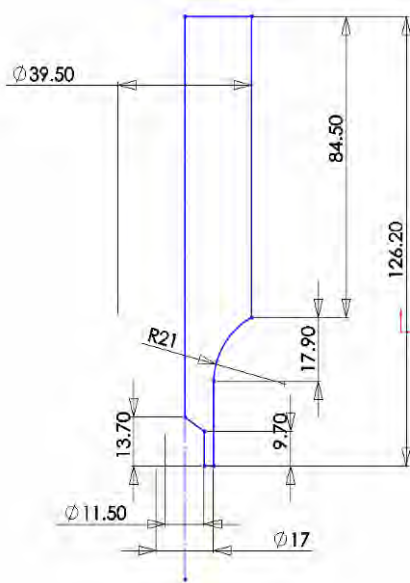


Fig. 4.64 Schiță sonotrodă: $L=126.2$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 12,75 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1236.90	0.249450	0.000000	0.000015
2	1240.20	0.000015	0.000000	0.250120
3	3746.40	0.072365	0.000000	0.000147
4	3755.60	0.000145	0.000000	0.071451
5	6154.60	0.000000	0.000000	0.000000
6	6597.20	0.000705	0.000000	0.000001
7	6615.70	0.000000	0.000000	0.000294
8	7373.40	0.398840	0.000007	0.023037
9	7376.10	0.022918	0.000008	0.399880
10	7532.00	0.000002	0.624490	0.000008
11	12497.00	0.000001	0.000000	0.000000
12	13057.00	0.092829	0.000000	0.000092
13	13094.00	0.000088	0.000001	0.091508
14	13568.00	0.000005	0.000000	0.000000
15	14636.00	0.000000	0.335500	0.000000
16	15285.00	0.000001	0.000000	0.000000
17	18482.00	0.000019	0.000004	0.089982
18	18503.00	0.087319	0.000000	0.000016
19	19352.00	0.000000	0.010298	0.000016
20	21523.00	0.000105	0.000000	0.033307
21	21556.00	0.035220	0.000000	0.000088
22	24273.00	0.000005	0.000000	0.000267
23	24340.00	0.000496	0.000000	0.000004
24	24634.00	0.000000	0.000772	0.000000
25	25152.00	0.000000	0.000000	0.000000

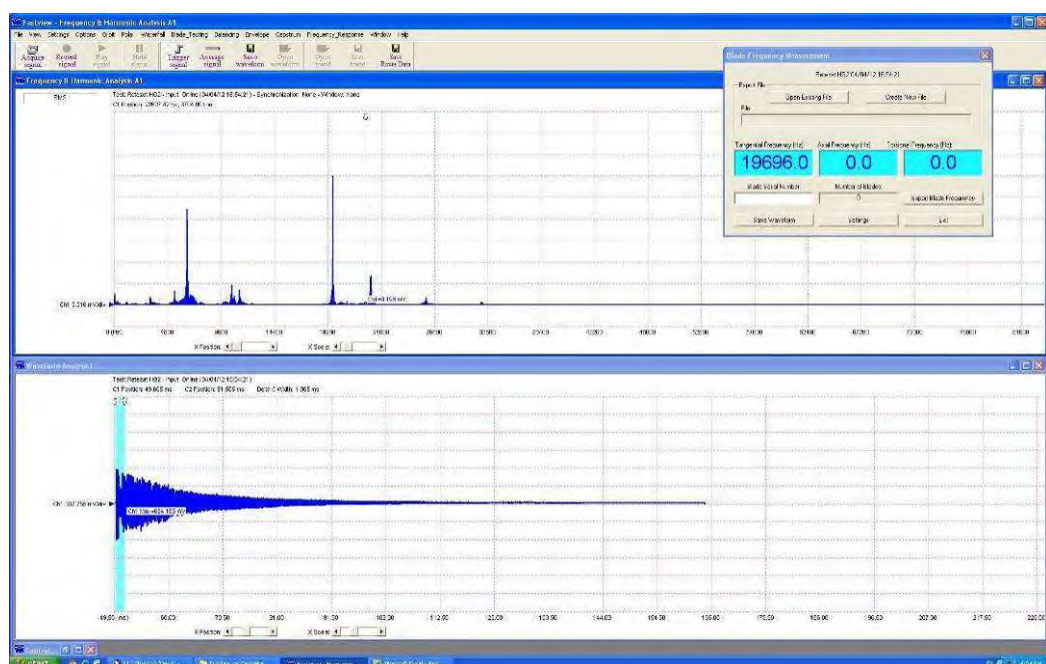


Fig. 4.65 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=126.2$ mm

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Frecvența măsurată pentru
lungimea sonotrodei $L=126.1$ mm

Tabel 4.22

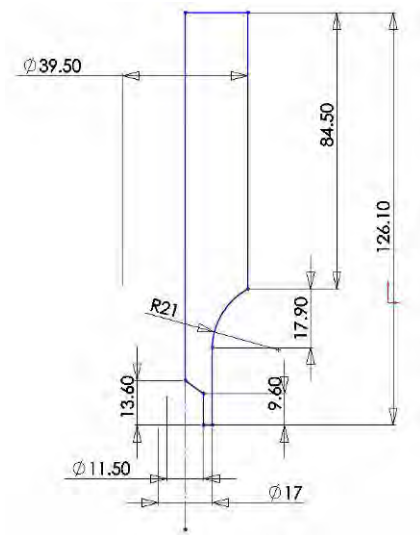


Fig. 4.66 Schiță sonotrodă: $L=126.1$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 12,75 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1237.50	0.248690	0.000000	0.000883
2	1240.70	0.000883	0.000000	0.249410
3	3754.90	0.072478	0.000000	0.000133
4	3764.50	0.000128	0.000000	0.071539
5	6155.60	0.000000	0.000000	0.000000
6	6603.10	0.000557	0.000000	0.000001
7	6622.30	0.000000	0.000000	0.000230
8	7374.30	0.421680	0.000015	0.000224
9	7378.20	0.000223	0.000014	0.422520
10	7532.80	0.000010	0.624810	0.000011
11	12498.00	0.000000	0.000000	0.000000
12	13062.00	0.092569	0.000000	0.000367
13	13099.00	0.000374	0.000001	0.091356
14	13577.00	0.000004	0.000000	0.000000
15	14635.00	0.000000	0.335440	0.000000
16	15302.00	0.000000	0.000000	0.000000
17	18498.00	0.003074	0.000001	0.087189
18	18512.00	0.084507	0.000000	0.003238
19	19375.00	0.000000	0.010080	0.000008
20	21542.00	0.000518	0.000000	0.032452
21	21570.00	0.034400	0.000000	0.000463
22	24282.00	0.000007	0.000001	0.000218
23	24349.00	0.000466	0.000000	0.000006
24	24655.00	0.000000	0.000783	0.000000
25	25132.00	0.000000	0.000000	0.000000

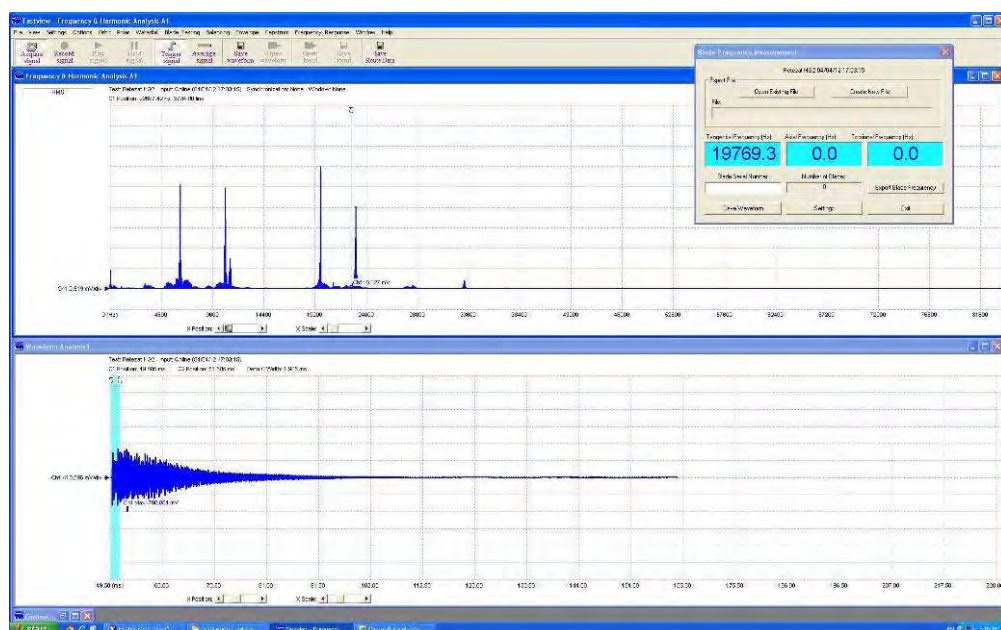


Fig. 4.67 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=126.1$ mm

Frecvența măsurată pentru
lungimea sonotrodei $L=125.9$ mm

Tabel 4.23

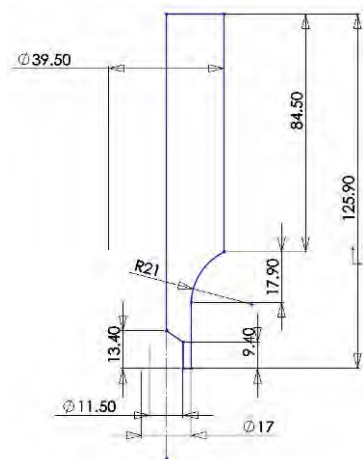


Fig. 4.68 Schiță sonotrodă:
 $L=125.9$ mm cu filet interior
M12x1 și cu stift
intermediar
12,75 mm

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1238.70	0.249570	0.000000	0.000254
2	1241.80	0.000255	0.000000	0.250230
3	3773.20	0.072636	0.000000	0.000157
4	3782.40	0.000154	0.000000	0.071686
5	6155.50	0.000000	0.000000	0.000000
6	6617.60	0.000303	0.000000	0.000001
7	6633.70	0.000000	0.000001	0.000071
8	7377.10	0.421620	0.000000	0.000278
9	7380.80	0.000281	0.000005	0.422720
10	7534.30	0.000000	0.625050	0.000004
11	12498.00	0.000002	0.000000	0.000001
12	13075.00	0.092434	0.000000	0.000498
13	13112.00	0.000484	0.000002	0.091029
14	13599.00	0.000004	0.000000	0.000000
15	14643.00	0.000000	0.335580	0.000000
16	15347.00	0.000000	0.000000	0.000000
17	18519.00	0.000305	0.000004	0.090422
18	18535.00	0.087838	0.000000	0.000328
19	19434.00	0.000000	0.009660	0.000015
20	21575.00	0.000194	0.000000	0.032137
21	21611.00	0.034030	0.000000	0.000178
22	24323.00	0.000009	0.000000	0.000195
23	24375.00	0.000418	0.000000	0.000006
24	24700.00	0.000000	0.000810	0.000000
25	25145.00	0.000000	0.000000	0.000000

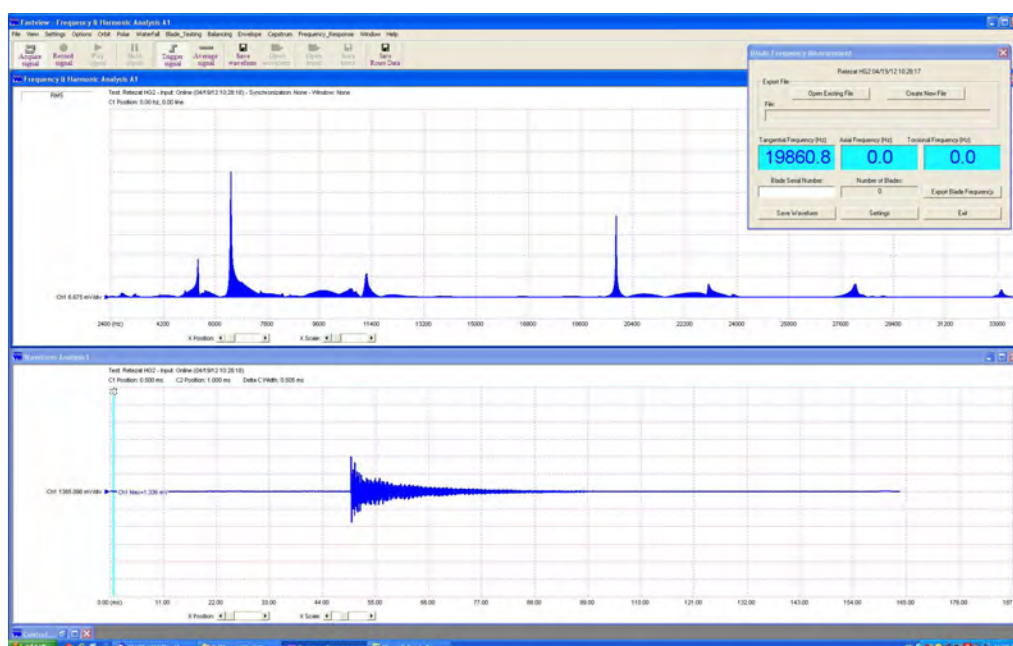


Fig. 4.69 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=125.9$ mm

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=125.7$ mm

Tabel 4.24

Mode No.	Freq (Hertz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1239.8	0.249470	0.000000	0.000592
2	1242.8	0.000593	0.000000	0.250130
3	3790.8	0.072849	0.000000	0.000136
4	3800	0.000133	0.000000	0.071868
5	6156.5	0.000000	0.000000	0.000000
6	6630.3	0.000136	0.000000	0.000000
7	6645.6	0.000000	0.000001	0.000005
8	7380	0.421680	0.000001	0.000136
9	7383.1	0.000139	0.000003	0.422580
10	7535.4	0.000001	0.625230	0.000003
11	12500	0.000000	0.000000	0.000000
12	13086	0.092912	0.000000	0.000164
13	13123	0.000156	0.000002	0.091543
14	13620	0.000004	0.000000	0.000000
15	14647	0.000000	0.335660	0.000000
16	15388	0.000001	0.000001	0.000000
17	18541	0.000536	0.000002	0.090730
18	18560	0.088018	0.000000	0.000580
19	19475	0.000000	0.009400	0.000011
20	21610	0.000019	0.000000	0.031598
21	21647	0.033534	0.000000	0.000014
22	24343	0.000025	0.000001	0.000147
23	24406	0.000350	0.000001	0.000016
24	24735	0.000000	0.000825	0.000000
25	25138	0.000000	0.000000	0.000000

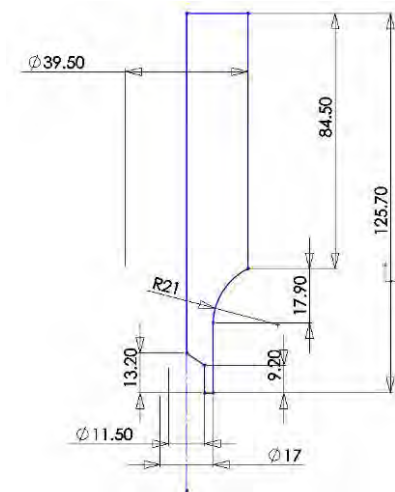


Fig. 4.70 Schișă sonotrodă: $L=125.7$ mm cu filet interior M12x1 și cu stift intermediar 12,75 mm

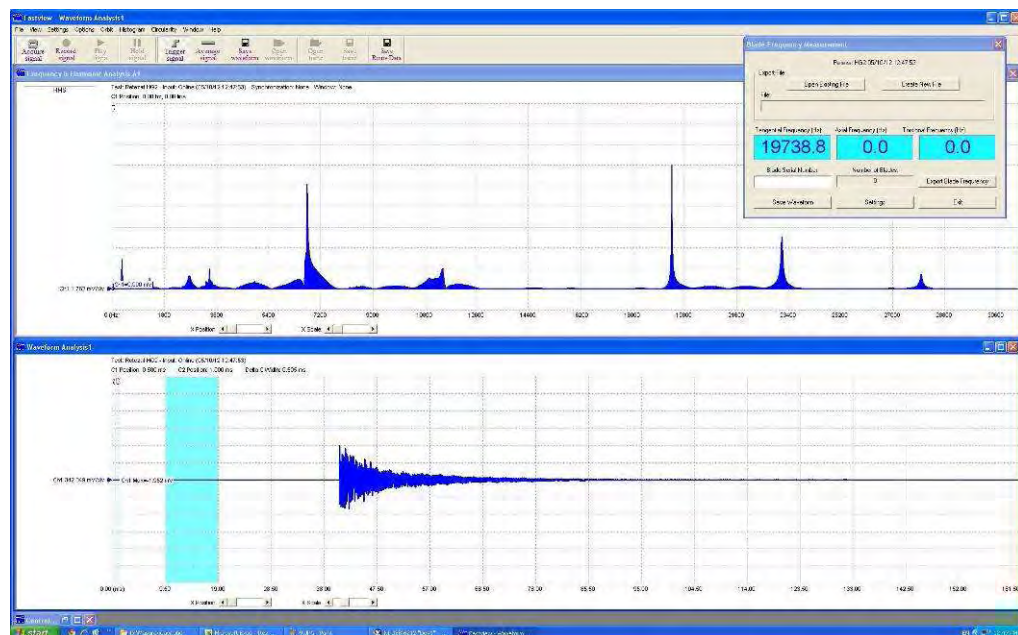


Fig. 4.71 Frecvența măsurată pentru lungimea sonotrodei $L=125.7$ mm

Rezultatele sunt centralizate în **tabelul 4.25** și în **figura 4.72**, unde:

- Nr.crt. – reprezintă numărul de ordine al experimentării;
- Lungime sonotrodă L – reprezintă lungimea sonotrodei;
- ΔL – reprezintă lungimea de scurtare a sonotrodei față de experimentul anterior;
- Frecvența măsurată – reprezintă frecvența măsurată;
- Frecvența calculată – reprezintă frecvența calculată prin analiza modală;
- Eroare – reprezintă diferența în Hz / procentuală dintre frecvența măsurată și cea calculată.

Frecvențe proprii calculate și măsurate pentru sonotroda cu filet interior M12x1 și știft intermediar

Tabelul 4.25

Nr. crt.	Lungime Sonotroda L	Lungime eliminată ΔL	Frecvența măsurată	Frecvența calculată în SolidWorks	Eroare	
	mm	mm	Hz	Hz	Hz	%
1	129.50	0	19091.8	19034	57.8	0.30
2	129.15	0.41	18841.6	18937	-95.4	-0.51
3	128.93	0.22	18505.9	18713	-207.1	-1.12
4	128.67	0.26	18920.9	18766	154.9	0.82
5	128.51	0.16	19000.2	18817	183.2	0.96
6	128.17	0.34	19091.8	18887	204.8	1.07
7	127.72	0.45	19274.9	18991	283.9	1.47
8	127	0.72	19348.1	19151	197.1	1.02
9	126.3	0.7	19793.7	19318	475.7	2.40
10	126.2	0.1	19696	19352	344	1.75
11	126.1	0.1	19769.3	19375	394.3	1.99
12	125.9	0.2	19860.8	19434	426.8	2.15
13	125.7	0.2	19738.8	19475	263.8	1.34
	<i>Suma</i>	3.8		<i>Media</i>	206.44	

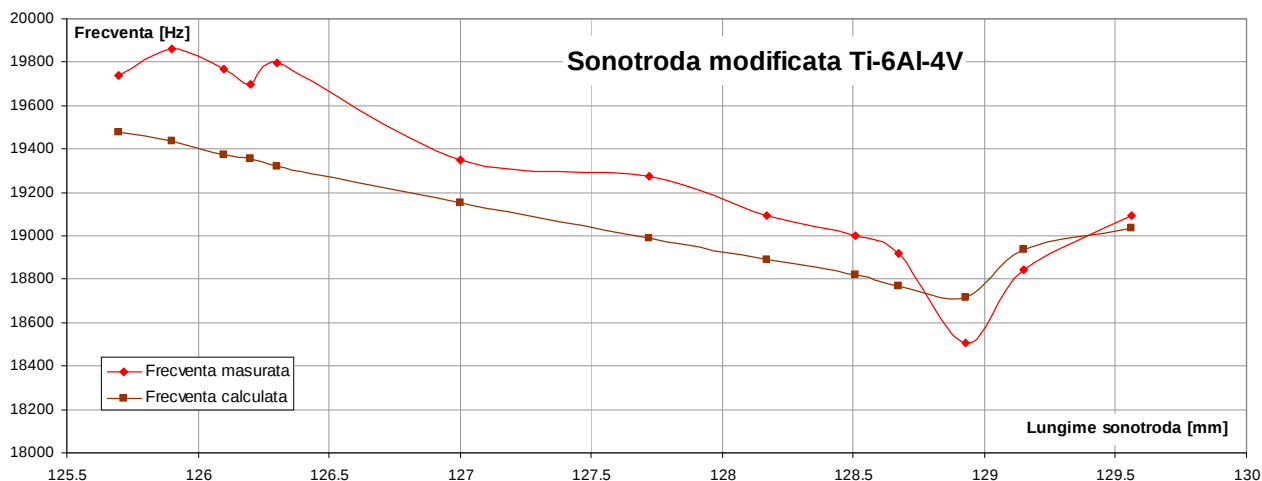


Fig. 4.72 *Comparație frecvențe proprii calculate și măsurate pentru sonotroda cu filet interior M12x1 și știft intermediar*

Pentru lungimea sonotrodei de 125.7 mm, valoare pentru care frecvența calculată a fost de 19475 Hz, cea măsurată de 19738,8 Hz, protecția generatorului de ultrasunete nu a mai blocat funcționarea acestuia.

Tabelul 4.25 evidențiază erorile între valorile măsurate și calculate ale frecvenței în domeniul $0.30 \div 2.40$ %, cea mai mare eroare se înregistrează la lungimea sonotrodei de 126.3 mm.

Graficul din **figura 4.72**, evidențiază similitudinea curbelor măsurate respectiv calculate, valorile măsurate fiind în general superioare celor calculate, abaterea medie fiind de 206.44 Hz. Din grafic rezultă clar tendința de creștere a frecvenței prin reducerea lungimii sonotrodei.

Față de valoarea inițială a lungimii sonotrodei de 129.50 mm, aceasta a fost scurtată în total cu 3.8 mm, până la valoarea de 125.7 mm, realizând astfel condiția de încadrare a frecvenței proprii în domeniul admis de 20000 ± 500 Hz.

Sonotroda a fost utilizată la încercări de eroziune cavitațională, dar în scurt timp au apărut din nou blocări ale generatorului de ultrasunete, cauza identificată fiind știftul intermediar. Conexiunea cu cele două suprafețe filetate, ale sonotrodei respectiv epruvetei, introduce instabilități suplimentare, care provoacă blocarea funcționării generatorului.

4.4 Calibrarea unei sonotrode din oțel pentru încercări de eroziune cavitațională prin metoda indirectă

4.4.1 Introducere

Scopul acestui subcapitol este de a prezenta cercetările realizate pentru calibrarea unei noi sonotrode din oțel destinate testării eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda indirectă. În cazul cavitației indirecte epruveta este fixă, iar sonotroda vibrează deasupra epruvetei la o distanță controlată, ambele fiind imersate în apă. Pentru încercările experimentale epruveta se va fixa pe un suport cu 4 șuruburi, **figura 3.13-5**.

Prin calibrare se urmărește atingerea frecvenței proprii de 20000 ± 500 Hz a sonotrodei. Plecând de la o geometrie inițială, calibrarea se va realiza prin scurtarea lungimii sonotrodei. Verificarea frecvenței se va realiza prin măsurarea directă a acesteia, comparativ cu cea calculată prin analiza modală efectuată prin intermediul programului SolidWorks [125].

Deoarece epruveta nu mai este conectată prin filet cu epruveta, această variantă elimină dezavantajul semnalat în paragraful anterior.

4.4.2 Ansamblu 3D buster-sonotrodă-epruvetă

Proiectarea ansamblului 3D buster-sonotrodă s-a realizat în aplicația SolidWorks și se prezintă în **figura 4.73**. Sonotroda se assemblează cu busterul printr-un știft prin intermediul tijei buster. Busterul este prevăzut cu 6 șuruburi de fixare.

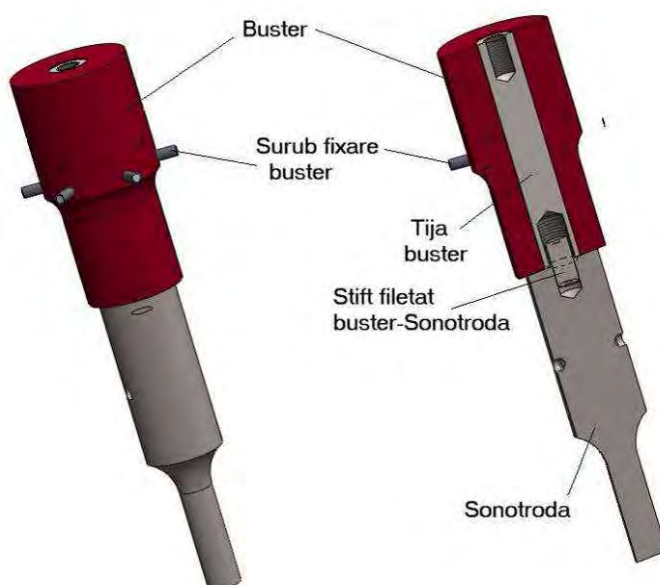


Fig. 4.73 Ansamblu buster-sonotrodă-epruvetă

4.4.3 Rezultate obținute prin analiza modală

Prin reducerea lungimii sonotrodei, a cărei valoare de start este 160 mm și reluarea calcului de frecvență proprie se urmărește apropierea frecvenței de valoarea de $\sim 20000 \pm 500$ Hz, simultan cu realizarea condiției ca modul de vibrație să fie de tip axial (longitudinal).

Analiza modală a fost efectuată prin intermediul programului SolidWorks, pentru calculul frecvenței proprii parcurgându-se etapele descrise în **& 4.3.3**. În urma analizei modale se pot identifica modurile de vibrație axiale (orientate pe direcția Y a sistemului de referință) prin activarea opțiunii *List Mass Participation*, care va afișa tabelar: numărul de ordine al modului de vibrație, frecvența calculată și coeficientul de participare masică pe direcțiile normalizate X, Y și Z; dintre modurile de vibrație calculate interesează numai cele axiale, adică cele pentru care coeficienții pe direcțiile X respectiv Z sunt nuli sau cu valori nesemnificative comparativ cu valoarea coeficientului pe direcția Y.

Calcululele au fost efectuate pentru patru lungimi ale sonotrodei: 160 mm, 155.5 mm, 150 mm respectiv 145 mm. Coeficienții de participare masică pentru aceste lungimi sunt prezentați în **tabelele 4.26 ÷ 4.29**, pentru 25 de moduri de vibrație calculate. Modurile de vibrație axiale sunt marcate cu fundal galben.

Mod de vibrație nr.	Coeficienți de participare masică Tabel 4.26 pentru lungime sonotrodă=160 mm				Coeficienți de participare masică Tabel 4.27 pentru lungime sonotrodă=155.5 mm			
	Freq (Hz)	X direction	Y direction	Z direction	Freq (Hz)	X direction	Y direction	Z direction
1	966.68	0.352090	0.000000	0.003633	978.67	0.358580	0.000000	0.000086
2	967.44	0.003623	0.000000	0.352440	979.66	0.000086	0.000000	0.359010
3	3084.5	0.074190	0.000000	0.000037	3251.1	0.074072	0.000000	0.000038
4	3092.5	0.000037	0.000000	0.073589	3259.6	0.000039	0.000000	0.073395
5	5438.7	0.000000	0.000000	0.000000	5443.5	0.000000	0.000000	0.000000
6	6097.3	0.034628	0.000001	0.000072	6197.5	0.028297	0.000001	0.000075
7	6106.5	0.000068	0.000003	0.034536	6207.5	0.000090	0.000008	0.028373
8	6437.6	0.000000	0.709790	0.000001	6457.5	0.000000	0.710460	0.000001
9	7269.6	0.274810	0.000000	0.046750	7276.5	0.276850	0.000000	0.049160
10	7274.6	0.046655	0.000000	0.276260	7283.1	0.049001	0.000000	0.278320
11	12529	0.000000	0.000000	0.000015	12558	0.000000	0.000000	0.000000
12	12602	0.068833	0.000000	0.000000	12805	0.072556	0.000000	0.000001
13	12679	0.000000	0.000000	0.068095	12883	0.000000	0.000000	0.071874
14	12943	0.000000	0.000000	0.000000	13368	0.000000	0.000000	0.000000
15	15050	0.000000	0.258610	0.000000	15104	0.000000	0.259830	0.000000
16	15627	0.000000	0.000000	0.000000	15734	0.000000	0.000000	0.000000
17	16857	0.005593	0.000001	0.046720	17359	0.000914	0.000000	0.053288
18	16863	0.046417	0.000000	0.005443	17369	0.053520	0.000000	0.000836
19	19283	0.000000	0.006671	0.000000	19710	0.000000	0.004669	0.000000
20	20415	0.056108	0.000000	0.002342	20659	0.049915	0.000000	0.002076
21	20529	0.002330	0.000000	0.055573	20766	0.002102	0.000000	0.049508
22	23688	0.001747	0.000000	0.000073	23865	0.001106	0.000000	0.000047
23	23816	0.000170	0.000000	0.001880	23980	0.000119	0.000000	0.001262
24	25418	0.000000	0.000000	0.000000	25462	0.000000	0.000000	0.000000
25	25960	0.000000	0.001471	0.000000	26182	0.000000	0.001574	0.000000
		Sum X = 0.96729	Sum Y = 0.97654	Sum Z = 0.96746		Sum X = 0.96725	Sum Y = 0.97654	Sum Z = 0.96735

Graficul variației frecvenței calculate funcție de numărul modului de vibrație este prezentat în figura 4.74, de unde rezultă că valoarea de 20000 Hz se înscrie în jurul modului de vibrație 19.

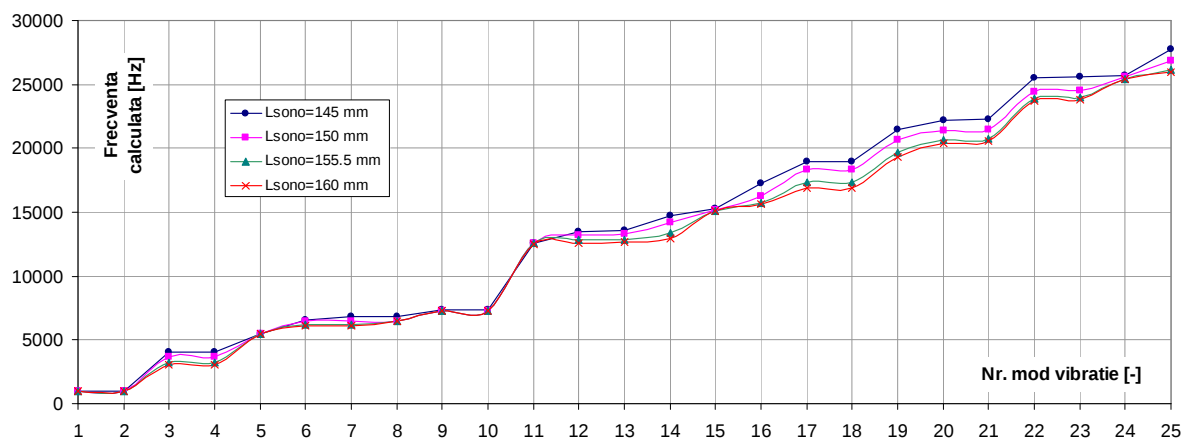


Fig. 4.74 Variația frecvenței calculate prin analiza modală funcție de numărul modului de vibrație

Mod de vibrație nr.	Coeficienți de participare masică Tabel 4.28 pentru lungime sonotrodă=150 mm				Coeficienți de participare masică Tabel 4.29 pentru lungime sonotrodă=145mm			
	Freq (Hz)	X direction	Y direction	Z direction	Freq (Hz)	X direction	Y direction	Z direction
1	1004	0.363960	0.000000	0.000161	1025.8	0.36792	1.047E-09	0.00000
2	1005.3	0.000162	0.000000	0.364420	1027.3	0.000071	0.000000	0.368430
3	3650.3	0.076663	0.000000	0.000003	4036.1	0.082032	0.000000	0.000002
4	3662.6	0.000003	0.000000	0.075910	4053.4	0.000002	0.000000	0.081232
5	5451.1	0.000000	0.000000	0.000000	5456.9	0.000000	0.000000	0.000000
6	6477.8	0.010451	0.000003	0.000019	6534.7	0.000000	0.713420	0.000000
7	6488.5	0.000041	0.000351	0.010501	6823.1	0.002417	0.000000	0.000035
8	6499.2	0.000000	0.711630	0.000007	6831.2	0.000016	0.000001	0.002582
9	7298	0.315200	0.000000	0.022751	7363.2	0.335760	0.000000	0.002932
10	7306.2	0.022677	0.000000	0.316760	7370.6	0.002990	0.000000	0.337430
11	12568	0.000000	0.000000	0.000000	12576	0.000001	0.000000	0.000000
12	13179	0.078631	0.000000	0.000003	13474	0.081795	0.000000	0.000012
13	13257	0.000004	0.000000	0.077766	13544	0.000013	0.000000	0.080658
14	14230	0.000000	0.000000	0.000000	14710	0.000000	0.000001	0.000000
15	15185	0.000000	0.260860	0.000000	15235	0.000000	0.260590	0.000000
16	16228	0.000000	0.000000	0.000000	17257	0.000000	0.000000	0.000000
17	18362	0.026076	0.000000	0.040145	18977	0.050834	0.000000	0.025071
18	18368	0.040399	0.000000	0.025278	18990	0.024954	0.000000	0.049629
19	20649	0.000000	0.001943	0.000000	21452	0.000000	0.000737	0.000000
20	21400	0.030619	0.000000	0.002248	22176	0.016080	0.000000	0.002151
21	21500	0.002316	0.000000	0.031242	22279	0.002303	0.000000	0.017056
22	24458	0.000084	0.000000	0.000002	25524	0.000226	0.000000	0.000019
23	24552	0.000022	0.000000	0.000141	25591	0.000005	0.000000	0.000158
24	25564	0.000000	0.000000	0.000000	25659	0.000000	0.000000	0.000000
25	26840	0.000000	0.001823	0.000000	27710	0.000000	0.002069	0.000000
		Sum X = 0.96731	Sum Y = 0.97662	Sum Z = 0.96735		Sum X = 0.96742	Sum Y = 0.97682	Sum Z = 0.96748

Distribuția coeficientului de participare masică pe direcțiile X, Y respectiv Z funcție de numărul modului de vibrație pentru cele patru lungimi ale sonotrodei este prezentată în figurile 4.75 ÷ 4.78. Din aceste figuri se poate observa modurile axiale, adică acele moduri pentru care barele verticale sunt umplute cu culoare continuă roșie, în dreptul cărora s-a marcat valoarea numerică a coeficientului. Celelalte bare verticale sunt corespunzătoare modurilor de vibrație transversale (pe direcțiile X sau Z) și nu sunt interesante în cadrul prezentei analize.

Rezultatele analizei modale sunt centralizate în **tabelul 4.30** pentru modul de vibrație 19, în baza căruia, în **figura 4.79**, s-a reprezentat variația lungimii sonotrodei funcție de frecvența calculată. Această dependență s-a interpolat linear, pentru a găsi valoarea lungimii sonotrodei 154.07 mm pentru care, din punct de vedere teoretic, se realizează frecvența de lucru de 20000 Hz.

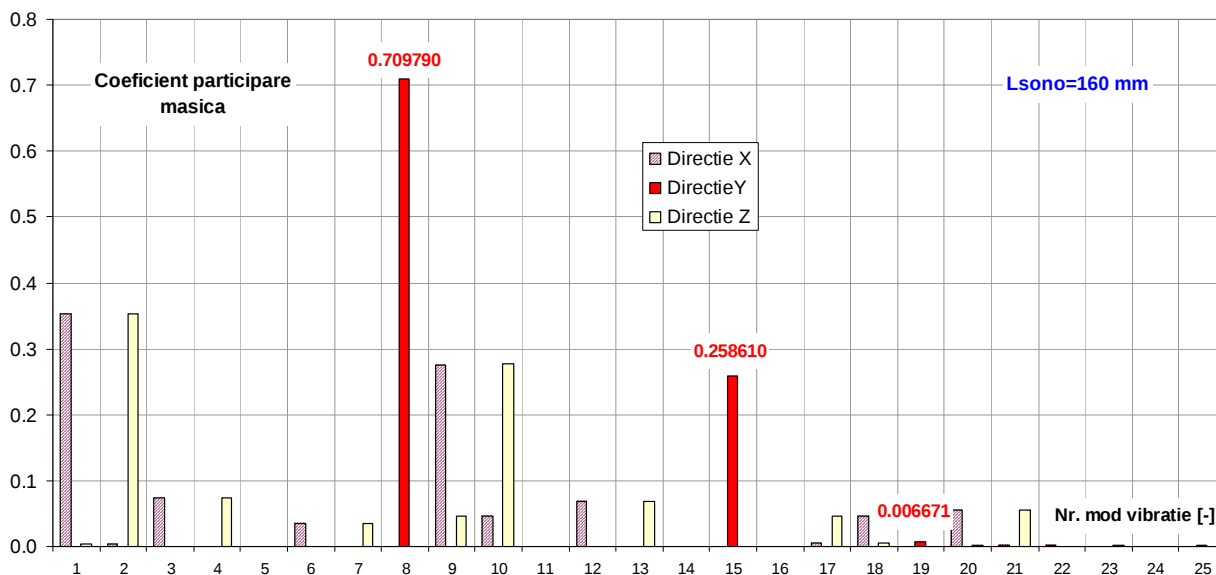


Fig. 4.75 Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 160 mm

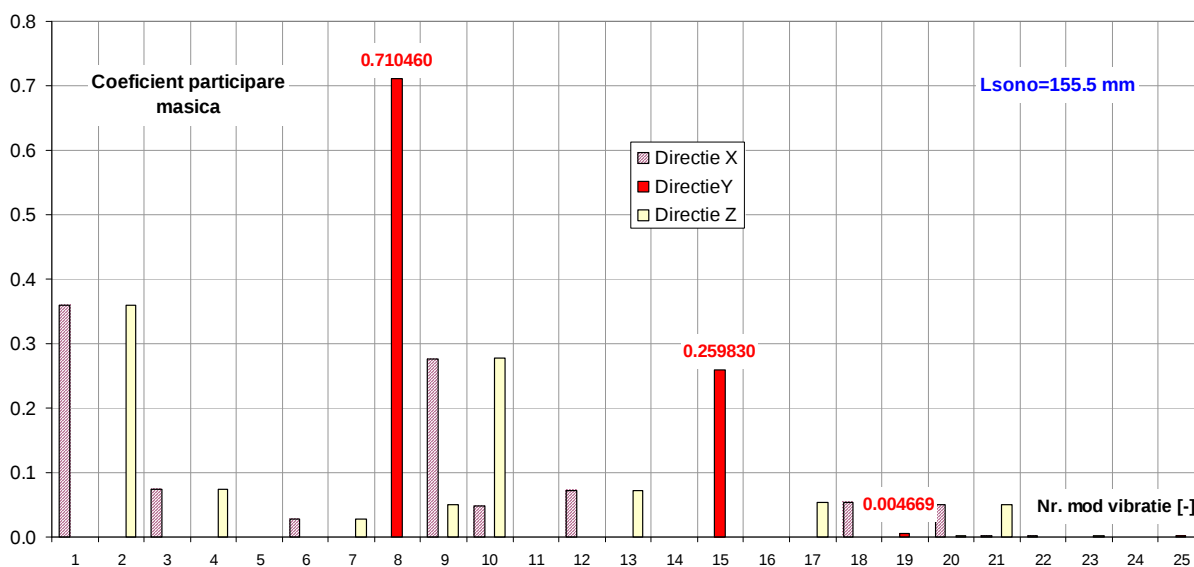


Fig. 4.76 Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 155.5 mm

Rezultatele analizei modale pentru modul de vibrație 19

Tabel 4.30

Lungime sonotrodă [mm]	Mod de vibrație nr.	Frecvența (Hz)	X direction	Y direction	Z direction
160	19	19283	0.000000	0.006671	0.000000
155.5	19	19710	0.000000	0.004669	0.000000
150	19	20649	0.000000	0.001943	0.000000
145	19	21452	0.000000	0.000737	0.000000

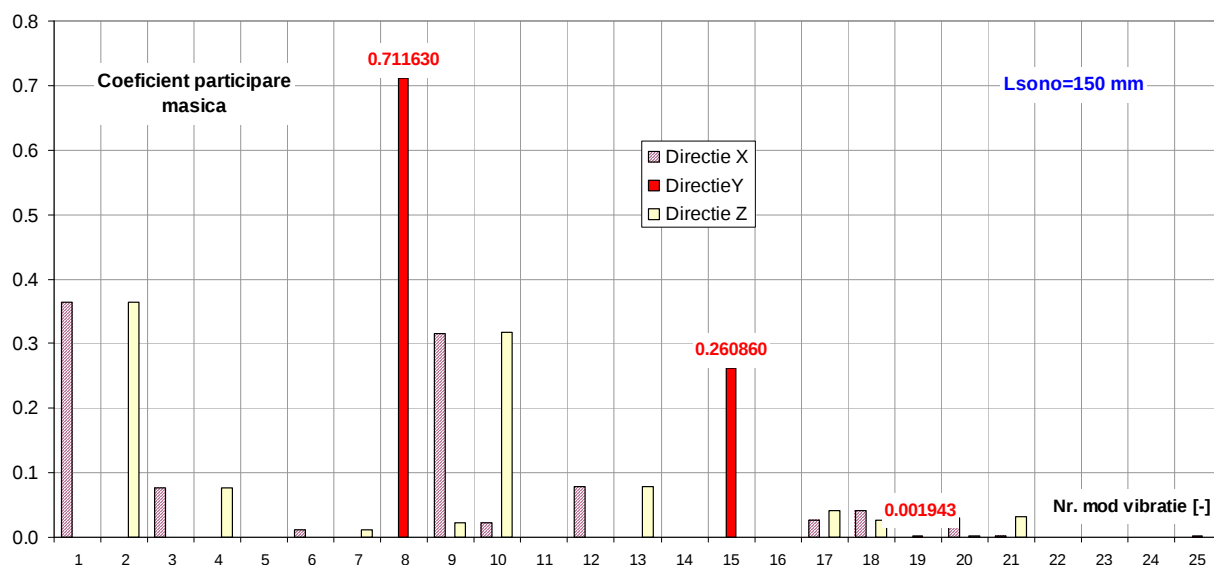


Fig. 4.77 Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 150 mm

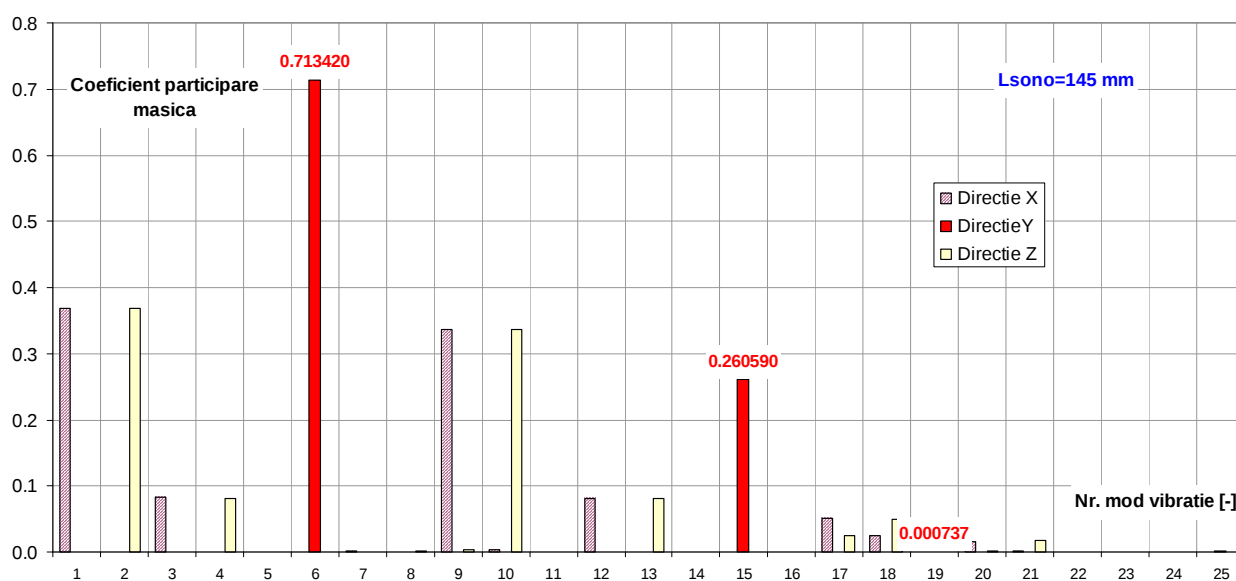


Fig. 4.78 Distribuția coeficientului de participare masică funcție de numărul modului de vibrație pentru lungimea sonotrodei de 145 mm

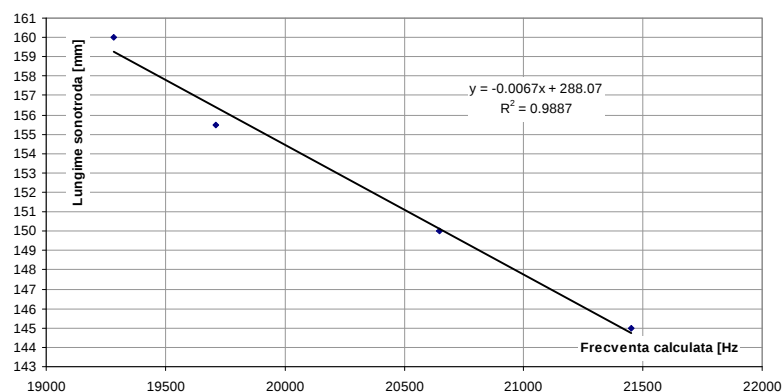


Fig. 4.79 Variația lungimii sonotrodei funcție de frecvența calculată & interpolarea lineară a dependenței

4.4.4 Rezultate obținute prin măsurarea frecvenței proprii

Plecând de la valoarea teoretică a lungimii sonotrodei din oțel rezultată în paragraful anterior de 154.07 mm, lungime pentru care se realizează frecvența teoretică de 20000 Hz și admițând - pentru siguranță - o lungime de start mai mare - 157.4 mm, s-a trecut la măsurarea frecvenței conform datelor centralizate în **tabelul 4.31**. Lungimea inițială de 157.4 mm s-a redus treptat, după fiecare scurtare s-a măsurat frecvența proprie, până la încadrarea în domeniul admisibil 20000 ± 500 Hz.

Semnificația mărimilor din **tabelul 4.31** este următoarea:

- o Lungime sonotrodă – reprezintă lungimea sonotrodei;
- o Frecvența [Hz] – reprezintă frecvența măsurată;
- o Δmm – reprezintă lungimea de scurtare a sonotrodei față de experimentul anterior;
- o ΔHz – reprezintă diferența măsurată a frecvenței față de valoarea anterioară.

Frecvențe proprii măsurate sonotrodă oțel **Tabel 4.31**

Lungime sonotrodă	Frecvența [Hz]	Δmm	ΔHz
157.4	19232.2	0	0
157.2	19274.9	-0.2	42.7
156.6	19372.6	-0.6	97.7
156.1	19476.3	-0.5	103.7
155.4	19567.9	-0.7	91.6
155	19635	-0.4	67.1
154.6	19708.3	-0.4	73.3
154.2	19775.4	-0.4	67.1

Figurile 4.80 ÷ 4.85 prezintă spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu lungimile din **tabelul 4.31**, la aplicarea unui impact.

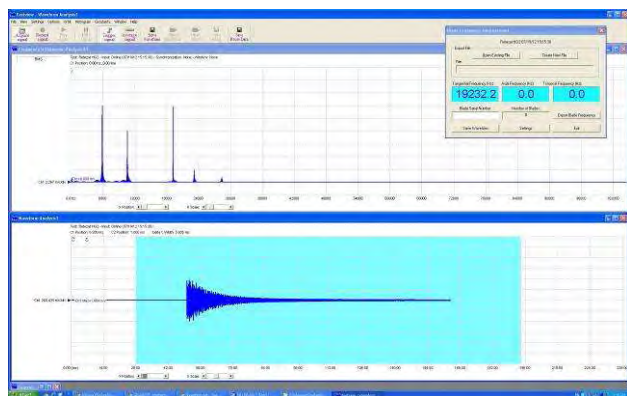


Fig. 4.80 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=157.4$ mm la aplicarea unui impact

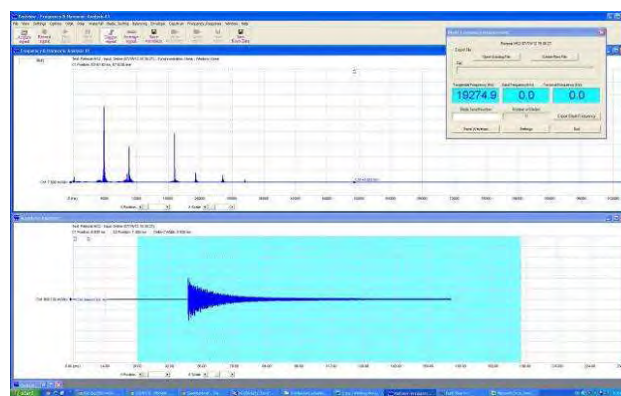


Fig. 4.81 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=157.2$ mm la aplicarea unui impact

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

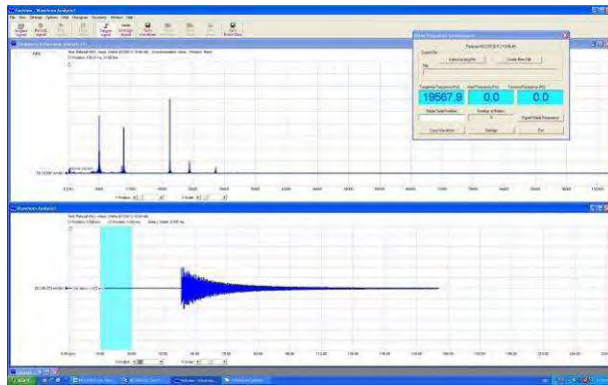


Fig. 4.82 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=155.4$ mm la aplicarea unui impact

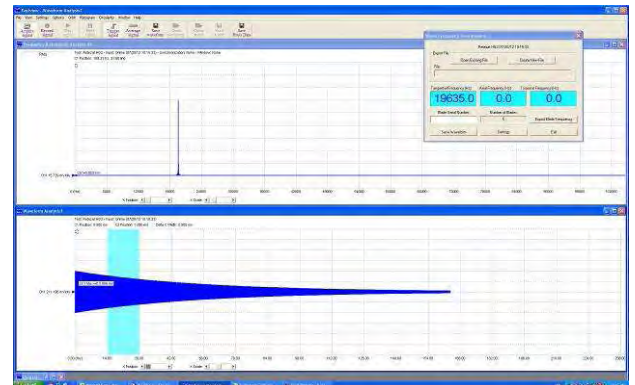


Fig. 4.83 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=155$ mm la aplicarea unui impact

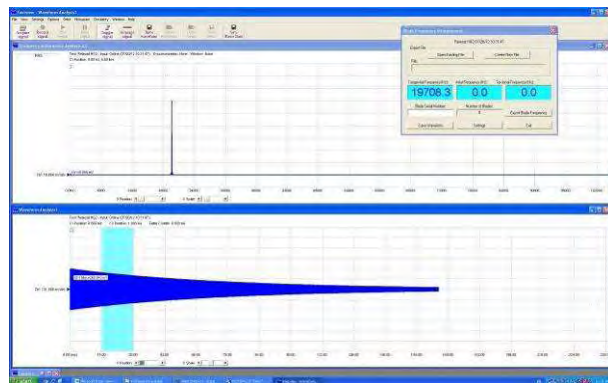


Fig. 4.84 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=154.6$ mm la aplicarea unui impact

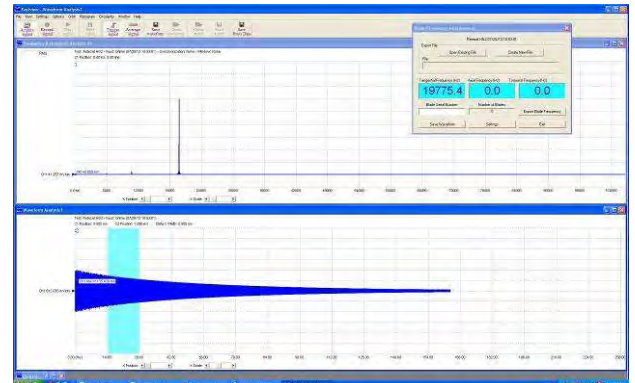


Fig. 4.85 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din oțel cu $L=154.2$ mm la aplicarea unui impact

Figura 4.86 prezintă variația frecvenței măsurate (tabelul 4.31) suprapusă peste cea calculată (tabelul 4.30) funcție de lungimea sonotrodei. Graficul din figura 4.86, evidențiază suprapunerea curbelor măsurate respectiv calculate, valorile măsurate fiind inferioare celor calculate. Din grafic rezultă tendința de creștere a frecvenței prin reducerea lungimii sonotrodei.

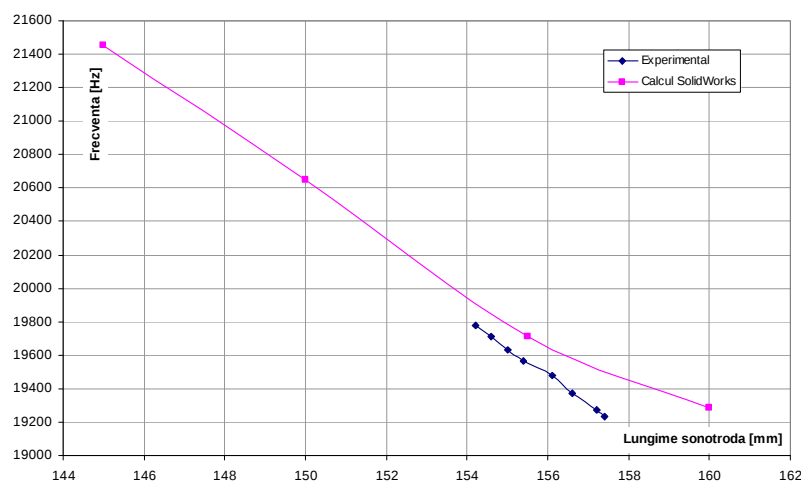


Fig. 4.86 Variația frecvența măsurate și calculate funcție de lungimea sonotrodei din oțel

4.4.5 Încercări preliminare de eroziune cavitațională prin metoda indirectă

Analiza modală și încercările efectuate în acest capitol au permis determinarea lungimii sonotrodei din oțel pentru încadrarea frecvenței de lucru a acesteia în domeniul 20000 ± 500 Hz. Valoarea finală a lungimii sonotrodei din oțel cu lungimea de 154.2 mm corespunde frecvenței proprii 19775.4 Hz, care permite efectuarea de încercări preliminare de eroziune cavitațională prin metoda indirectă.

Pentru verificarea funcționării corecte și fără blocare a generatorului de ultrasunete, s-au efectuat încercări de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel, conform datelor din **tabelul 4.32** respectiv **figura 4.87** și **4.88**.

*Încercări preliminare de eroziune cavitațională
pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă*

Tabel 4.32

Material Oțel			Proba - Diametru 16 mm			
Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	Vec	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15253.09	0	0	0.0000	0.0000
5	5	15246.06	7.03	7.03	1.0360	62.1600
15	10	15243.1	2.96	9.99	0.2453	14.7200
30	15	15240.56	2.54	12.53	0.1940	11.6400
45	15	15237.28	3.28	15.81	0.2103	12.6200
60	15	15234.25	3.03	18.84	0.2073	12.4400
75	15	15231.06	3.19	22.03	0.2000	12.0000
90	15	15228.25	2.81	24.84	0.2110	12.6600
105	15	15224.73	3.52	28.36	0.2100	12.6000
120	15	15221.95	2.78	31.14	0.2033	12.2000
135	15	15218.63	3.32	34.46	0.2280	13.6800
150	15	15215.11	3.52	37.98	0.2093	12.5600
165	15	15212.35	2.76	40.74	0.2293	13.7600
180	15	15208.23	4.12	44.86	0.2600	15.6000
195	15	15204.55	3.68	48.54	0.2590	15.5400
210	15	15200.46	4.09	52.63	0.2507	15.0400
225	15	15197.03	3.43	56.06	0.2067	12.4000

Imaginea suprafeței erodate prin cavitație a epruvetei din oțel după cele 225 de minute de încercare se prezintă în **figura 4.89**, iar în **figura 4.90** se prezintă microstructura acesteia [84], [87].

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

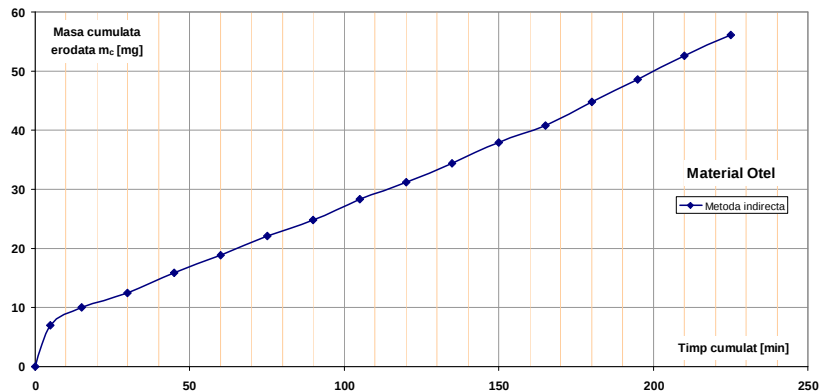


Fig. 4.87 Variația $m_c = f(\text{timp})$
încercări preliminare de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă cu sonotroda din oțel

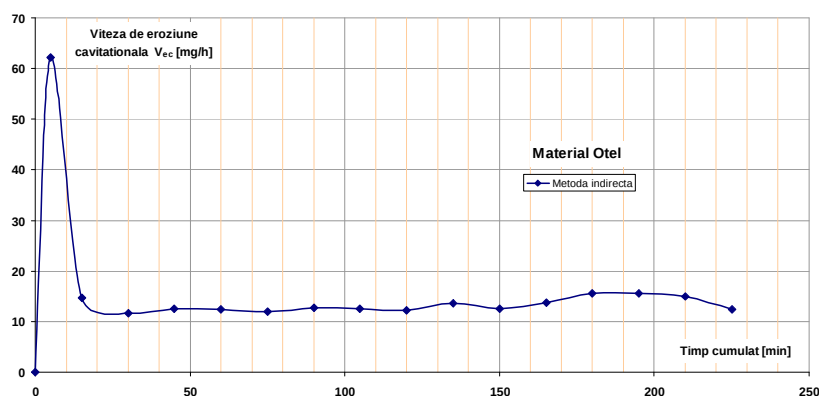


Fig. 4.88 Variația $V_{ec} = f(\text{timp})$
încercări preliminare de eroziune cavitațională pentru o epruvetă din oțel prin metoda indirectă cu sonotroda din oțel



Fig. 4.89 Suprafața erodată a epruvetei din oțel

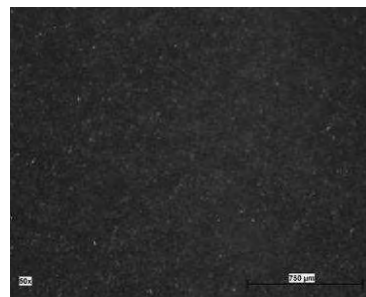


Fig. 4.90 Fotografie microscopică a epruvetei din oțel

După cum a rezultat din încercările preliminare, sonotroda realizată din oțel are dezavantajul că se încălzește foarte tare după un timp de numai 15 – 30 de minute și de asemenea aceasta se erodează prin cavitație așa cum se vede în figura 4.91.



Fig. 4.91 Detalii erodare sonotrodă oțel după mai multe ore de funcționare

4.5 Calibrarea unei sonotrode din titan pentru încercări de eroziune cavitațională prin metoda indirectă

4.5.1 Introducere

Scopul acestui subcapitol este de a prezenta cercetările experimentale realizate pentru calibrarea unei noi sonotrode din titan destinate testării eroziunii cavitaționale a epruvetelor prin metoda indirectă. Realizarea sonotrodei din titan urmărește eliminarea dezavantajului sonotrodei din oțel (încălzire rapidă).

Pentru încercările experimentale epruveta se va fixa pe un suport cu 4 șuruburi, **figura 3.13-5**. Prin calibrare se urmărește atingerea frecvenței proprii de 20000 ± 500 Hz a sonotrodei. Plecând de la geometria sonotrodei anterioare din oțel, calibrarea se va realiza prin scurtarea lungimii sonotrodei.

4.5.2 Rezultate obținute prin măsurarea frecvenței proprii

Plecând de la valoarea inițială a lungimii sonotrodei din titan și admitând - pentru siguranță - o lungime de start mai mare - 159 mm, s-a trecut la măsurarea frecvenței conform datelor centralizate în **tabelul 4.33**.

Lungimea inițială a sonotrodei din titan de 159 mm s-a redus treptat, după fiecare scurtare s-a măsurat frecvența proprie, până la încadrarea în domeniul admisibil 20000 ± 500 Hz, căreia îi corespunde lungimea finală de 154.4 mm.

Frecvențe proprii măsurate sonotrodă titan *Tabel 4.33*

Lungime sonotrodă	Frecvența [Hz]	Δ mm	Δ Hz
159	18969.7	0	0
158.6	19012.5	-0.4	42.8
157.7	19146.7	-0.9	134.2
157	19281	-0.7	134.3
156.1	19384.8	-0.9	103.8
155.7	19451.9	-0.4	67.1
155.5	19500.7	-0.2	48.8
155.1	19549.6	-0.4	48.9
154.7	19628.9	-0.4	79.3
154.4	19659.4	-0.3	30.5

Figurile 4.92 ÷ 4.101 prezintă spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu lungimile din **tabelul 4.31**, la aplicarea unui impact.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

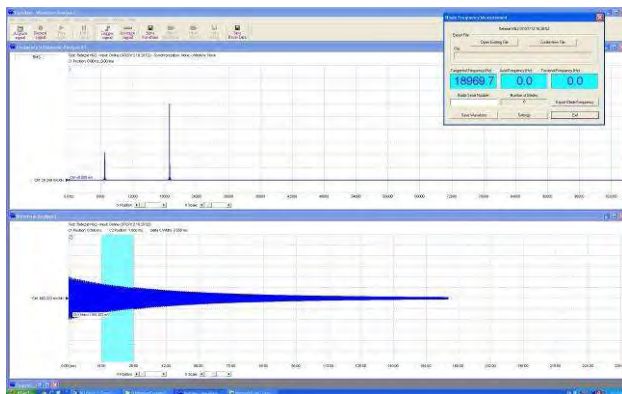


Fig. 4.92 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=159$ mm la aplicarea unui impact

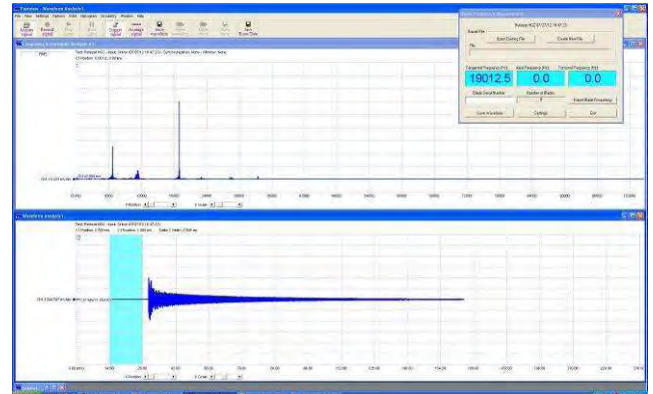


Fig. 4.93 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=158.6$ mm la aplicarea unui impact

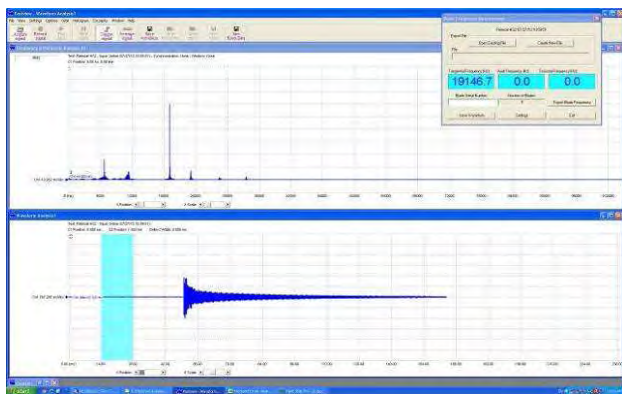


Fig. 4.94 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=157.7$ mm la aplicarea unui impact

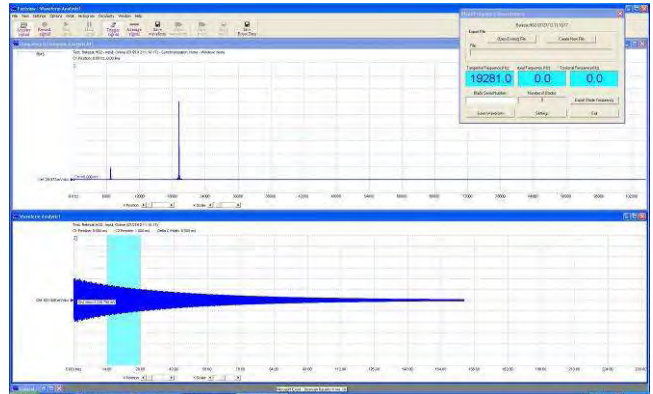


Fig. 4.95 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=157$ mm la aplicarea unui impact

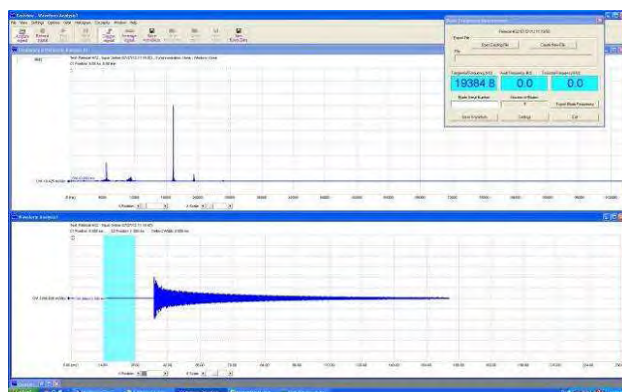


Fig. 4.96 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=156.1$ mm la aplicarea unui impact

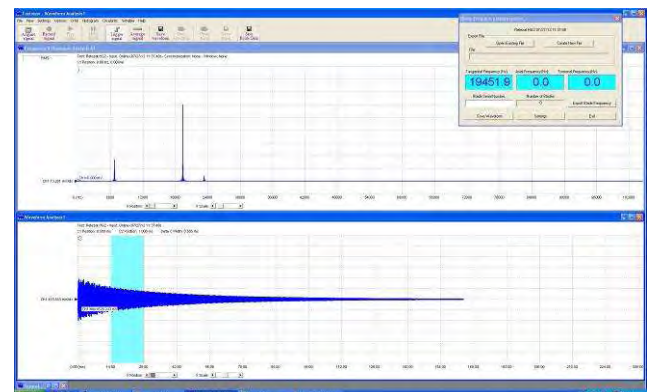


Fig. 4.97 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=155.7$ mm la aplicarea unui impact

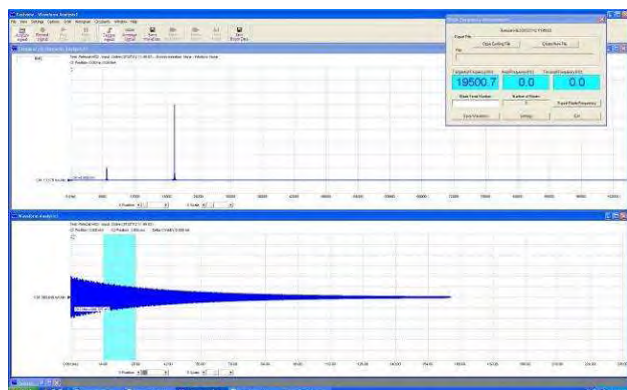


Fig. 4.98 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=155.5$ mm la aplicarea unui impact

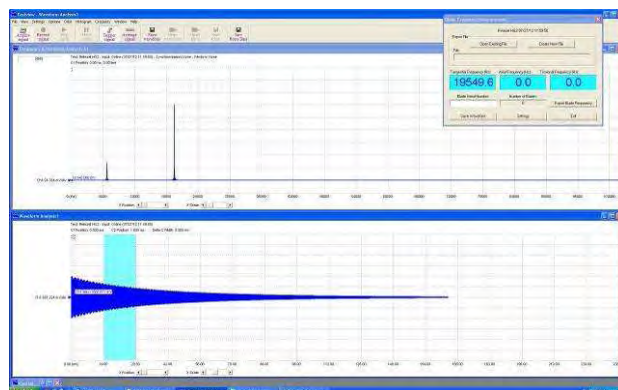


Fig. 4.99 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=155.1$ mm la aplicarea unui impact

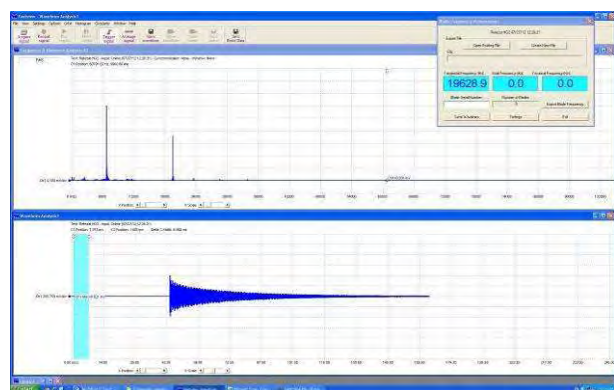


Fig. 4.100 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=154.7$ mm la aplicarea unui impact

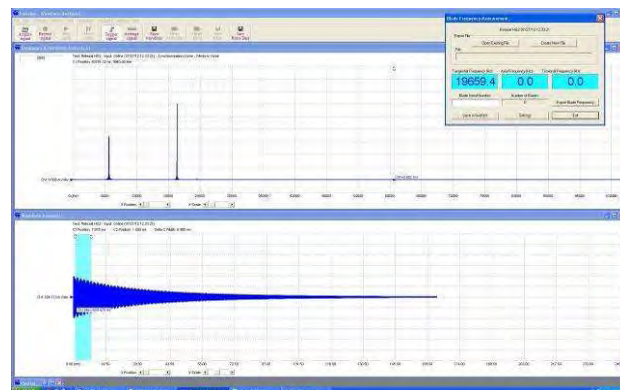


Fig. 4.101 Spectrul de frecvență și forma de undă a semnalului furnizat de sonotroda din titan cu $L=154.4$ mm la aplicarea unui impact

Figura 4.102 prezintă variația frecvenței măsurate funcție de lungimea sonotrodei (tabelul 4.33). Din grafic rezultă tendința de creștere a frecvenței prin reducerea lungimii sonotrodei.

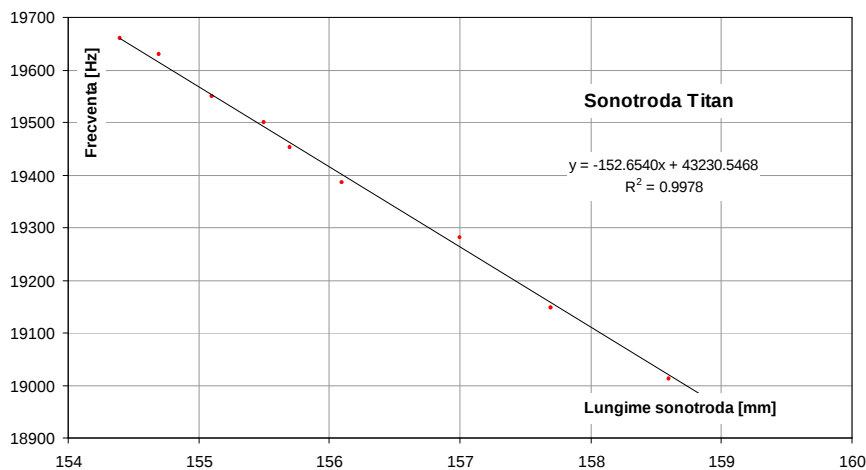


Fig. 4.102 Variația frecvenței măsurate funcție de lungimea sonotrodei din titan

4.5.3 Concluzii

Comparativ cu această sonotroda din titan, sonotroda anterioară din oțel s-a încadrat în domeniul de abateri 20000 ± 500 Hz la lungimea de 154.2 mm, pentru care s-a măsurat frecvența de 19775.4 Hz.

Încercările preliminare efectuate precum și cele ulterioare au demonstrat că aceasta variantă finală de sonotrodă din titan funcționează corect, fără a bloca generatorul de ultrasunete. La o lungime de 154.4 sonotroda are o frecvență măsurată de 19659.4 Hz, care se încadrează în abaterea de 20000 ± 500 Hz. Titanul este un material scump și greu de procurat, motiv pentru care lungimea acesteia s-a limitat la valoarea de 154.4 mm, pentru a avea o rezervă de lungime, din care se mai poate reduce, pentru a elimina defectele de eroziune cavitațională care cu siguranță afectează și sonotroda, în cazul cavitației indirecte.

4.6 Selecția metodei de testare a eroziunii cavitaționale a epruvetelor

Cercetările teoretice și experimentale derulate pentru crearea și calibrarea unei sonotrode care să poată fi utilizată la încercări de eroziune cavitațională au fost determinate de fisurarea și ruperea prin oboseală a sonotrodei originale. În furnitura ștandului de eroziune cavitațională a fost livrată câte o singură sonotrodă din titan pentru experimentări pe epruvete din oțel, respectiv aluminiu, **figura 4.103**. Evoluția cercetărilor teoretice și experimentale pentru crearea și calibrarea unei sonotrode care să poată fi utilizată la încercări de eroziune cavitațională este sintetizată în **tabelul 4.34**. În situația deteriorării sonotrodei originale din titan pentru epruvete din oțel, s-a impus efectuarea de cercetări suplimentare pentru calibrarea unei sonotrode care să reziste timp îndelungat la încercări cavitaționale [87, 91].

Astfel, s-a ajuns la selectarea metodei indirecte de încercare la eroziune cavitațională, folosind sonotroda din titan calibrată în cadrul **subcapitolului 4.5**, **figura 4.104**, trecând prin variante intermediare care nu s-au dovedit a fi fiabile în funcționare.

În concluzie, încercările de eroziune cavitațională se vor derula prin metoda indirectă.



Fig. 4.103 Sonotrodă originală din titan cu filet exterior M12x1 utilizată pentru metoda directă



Fig. 4.104 Sonotrodă finală din titan utilizată pentru metoda indirectă

Evoluția cercetărilor teoretice și experimentale pentru crearea și calibrarea unei sonotrode

Tabel 4.34

Metoda de cavitație	Sonotrodă	Probleme apărute la încercări de eroziune cavitațională	Soluție
Directă	Sonotroda originală din titan cu filet exterior M12x1 pentru atașare epruvetă - & 4.2	Fisurare și rupere sonotrodă în zona filetului. Blocare funcționare generator de ultrasunete.	Modificarea sonotrodei originale fisurate din titan prin eliminarea filetului exterior, crearea unui filet interior M12x1 și asamblarea cu epruveta prin intermediul unui știft intermediar M12x1.
Directă	Sonotroda originală din titan modificată cu filet interior M12x1 și asamblarea cu epruveta prin intermediul unui știft intermediar M12x1 - & 4.3	Blocare funcționare generator de ultrasunete, cauza identificată fiind știftul intermediar.	Trecere la metoda de eroziune indirectă, unde epruveta este fixă, fără a mai fi atașată de sonotrodă.
Indirectă	Sonotrodă din oțel, epruvetă fixă - & 4.4	Încălzire rapidă.	Calibrarea unei sonotrode din titan cu aceeași geometrie ca a celei din oțel.
Indirectă	Sonotrodă din titan, epruvetă fixă - & 4.5	Funcționează corect, fără a bloca generatorul de ultrasunete.	

Cap. 5 REZULTATE EXPERIMENTALE ALE CERCETĂRIILOR PE MATERIALE SUPUSE LA EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ

În acest capitol se prezintă rezultatele cercetărilor privind eroziunea cavitațională prin metoda indirectă de cavitație pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice, precum și pe alte tipuri de materiale, utilizând aparatul vibrator din dotarea „Centrului de Cercetări în Hidraulică, Automatizări și Procese Termice” (CCHAPT) [127] din cadrul Universității „Efimie Murgu” din Reșița.

Materialele studiate sunt clasificate pe categorii și simbolizate în **tabelul 5.1**. De asemenea, pentru fiecare material studiat s-au prezentat și domeniile de utilizare al acestora, oțelurile inoxidabile analizate fiind utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice.

Cercetarea comportării la eroziune cavitațională pe aparatul vibrator a fost extinsă și la celelalte materiale: oțelurile de uz general și aliate, fonte, bronzuri, aliaje pe bază de aluminiu și aliaje antifricțiune [39], [104], [108].

Clasificare materiale analizate

Tabel 5.1

Nr. crt.	Clasificare	Categorie	Simbolizare alfanumerică	Simbolizare numerică	Domenii de utilizare
1	Oțeluri inoxidabile	Martensitic	X20Cr13 (20Cr130)	1.4021	Piese pentru palete de turbine, pompe, armături pentru apă și abur
2			X3CrNi13-4	1.4351	Palete și rotoare de turbine hidraulice
3		Austenitic	X5CrNi18-10 (5NiCr180)	1.4301	Utilizat pentru piese, utilaje și instalații ce lucrează în medii corozive
4	Oțeluri de uz general și aliate	de îmbunătățire	34CrNiMo6 (34MoCrNi16)	1.6582	Pentru piese grele forjate, pentru arcuri, pentru construcții, industria de armament (tunuri)
5			26CrMo4	1.7219	
6			41Cr4 (40Cr10X)	1.7035	
7		carbon de caliate	OLC 45 (C45)	1.0503	Discuri de turbină, arbori cotiți, coaroane dințate
8			OLC 35 (C35)	1.0501	Arbori cotiți de dimensiuni mici, cilindri de presare
Scopul cercetării pe aceste materiale a fost testarea rezistenței la eroziune cavitațională a acestor materiale precum și verificarea reproducerii curbelor de pierdere de material funcție de timp și a curbei vitezei de eroziune cavitațională, prin efectuarea repetată a unui număr de 4 încercări pe același material.					
9	Fonte	cenușie	Fc (EN-GJL)	-	Capace, blocuri motor, chiuloase, roți dințate

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Clasificare materiale analizate

Tabel 5.1

Nr. crt.	Clasificare	Categorie	Simbolizare alfanumerică	Simbolizare numerică	Domenii de utilizare
10			Fgn (EN-GJS)	-	Piese de mașini agricole, came, ghidaje, arbori cotiți mari
11		ductilă	EN-GJS 400-15	0.7040	Fabricarea de robinete sau vane
12	Bronzuri	aliaj cupru-staniu	CuSn12 (G-CuSn12)	2.1052	Bucșe, armături, robinete
13		aliaj Cu-Sn-Pb	CuSn10Pb5	-	Bucșe, lagăre la motoarele cu ardere internă
14	Aliaje de Al-Si	Siluminiuri	AlSi12	-	Industria chimică, pentru mobilier metalic
15	Aliaje antifricțiune	pe bază de staniu	YSn83	-	Cuzineți lagăre cu alunecare obținuți prin turnare
<i>Scopul cercetării pe aceste materiale a constat în obținerea unor curbe ale vitezei de eroziune cavitațională prin parcurgerea celor 4 stadii cavitaționale din fig. 3.16, cât și studiul influenței privind modificarea perioadei de lucru. Valoarea etalon a perioadei de lucru a fost de 15 minute, iar valoarea celorlalte perioade ale încercărilor a fost de 5, 8, 30, și 45 minute.</i>					

Epruvetele au fost prelucrate sub forma unui cilindru $\Phi 16 \times 10$ și sub forma unui cub cu latura de 16 mm și fixate pe suporturile de prindere descrise în **capitolul 3**.

Majoritatea încercările au fost făcute pentru o durată totală de 180 de minute, iar restul încercărilor pe durate mai mici sau mai mari de timp, după cum rezultă din **tabelul 5.2**.

Evidența încercărilor de eroziune cavitațională pe materiale

Tabel 5.2

Nr. crt.	Tip încercare	Nr. repetare	Material	Timp perioadă / timp cumulat [min]	Timp total	
					[min]	[ore]
1	1	4x	C35	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	720	12
	2	-		-		
2	1	4x	41Cr4	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	720	12
	2	-		-		
3	1	4x	OLC 45	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1620	27
	2	1x		$(20 \times 45) = 900$		
4	1	4x	26CrMo4	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1620	27
	2	1x		$(20 \times 45) = 900$		
5	1	4x	34CrNiMo6	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 19) = 180$	1620	27
	2	1x		$(20 \times 45) = 900$		
6	1	4x	X20Cr13	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1620	27
	2	1x		$(30 \times 30) = 900$		
7	1	4x	X3CrNi13-4 (1)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1800	30
	2	1x		$(36 \times 30) = 1080$		
	1	4x	X3CrNi13-4 (2)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1800	30
	2	1x		$(36 \times 30) = 1080$		
	1	4x	X3CrNi13-4 (3)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1800	30
	2	1x		$(36 \times 30) = 1080$		
	1	4x	X3CrNi13-4 (4)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	1800	30
	2	1x		$(36 \times 30) = 1080$		
8	1	4x	X5CrNi18-10	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	2520	42
	2	1x		$(30 \times 60) = 1800$		

Evidența încercărilor de eroziune cavitațională pe materiale

Tabel 5.2

Nr. crt.	Tip încercare	Nr. repetare	Material	Timp perioadă / timp cumulat [min]	Timp total	
					[min]	[ore]
9	1	1x	YSn83	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (9 \times 15) = 150$	298	~4
	2	1x		$(1 \times 1) + (1 \times 2) + (29 \times 5) = 148$		
10	1	1x	EN-GJS-400-15	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	360	6
	2	1x		$(1 \times 10) + (1 \times 20) + (5 \times 30) = 180$		
11	1	1x	Fc (EN-GJL)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (11 \times 15) = 180$	360	6
	2	1x		$(1 \times 10) + (1 \times 20) + (5 \times 30) = 180$		
12	1	1x	AlSi12	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (13 \times 15) = 210$	418	~7
	2	1x		$(1 \times 3) + (1 \times 5) + (25 \times 8) = 208$		
13	1	1x	CuSn12	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (14 \times 15) = 225$	445	~8
	2	1x		$(1 \times 10) + (1 \times 20) + (7 \times 30) = 240$		
14	1	1x	CuSn10Pb5	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (17 \times 15) = 270$	540	9
	2	1x		$(1 \times 10) + (1 \times 20) + (8 \times 30) = 270$		
15	1	1x	Fgn (EN-GJS)	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (19 \times 15) = 300$	600	10
	2	1x		$(1 \times 10) + (1 \times 20) + (9 \times 30) = 300$		
16	1	1x	OLC 35	$(1 \times 5) + (1 \times 10) + (23 \times 15) = 360$	720	12
	2	1x		$(1 \times 15) + (1 \times 30) + (7 \times 45) = 360$		
Timp total cumulat al încercărilor de eroziune cavitațională					21281	~356

Pentru materialele de la poziția 1 – 9 din **tabelul 5.2** care corespund tipului 1 de încercare, s-au făcut un număr de 4 încercări la 180 de minute pe cele 4 fețe a epruvetelor fiecărui material (exceptând materialul de la poziția nr. 9) și apoi s-a făcut media aritmetică a valorilor celor 4 încercări pe fiecare material, obținându-se în final câte 5 curbe ale pierderii de material funcție de timp și 5 curbe ale vitezei de eroziune cavitațională.

Pentru aceleasi materiale de la poziția 1 – 9, pentru tipul 2 de încercare, s-a urmărit cercetarea comportamentului lor la cavitație pentru mai multe ore așa cum se arată în **tabelul 5.2**, până la observarea vizibilă a distrugerii prin cavitație a suprafețelor acestor materiale.

Pentru materialele de la poziția 10 – 17, pentru tipul 1 și 2 de încercare, cercetările s-au făcut la perioade cu valoare etalon de 5, 10 și 15 minute, până când curba vitezei de eroziune cavitațională a fost parcursă în întregime, incluzând și perioada de decelerare; de asemenea s-au utilizat și perioade de timp de 2 și 3 ori mai mici respectiv mai mari decât perioadele etalon, urmărindu-se prin aceasta evoluția curbei vitezei de eroziune cavitațională. Și pentru aceste grupe de materiale s-a urmărit observarea cu ochiul liber a distrugerii prin cavitație. Timpul total cumulat pentru toate încercările a fost de 21281 de minute, ceea ce înseamnă aproximativ 356 de ore fizice de teste efectuate pe materialele descrise în **tabelul 5.2**.

Metodologia de cercetare a epruvetelor privind testarea la eroziune cavitațională a fost prezentată în **& 3.5**, pentru toate încercările s-au folosit două sonotrode realizate din titan și oțel [84], [87], [88]. Pentru fiecare material analizat se va prezenta compoziția chimică și proprietățile

mecanice, iar rezultatele încercărilor de eroziune cavitațională vor fi expuse sub formă tabelară și sub formă de grafice.

Toate epruvetele au fost prelucrate cu ajutorul unei mașini de frezat, cu un strung normal, precum și cu un strung tip EMCO Concept TURN 55 prezentat în **figura 5.1**. Ambele strunguri se află în dotarea Universității „Eftimie Murgu” din Reșița.



*Fig. 5.1 Strungul cu comandă
numerică EMCO Concept
TURN 55*

5.1 Cercetări preliminare pe aluminiu prin metoda directă și metoda indirectă de cavitație

Cercetările preliminare prin cele două metode de cavitație vibratorie: directă și indirectă, au fost făcute pe un material din aluminiu [86]. Pentru acest material cercetarea a urmărit determinarea evoluției comparative a procesului de distrugere cavitațională prin cele două metode.

În **tabelele 5.3 și 5.4** se prezintă rezultatele încercărilor privind comportamentul aluminiului la eroziune cavitațională prin metoda directă respectiv cea indirectă.

Timp cumu- lat	Peri- oda	<i>Valorile obținute prin metoda directă pe aluminiu</i>			<i>Tabel 5.3</i>		<i>Valorile obținute prin metoda indirectă pe aluminiu</i>			<i>Tabel 5.4</i>	
		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	4288.7	0	0	0.0000	0.000	4039.84	0	0	0.0000	0.000
5	5	4273.52	15.18	15.18	2.5797	154.780	4037.73	2.11	2.11	0.3703	22.220
15	10	4256.85	16.67	31.85	1.7847	107.084	4035.06	2.67	4.78	0.3634	21.804
30	15	4227.43	29.42	61.27	1.7083	102.500	4027.44	7.62	12.4	0.6567	39.400
45	15	4205.6	21.83	83.1	1.3630	81.780	4015.36	12.08	24.48	2.0357	122.140
60	15	4186.54	19.06	102.16	1.1783	70.700	3966.37	48.99	73.47	4.4963	269.780

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Pentru aceste încercări, pentru atingerea fazei finale prin metoda directă, a fost necesar un timp total de experimentare de numai 60 de minute pentru fiecare epruvetă, timp divizat pe următoarele perioade: o perioadă de 5 minute, una de 10 minute și 3 perioade a câte 15 minute.

Rezultatele sunt prezentate grafic în **figurile 5.2 și 5.3** sub forma curbei masei erodate și curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în **figurile 5.4 și 5.5** sunt prezentate imagini ale distrugerii prin cavitație.

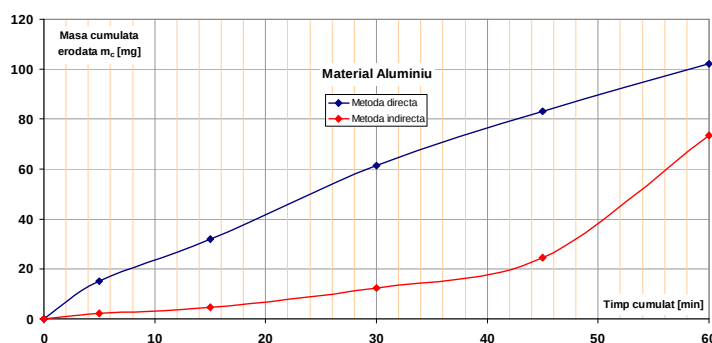


Fig. 5.2 Masa cumulată erodată funcție de timp prin metoda directă și indirectă pentru aluminiu

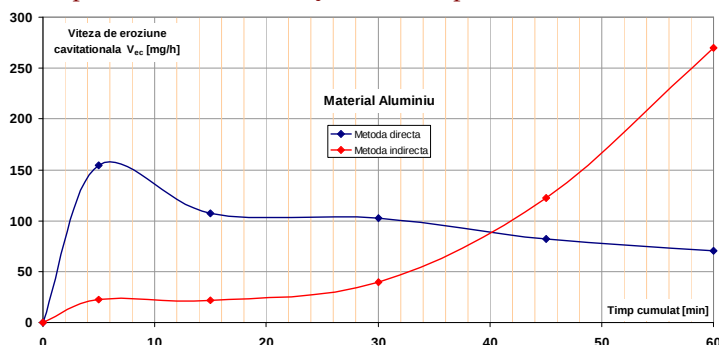


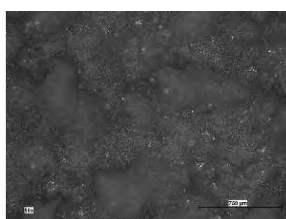
Fig. 5.3 Viteza de eroziune cavitațională funcție de timp prin metoda directă și indirectă pentru aluminiu



a) 30 minute



b) 60 minute



c) macrostructură(50x)

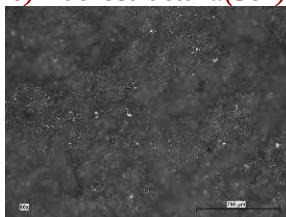
Fig. 5.4 Imagini epruvetă cavitată prin metoda directă



a) 30 minute



b) 60 minute



c) macrostructură(50x)

Fig. 5.5 Imagini epruvetă cavitată prin metoda indirectă

Se observă că metoda indirectă de cavitație este mai lentă în procesul de distrugere cavitațională a materialelor.

Evoluțiile curbelor vitezei de eroziune cavitațională și pierderile masice sunt diferite; prin metoda directă s-a pierdut 102.16 mg, în timp ce prin metoda indirectă s-a pierdut doar 73.47 mg.

O comparație privind diferențele rezultatelor celor 2 metode este prezentată în **tabelul 5.5**, unde diferența și raportul reprezintă diferența respectiv raportul dintre mărime obținută prin metoda directă față de cea obținută prin metoda indirectă.

Compararea metodei directe față de cea indirectă

Tabel 5.5

Timp cumulat	Perioada	Diferență mărimi				Raport mărimi			
		Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
		per perioada	cumulată			per perioada	cumulată		
t	Δt	Δm	mc	vec		Δm	mc	vec	
min	min	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg/min	mg/h
5	5	13.07	13.07	2.2093	132.560	7.194	7.194	6.96580	
15	10	14	27.07	1.4213	85.280	6.243	6.663	4.91121	
30	15	21.8	48.87	1.0517	63.100	3.861	4.941	2.60152	
45	15	9.75	58.62	-0.6727	-40.360	1.807	3.395	0.66956	
60	15	-29.93	28.69	-3.3180	-199.080	0.389	1.390	0.26207	

Deși metoda directă este mai eficientă, toate cercetările vor fi făcute prin metoda indirectă de cavitație, deoarece aparatul vibrator nu permite testarea prin metoda directă a materialelor din oțel și a altor materiale cum ar fi: fonte, bronzuri, materiale nemetalice, etc., sonotroda originală etalon a aparatului fiind calibrată la frecvența de 20000 Hz numai pentru aluminiu.

În standardul ASTM G32-92 [123] se specifică o distanță cuprinsă între 0.5 – 0.7 mm între sonotroda care generează bulele cavitaționale și epruvetele realizate din materialul testat; pentru toate încercările s-a ales media acestor 2 valori, adică 0.6 mm.

5.2 Cercetări de eroziune cavitațională privind reproducerea curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională

5.2.1 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul carbon de calitate C35

Pentru oțelul carbon de calitate C35, compoziția chimică și proprietățile mecanice conform certificatului producătorului se prezintă în **tabelele 5.6** respectiv **5.7**.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Compoziția chimică pentru oțelul C35 [%]

Tabel 5.6

C	Cr	Mn	Al	Ni	P	S	Si	Cu	Fe
0,39	0,14	0,68	0,007	0,09	0,010	0,004	0,24	0,14	98,29

Proprietățile mecanice pentru oțelul C35

Tabel 5.7

Rp 0.2	Rm	A	Z
[N/mm ²]	[N/mm ²]	%	%
535	707	23	42

Rezultatele încercărilor de eroziune cavitațională pe cele 2 epruvete vor fi prezentate în **tabelele 5.8÷5.11**, de unde rezultă faptul că suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 1 au pierdut fiecare câte 5.68 mg respectiv 4.78 mg, iar suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 2 au pierdut fiecare câte 7.7 mg respectiv 3.4 mg.

Din aceste tabele rezultă că pierderile de masă erodată pe perioadă a aceluiași material C35 și evoluțiile valorilor vitezei de eroziune cavitațională sunt diferite.

Această concluzie rezultă și din graficele prezentate în **figurile 5.6÷5.9**, graficele realizate în Microsoft Excel [74], privind masa cumulat erodată și curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp; media valorilor obținute din cele 4 încercări este prezentată în **tabelul 5.12**.

Timp cumulat	Perioada	<i>Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.8</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.9</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15189.63	0	0	0.0000	0.000	15184	0	0	0.0000	0.000
5	5	15187.94	1.69	1.69	0.2657	15.940	15182.58	1.42	1.42	0.2043	12.260
15	10	15186.73	1.21	2.9	0.0862	5.172	15182.13	0.45	1.87	0.0390	2.340
30	15	15186.22	0.51	3.41	0.0243	1.460	15181.68	0.45	2.32	0.0200	1.200
45	15	15186	0.22	3.63	0.0113	0.680	15181.53	0.15	2.47	0.0070	0.420
60	15	15185.88	0.12	3.75	0.0110	0.660	15181.47	0.06	2.53	0.0083	0.500
75	15	15185.67	0.21	3.96	0.0160	0.960	15181.28	0.19	2.72	0.0127	0.760
90	15	15185.4	0.27	4.23	0.0147	0.880	15181.09	0.19	2.91	0.0153	0.920
105	15	15185.23	0.17	4.4	0.0150	0.900	15180.82	0.27	3.18	0.0173	1.040
120	15	15184.95	0.28	4.68	0.0187	1.120	15180.57	0.25	3.43	0.0170	1.020
135	15	15184.67	0.28	4.96	0.0183	1.100	15180.31	0.26	3.69	0.0197	1.180
150	15	15184.4	0.27	5.23	0.0157	0.940	15179.98	0.33	4.02	0.0247	1.480
165	15	15184.2	0.2	5.43	0.0150	0.900	15179.57	0.41	4.43	0.0253	1.520
180	15	15183.95	0.25	5.68	0.0183	1.100	15179.22	0.35	4.78	0.0213	1.280

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 2 Fața 1			Tabel 5.10		Valorile obținute pe oțelul C35 - Proba 2 Fața 2			Tabel 5.11	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15627.13	0	0	0.0000	0.000	15619.43	0	0	0.0000	0.000
5	5	15625.33	1.8	1.8	0.2500	15.000	15618.5	0.93	0.93	0.1293	7.760
15	10	15625.03	0.3	2.1	0.0657	3.944	15618.34	0.16	1.09	0.0155	0.928
30	15	15623.24	1.79	3.89	0.0757	4.540	15618.12	0.22	1.31	0.0110	0.660
45	15	15622.76	0.48	4.37	0.0293	1.760	15618.01	0.11	1.42	0.0043	0.260
60	15	15622.36	0.4	4.77	0.0227	1.360	15617.99	0.02	1.44	0.0060	0.360
75	15	15622.08	0.28	5.05	0.0203	1.220	15617.83	0.16	1.6	0.0093	0.560
90	15	15621.75	0.33	5.38	0.0223	1.340	15617.71	0.12	1.72	0.0107	0.640
105	15	15621.41	0.34	5.72	0.0190	1.140	15617.51	0.2	1.92	0.0157	0.940
120	15	15621.18	0.23	5.95	0.0280	1.680	15617.24	0.27	2.19	0.0163	0.980
135	15	15620.57	0.61	6.56	0.0277	1.660	15617.02	0.22	2.41	0.0157	0.940
150	15	15620.35	0.22	6.78	0.0230	1.380	15616.77	0.25	2.66	0.0200	1.200
165	15	15619.88	0.47	7.25	0.0307	1.840	15616.42	0.35	3.01	0.0247	1.480
180	15	15619.43	0.45	7.7	0.0293	1.760	15616.03	0.39	3.4	0.0273	1.640

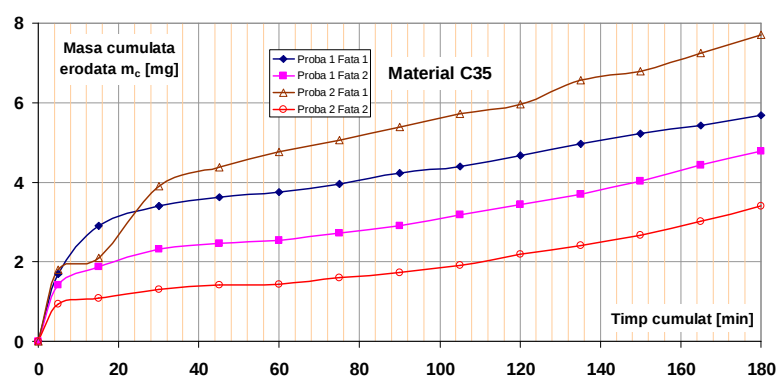


Fig. 5.6 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul C35

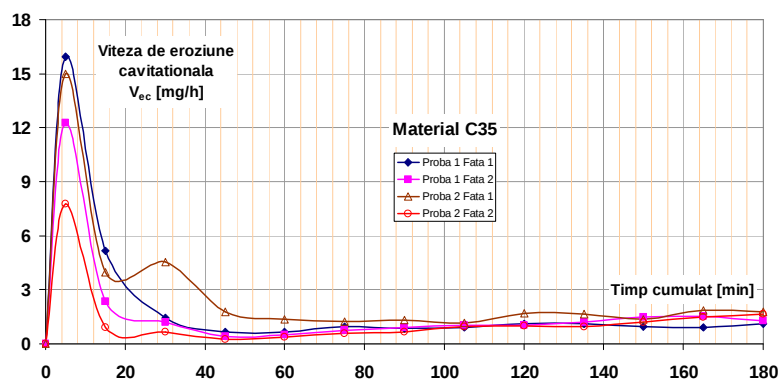


Fig. 5.7 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul C35

Media valorilor
pentru oțelul C35

Tabel
5.12

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	1.5	12.7
15	2.0	3.1
30	2.7	2.0
45	3.0	0.8
60	3.1	0.7
75	3.3	0.9
90	3.6	0.9
105	3.8	1.0
120	4.1	1.2
135	4.4	1.2
150	4.7	1.3
165	5.0	1.4
180	5.4	1.4

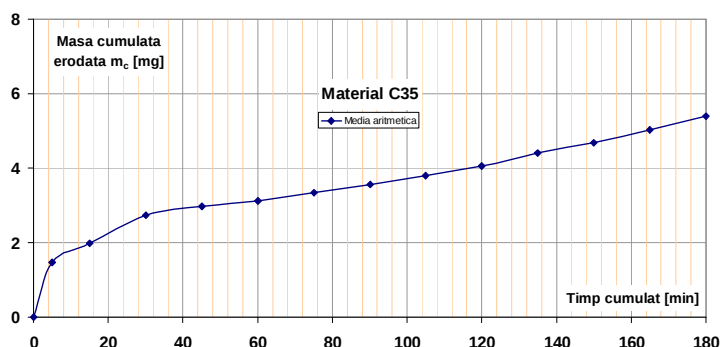


Fig. 5.8 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul C35 (media aritmetică)

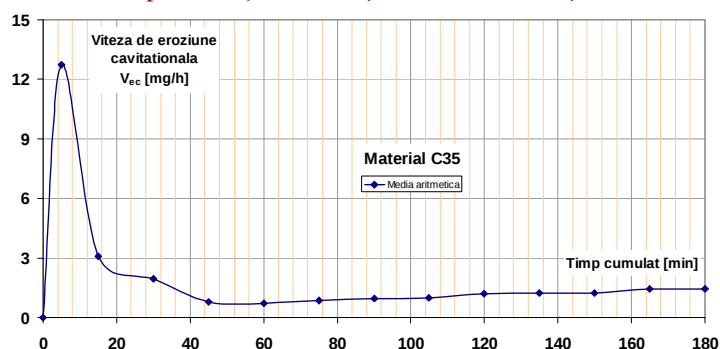


Fig. 5.9 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul C35 (media aritmetică)

Din graficul din figura 5.6 se observă că de la timpul de 30 de minute și până la final curbele suprafețelor au aceeași alură, ceea ce înseamnă că aceste curbe se produc în proporție de 84 %. Din graficul vitezei din figura 5.7 rezultă faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și începutul stadiului de accelerare.

În figura 5.10 (a, b, c, d) se prezintă macrofotografii ale celor 2 epruvete testate din oțelul C35 înainte și după cavitație. Aceste fotografii au fost realizate cu un aparat de fotografiat așa cum se observă în figura 5.10 (a, c) și cu un stereomicroscop [44] la o mărire mai mare (figura 5.10 – b, d), pentru o claritate mai bună macrostructurii materialului.



Proba 1 Fața 1



Proba 1 Fața 2



Proba 2 Fața 1



Proba 2 Fața 2

a) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație

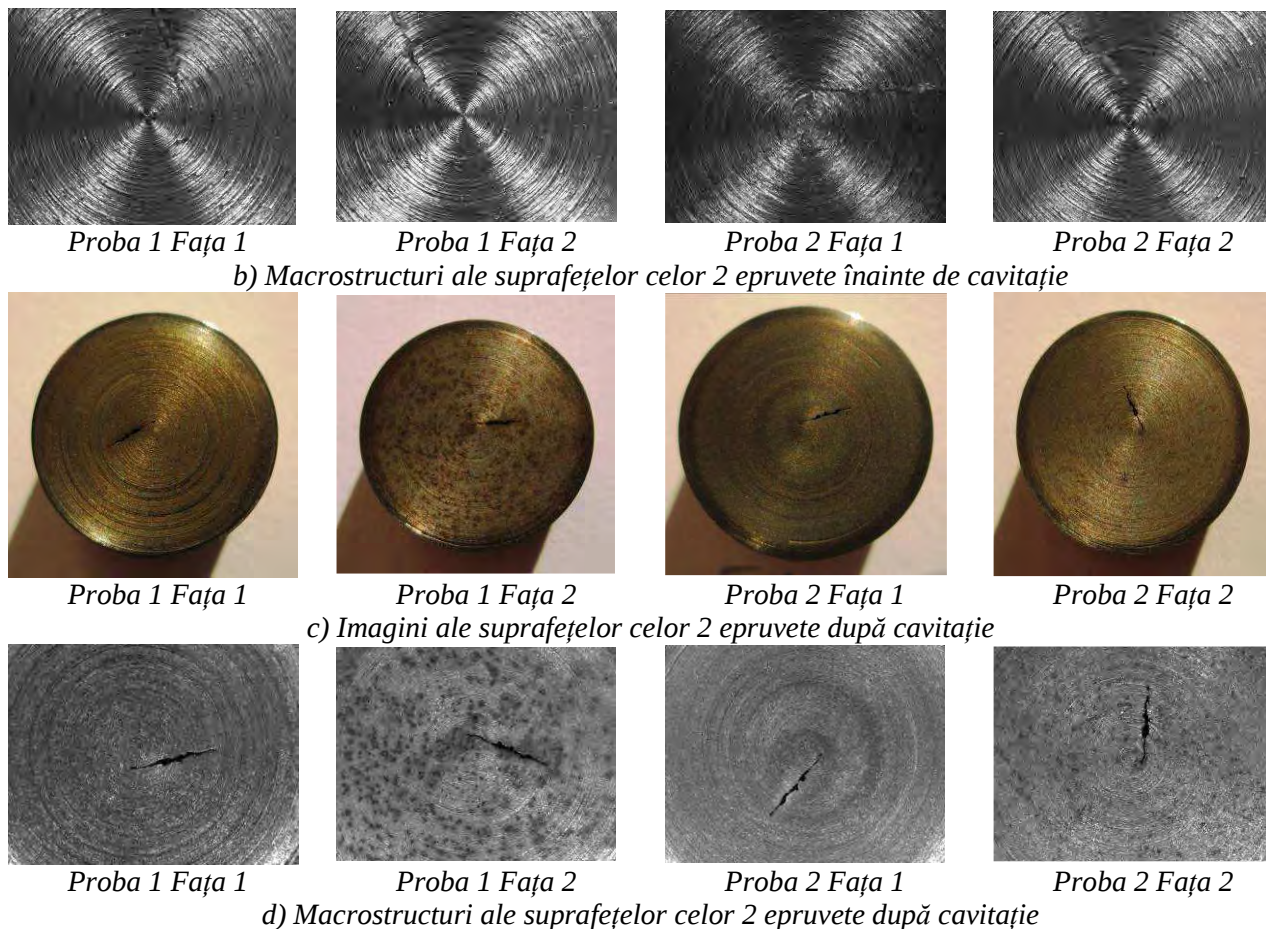


Fig. 5.10 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțel C35 înainte și după cavitație

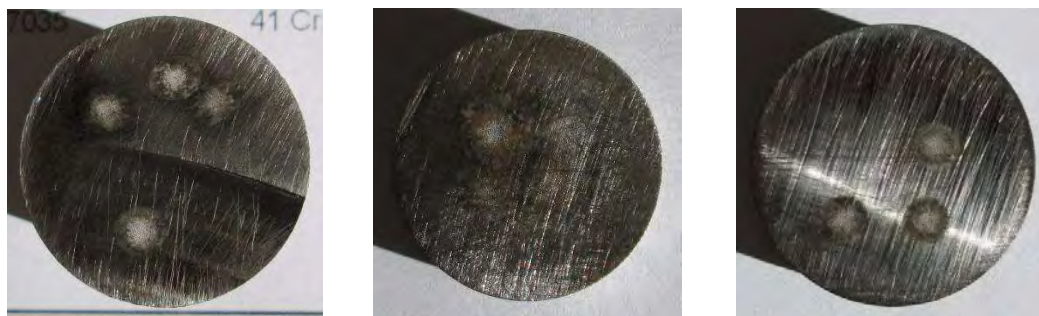
Se observă faptul că epruvetele din acest material, după procesul de prelucrare pe strung au prezentat câte o fisură pe suprafețele pe care au fost testate. După testul de cavitație fisurile s-au mărit și s-a observat faptul că au străpuns epruvetele în adâncime, așa cum se arată în **figura 5.10 d)**. Datorită acestor fisuri epruvetele din acest material nu vor mai fi testate suplimentar pentru al doilea tip de încercări, cu durată mai mare de eroziune, efectuate pe oțeluri &5.4, după cum rezultă și din **tabelul 5.2**.

5.2.2 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 41Cr4

Epruvetele testate au fost sub formă de cilindru $\Phi 16 \times 10$, debitatate pe o mașină de debitat [44]; verificarea compoziției chimice s-a realizat cu spectrometru aflat în dotarea UEMR.

În **figura 5.11** se prezintă imagini ale oțelului 41Cr4 a cărei compoziție chimică s-a verificat prin intermediul spectrometrului și imagini pentru oțelurile 26CrMo4 și 34CrNiMo6, supuse de asemenea încercărilor de eroziune cavitațională, &5.2.4 și &5.2.5; în **tabelul 5.13** se prezintă compoziția chimică a acestor oțeluri.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice



a) Oțel 41Cr4

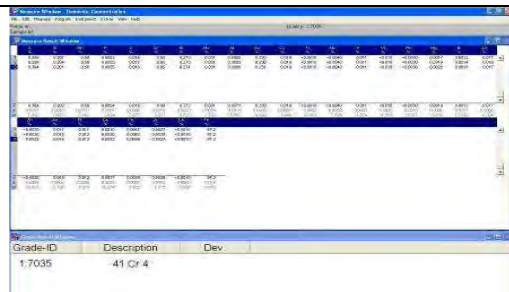
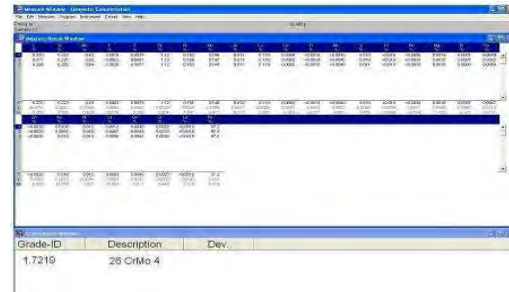
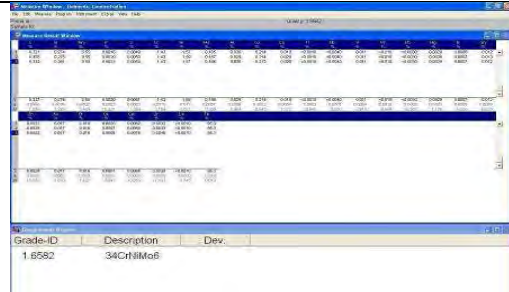
b) Oțel 26CrMo4

c) Oțel 34CrNiMo6

Fig. 5.11 Imaginile după testul de analiză chimică realizat cu spectrometrul

Compoziția chimică a oțelurilor aliate de îmbunătățire

Tabel 5.13

Nr. crt.	Denumire element	Tipul materialului			Imagine soft spectrometru
		41Cr4	26CrMo4	34CrNiMo6	
1	C	0.394	0.270	0.327	
2	Si	0.202	0.223	0.276	
3	Mn	0.59	0.63	0.55	
4	P	0.0054	0.0023	0.0020	
5	S	0.016	0.0079	0.0051	
6	Cr	0.95	1.12	1.43	
7	Ni	0.272	0.161	1.58	
8	Mo	0.031	0.148	0.186	
9	Al	0.0071	0.012	0.029	
10	Cu	0.230	0.119	0.214	
11	Co	0.019	0.0065	0.019	
12	Ti	<0.0010	<0.0010	<0.0010	
13	Nb	<0.0040	<0.0040	<0.0040	
14	V	0.011	0.010	0.011	
15	W	<0.010	<0.010	<0.010	
16	Pb	<0.0030	<0.030	<0.0030	
17	Mg	0.0019	0.0018	0.0029	
18	B	0.0012	0.0007	0.0007	
19	Sn	0.017	0.0047	0.012	
20	Zn	<0.0020	<0.0020	0.0028	
21	As	0.016	0.010	0.017	
22	Bi	0.012	0.012	0.016	
23	Ca	0.0017	0.0009	0.0007	
24	Ce	0.0059	0.0049	0.0068	
25	Zr	0.0028	0.0023	0.0035	
26	La	<0.0010	<0.0010	<0.0010	
27	Fe	97.2	97.2	95.3	

Rezultatele cercetării de eroziune cavitațională pe oțelul de îmbunătățire 41Cr4 se prezintă în continuare în **tabelele 5.14÷5.17**, rezultate care centralizează cele 4 încercări ale celor 2 epruvete.

*Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate
la fabricația componentelor de turbine hidraulice*

Timp cumulat	Perioada	<i>Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.14</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.15</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15165.97	0	0	0.0000	0.000	15164.32	0	0	0.0000	0.000
5	5	15165.81	0.16	0.16	0.0237	1.420	15164.12	0.2	0.2	0.0310	1.860
15	10	15165.74	0.07	0.23	0.0061	0.364	15163.99	0.13	0.33	0.0094	0.564
30	15	15165.67	0.07	0.3	0.0037	0.220	15163.93	0.06	0.39	0.0097	0.580
45	15	15165.63	0.04	0.34	0.0047	0.280	15163.7	0.23	0.62	0.0103	0.620
60	15	15165.53	0.1	0.44	0.0073	0.440	15163.62	0.08	0.7	0.0077	0.460
75	15	15165.41	0.12	0.56	0.0067	0.400	15163.47	0.15	0.85	0.0113	0.680
90	15	15165.33	0.08	0.64	0.0073	0.440	15163.28	0.19	1.04	0.0137	0.820
105	15	15165.19	0.14	0.78	0.0080	0.480	15163.06	0.22	1.26	0.0153	0.920
120	15	15165.09	0.1	0.88	0.0117	0.700	15162.82	0.24	1.5	0.0183	1.100
135	15	15164.84	0.25	1.13	0.0117	0.700	15162.51	0.31	1.81	0.0233	1.400
150	15	15164.74	0.1	1.23	0.0140	0.840	15162.12	0.39	2.2	0.0237	1.420
165	15	15164.42	0.32	1.55	0.0200	1.200	15161.8	0.32	2.52	0.0273	1.640
180	15	15164.14	0.28	1.83	0.0173	1.040	15161.3	0.5	3.02	0.0393	2.360

Timp cumulat	Perioada	<i>Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 2 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.16</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul 41Cr4 - Proba 2 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.17</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15018.52	0	0	0.0000	0.000	15016.62	0	0	0.0000	0.000
5	5	15018.27	0.25	0.25	0.0363	2.180	15016.03	0.59	0.59	0.0793	4.760
15	10	15018.18	0.09	0.34	0.0067	0.404	15016.01	0.02	0.61	0.0025	0.152
30	15	15018.13	0.05	0.39	0.0030	0.180	15015.96	0.05	0.66	0.0050	0.300
45	15	15018.09	0.04	0.43	0.0053	0.320	15015.86	0.1	0.76	0.0093	0.560
60	15	15017.97	0.12	0.55	0.0057	0.340	15015.68	0.18	0.94	0.0077	0.460
75	15	15017.92	0.05	0.6	0.0067	0.400	15015.63	0.05	0.99	0.0103	0.620
90	15	15017.77	0.15	0.75	0.0080	0.480	15015.37	0.26	1.25	0.0110	0.660
105	15	15017.68	0.09	0.84	0.0107	0.640	15015.3	0.07	1.32	0.0120	0.720
120	15	15017.45	0.23	1.07	0.0197	1.180	15015.01	0.29	1.61	0.0127	0.760
135	15	15017.09	0.36	1.43	0.0150	0.900	15014.92	0.09	1.7	0.0150	0.900
150	15	15017	0.09	1.52	0.0163	0.980	15014.56	0.36	2.06	0.0197	1.180
165	15	15016.6	0.4	1.92	0.0210	1.260	15014.33	0.23	2.29	0.0200	1.200
180	15	15016.37	0.23	2.15	0.0097	0.580	15013.96	0.37	2.66	0.0293	1.760

În figurile 5.12÷5.15 se prezintă graficele pentru masa erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp pentru fiecare suprafață cercetată, iar în tabelul 5.18 se prezintă media aritmetică a valorilor.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

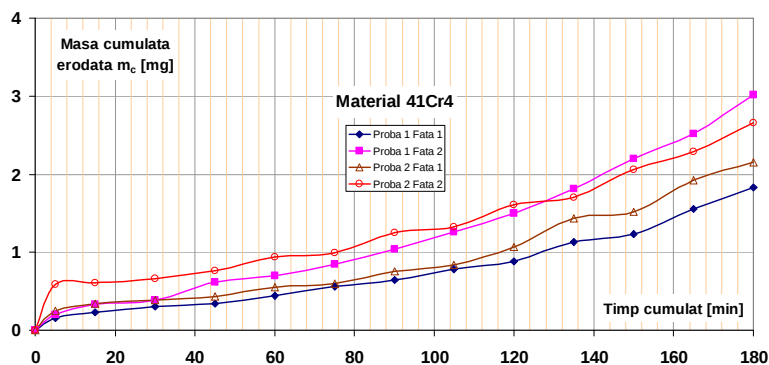


Fig. 5.12 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 41Cr4

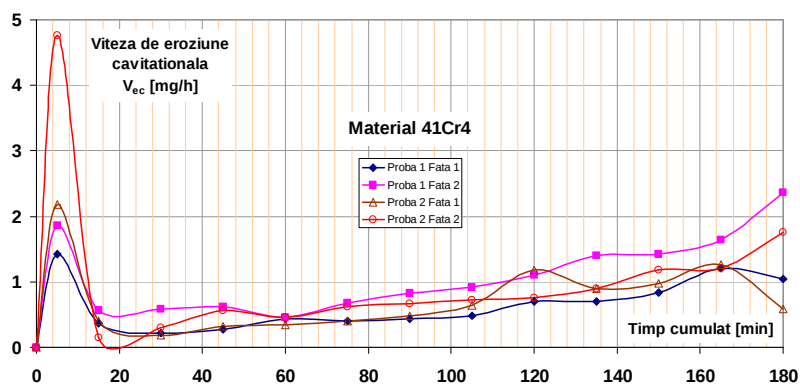


Fig. 5.13 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 41Cr4

Media valorilor
pentru oțelul 41Cr4

Tabel
5.18

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.3	2.6
15	0.4	0.4
30	0.4	0.3
45	0.5	0.4
60	0.7	0.4
75	0.8	0.5
90	0.9	0.6
105	1.1	0.7
120	1.3	0.9
135	1.5	1.0
150	1.8	1.1
165	2.1	1.3
180	2.4	1.4

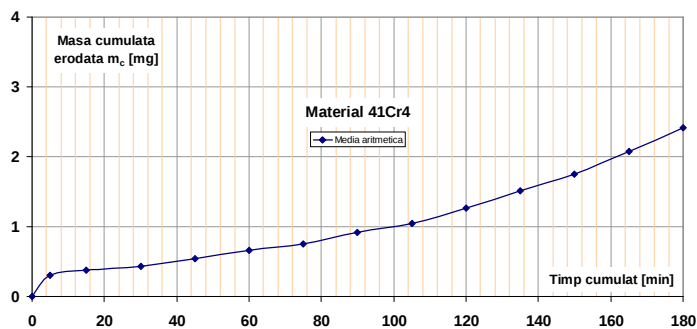


Fig. 5.14 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 41Cr4 (media aritmetică)

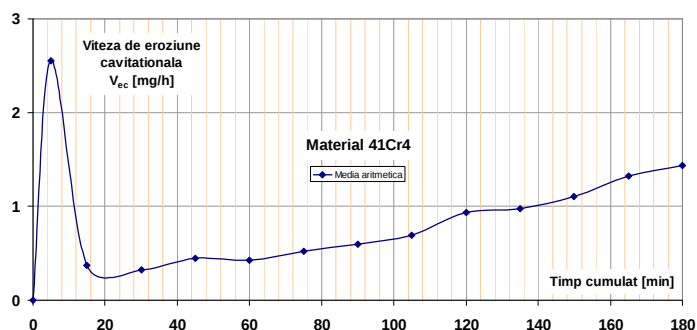


Fig. 5.15 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 41Cr4 (media aritmetică)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Rezultă faptul că suprafețele 1, 2, 3, 4 aparținând epruvetei 1 respectiv 2, au pierdut fiecare câte 1.83, 3.02, 2.15 și 2.66 mg, curbele având aceeași alură. Din graficul din **figura 5.13**, rezultă faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare.

În **figura 5.16** se prezintă și macrofotografiile pentru epruvetele din acest material înainte și după cavitație, fotografii realizate cu un aparat de fotografiat respectiv cu un stereomicroscop la o mărime mai mare.

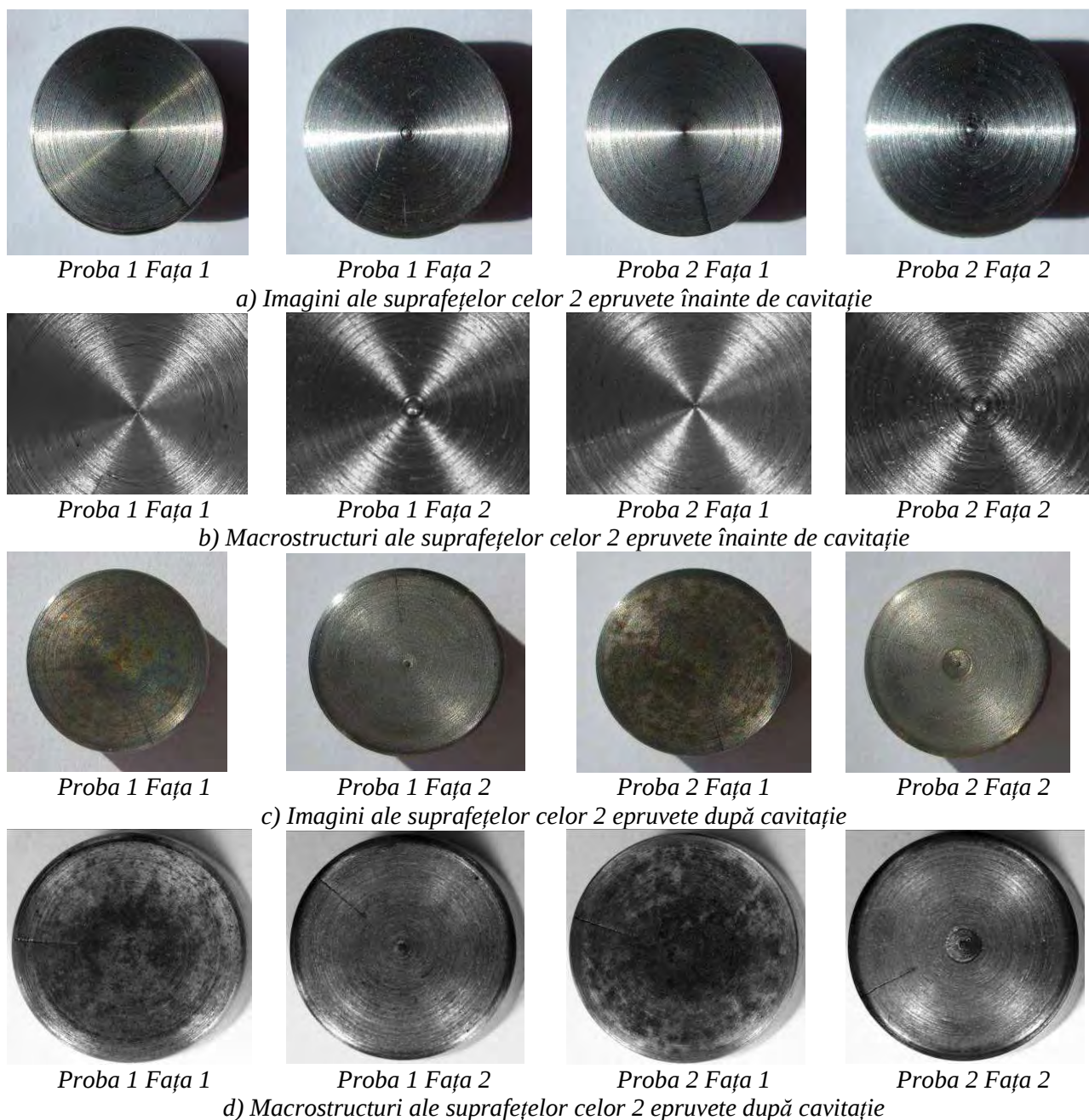


Fig. 5.16 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul 41Cr4 înainte și după cavitație

Se observă faptul că epruvetele din acest material, după procesul de prelucrare au prezentat câte o mică fisură, pentru că toate au fost prelucrate din aceeași bară. După testul de cavitație aceste fisuri se pot observa în **figura. 5.16 d)**. Din acest motiv epruvetele din materialul 41Cr4 nu au mai fost supuse și la al doilea tip de încercări de durată.

Se observă faptul că fața 1 a epruvetei 1 a pierdut doar 1,83 mg, ceea ce conduce la concluzia că acest material are o bună rezistență la eroziune cavitațională.

5.2.3 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul carbon de calitate OLC45

Acest oțel a fost supus la cavitație, pe aparatul vibrator cu sonotroda din materialul de titan prin metoda indirectă [85]. În **tabelul 5.19** respectiv **tabelul 5.20** se prezintă compoziția chimică și proprietățile mecanice ale acestui oțel.

*Compoziția chimică conform certificatului
producătorului pentru OLC45 [%]*

Tabel 5.19

C	Cr	Mn	Ni	P	S	Si	Cu	Fe
0,44	0,16	0,61	0,13	0,007	0,005	0,27	0,26	98,11

*Proprietățile mecanice pentru
OLC45 Tabel 5.20*

Rm	A
[N/mm ²]	%
695	13

În **tabelele 5.21÷5.24** se prezintă rezultatele încercărilor de eroziune cavitațională ale oțelului OLC45 pe cele 4 suprafețe ale celor 2 epruvete.

Timp cumu- lat	Peri- oada	<i>Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.21</i>		<i>Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.22</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată per perioada	cumu- lat	Viteza de eroziune cavitaționala		Masa epruveta	Masa erodată per perioada	cumu- lat	Viteza de eroziune cavitaționala	
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14956.5	0	0	0.0000	0.000	14948.82	0	0	0.0000	0.000
5	5	14956.31	0.19	0.19	0.0270	1.620	14948.64	0.18	0.18	0.0253	1.520
15	10	14956.26	0.05	0.24	0.0043	0.260	14948.6	0.04	0.22	0.0035	0.208
30	15	14956.21	0.05	0.29	0.0080	0.480	14948.56	0.04	0.26	0.0050	0.300
45	15	14956.02	0.19	0.48	0.0127	0.760	14948.45	0.11	0.37	0.0107	0.640
60	15	14955.83	0.19	0.67	0.0197	1.180	14948.24	0.21	0.58	0.0207	1.240
75	15	14955.43	0.4	1.07	0.0317	1.900	14947.83	0.41	0.99	0.0287	1.720
90	15	14954.88	0.55	1.62	0.0390	2.340	14947.38	0.45	1.44	0.0357	2.140
105	15	14954.26	0.62	2.24	0.0473	2.840	14946.76	0.62	2.06	0.0460	2.760
120	15	14953.46	0.8	3.04	0.0560	3.360	14946	0.76	2.82	0.0550	3.300
135	15	14952.58	0.88	3.92	0.0670	4.020	14945.11	0.89	3.71	0.0650	3.900
150	15	14951.45	1.13	5.05	0.0783	4.700	14944.05	1.06	4.77	0.0763	4.580
165	15	14950.23	1.22	6.27	0.0877	5.260	14942.82	1.23	6	0.0863	5.180
180	15	14948.82	1.41	7.68	0.1003	6.020	14941.46	1.36	7.36	0.0950	5.700

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 2 Fața 1			Tabel 5.23		Valorile obținute pe oțel OLC45 - Proba 2 Fața 2			Tabel 5.24	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14963.26	0	0	0.0000	0.000	14955.33	0	0	0.0000	0.000
5	5	14963	0.26	0.26	0.0387	2.320	14954.96	0.37	0.37	0.0530	3.180
15	10	14962.88	0.12	0.38	0.0077	0.464	14954.85	0.11	0.48	0.0106	0.636
30	15	14962.86	0.02	0.4	0.0033	0.200	14954.7	0.15	0.63	0.0107	0.640
45	15	14962.78	0.08	0.48	0.0077	0.460	14954.53	0.17	0.8	0.0180	1.080
60	15	14962.63	0.15	0.63	0.0160	0.960	14954.16	0.37	1.17	0.0287	1.720
75	15	14962.3	0.33	0.96	0.0267	1.600	14953.67	0.49	1.66	0.0387	2.320
90	15	14961.83	0.47	1.43	0.0343	2.060	14953	0.67	2.33	0.0497	2.980
105	15	14961.27	0.56	1.99	0.0443	2.660	14952.18	0.82	3.15	0.0613	3.680
120	15	14960.5	0.77	2.76	0.0620	3.720	14951.16	1.02	4.17	0.0737	4.420
135	15	14959.41	1.09	3.85	0.0737	4.420	14949.97	1.19	5.36	0.0843	5.060
150	15	14958.29	1.12	4.97	0.0847	5.080	14948.63	1.34	6.7	0.0960	5.760
165	15	14956.87	1.42	6.39	0.0987	5.920	14947.09	1.54	8.24	0.1047	6.280
180	15	14955.33	1.54	7.93	0.1067	6.400	14945.49	1.6	9.84	0.1087	6.520

În figurile 5.17÷5.20 se prezintă graficele pentru masa erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în tabelul 5.25 media aritmetică a valorilor obținute după 4 încercări.

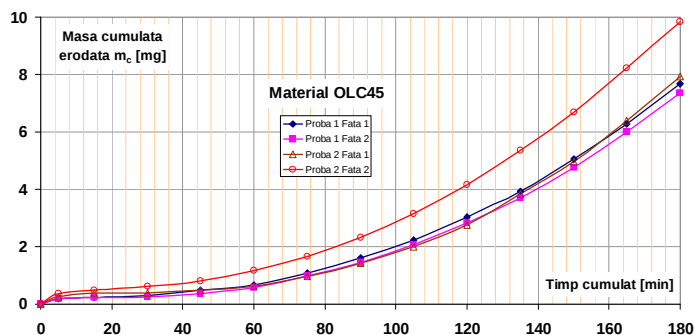


Fig. 5.17 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45

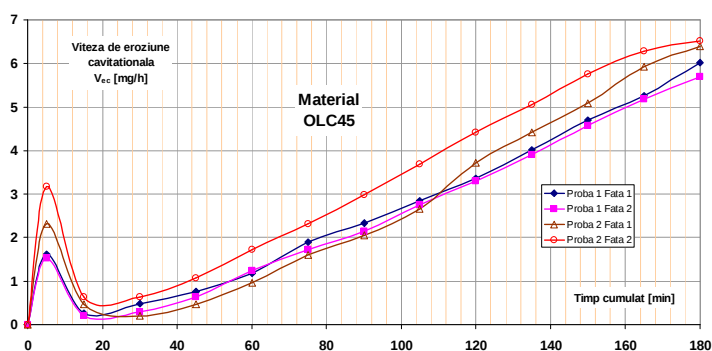


Fig. 5.18 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45

Media valorilor
pentru oțelul OLC45

Tabel
5.25

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.3	2.2
15	0.3	0.4
30	0.4	0.4
45	0.5	0.7
60	0.8	1.3
75	1.2	1.9
90	1.7	2.4
105	2.4	3.0
120	3.2	3.7
135	4.2	4.3
150	5.4	5.0
165	6.7	5.7
180	8.2	6.2

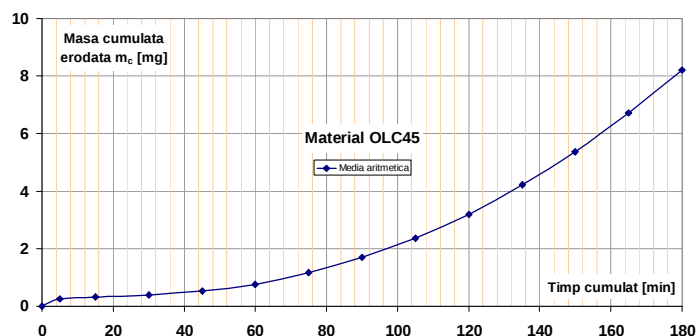


Fig. 5.19 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 (media aritmetică)

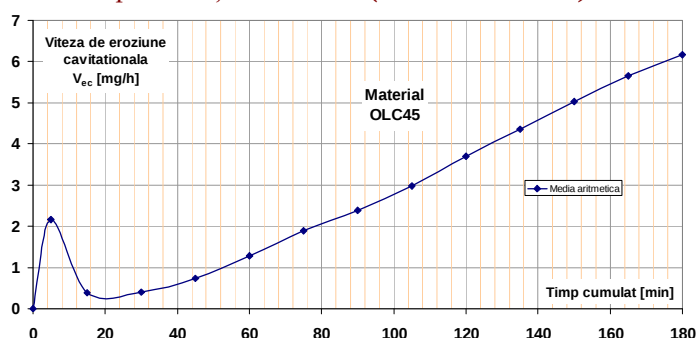


Fig. 5.20 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 (media aritmetică)

Se observă că suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 1 și suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 2 au pierdut fiecare din masa lor câte 7.68, 7.36, 7.93 respectiv 9.84 mg. Curbele primelor 3 suprafețe din figura 5.17 se suprapun, ceea ce nu se întâmplă pentru curba corespunzătoare faței 2 a probei 2.

Din graficul vitezei de eroziune cavitațională reiese faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare, toate aceste curbe având însă aceeași alură pentru cele 4 încercări.

În figura 5.21 se prezintă macrofotografii înainte de cavitație și după cavitație ale celor 2 epruvete din OLC45.



Proba 1 Fața 1



Proba 1 Fața 2



Proba 2 Fața 1



Proba 2 Fața 2

a) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

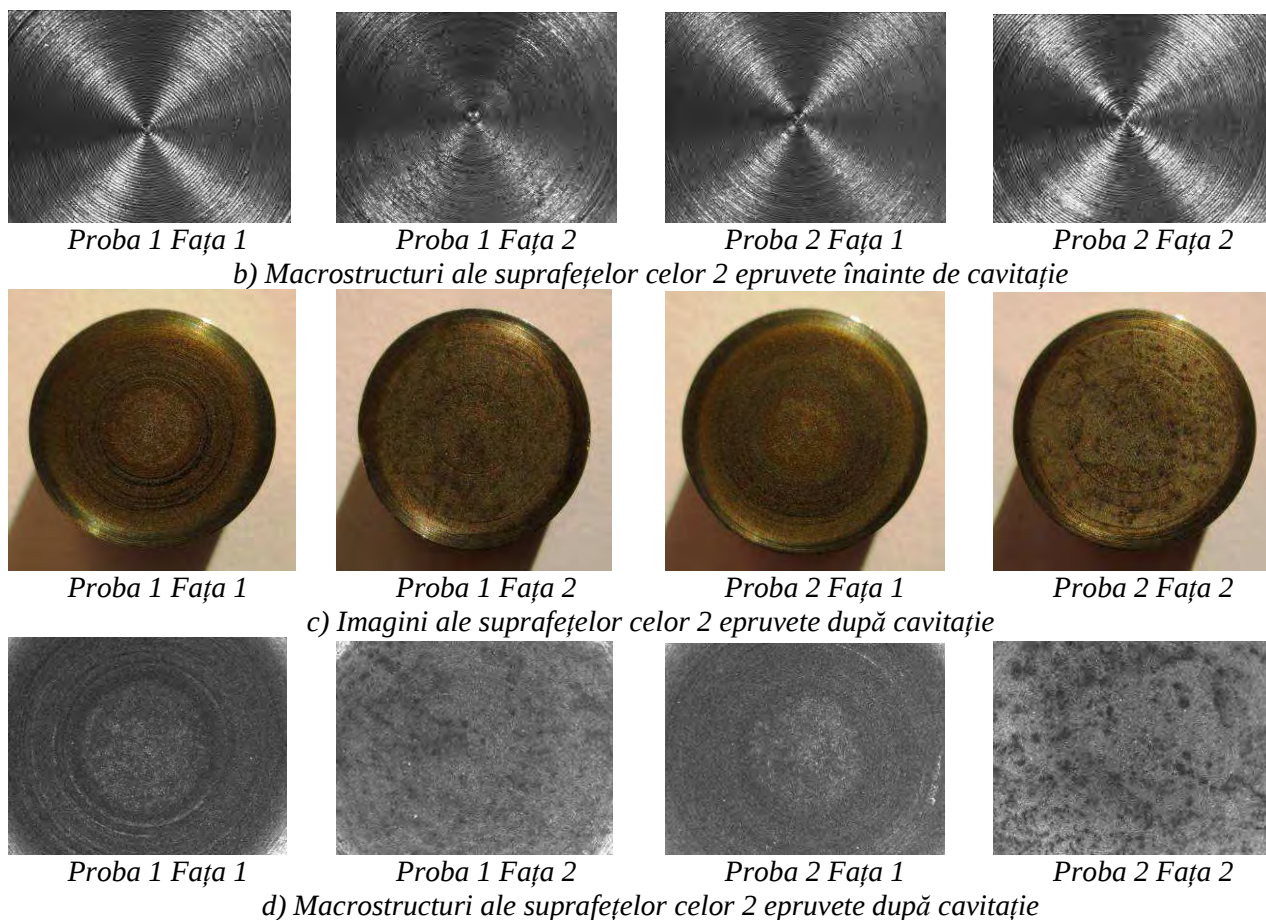


Fig. 5.21 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din OLC45 înainte și după cavitație

5.2.4 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 26CrMo4

Acest oțel cu compoziția chimică descrisă în **tabelul 5.13**, a fost supus la testele de cavitație, pe un timp total de 180 de minute, divizat pe câte o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv pe 11 perioade a câte 15 minute.

Toate aceste încercări cu durată maximă de 180 de minute, au fost efectuate pe cele 4 suprafețe ale celor 2 epruvete din oțelul 26CrMo4, totalizând un timp de 720 de minute, după cum rezultă și din **tabelul 5.2**, tabel în care au fost centralizate tipurile de încercări.

Rezultatele obținute pe durata totală de 720 de minute privind cele 4 încercări constau în curbele pierderii de material erodat și ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și din media aritmetică a valorilor încercărilor, prezentate în **tabelele 5.26 ÷ 5.30**, de unde rezultă diferențele referitoare la pierderea de material pe perioadă și cumulat, precum și valorile vitezei de eroziune cavitațională.

*Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate
la fabricația componentelor de turbine hidraulice*

Timp cumu- lat	Peri- oada	<i>Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.26</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.27</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V_{ec}		m	Δm	mc	V_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14837.85	0	0	0.0000	0.000	14833.63	0	0	0.0000	0.000
5	5	14837.68	0.17	0.17	0.0277	1.660	14833.56	0.07	0.07	0.0110	0.660
15	10	14837.53	0.15	0.32	0.0106	0.636	14833.51	0.05	0.12	0.0038	0.228
30	15	14837.47	0.06	0.38	0.0057	0.340	14833.48	0.03	0.15	0.0027	0.160
45	15	14837.36	0.11	0.49	0.0060	0.360	14833.43	0.05	0.2	0.0047	0.280
60	15	14837.29	0.07	0.56	0.0083	0.500	14833.34	0.09	0.29	0.0093	0.560
75	15	14837.11	0.18	0.74	0.0127	0.760	14833.15	0.19	0.48	0.0147	0.880
90	15	14836.91	0.2	0.94	0.0167	1.000	14832.9	0.25	0.73	0.0190	1.140
105	15	14836.61	0.3	1.24	0.0223	1.340	14832.58	0.32	1.05	0.0220	1.320
120	15	14836.24	0.37	1.61	0.0290	1.740	14832.24	0.34	1.39	0.0280	1.680
135	15	14835.74	0.5	2.11	0.0377	2.260	14831.74	0.5	1.89	0.0343	2.060
150	15	14835.11	0.63	2.74	0.0440	2.640	14831.21	0.53	2.42	0.0387	2.320
165	15	14834.42	0.69	3.43	0.0487	2.920	14830.58	0.63	3.05	0.0427	2.560
180	15	14833.65	0.77	4.2	0.0540	3.240	14829.93	0.65	3.7	0.0440	2.640

Timp cumu- lat	Peri- oada	<i>Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 2 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.28</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul 26CrMo6 - Proba 2 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.29</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V_{ec}		m	Δm	mc	V_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14726.7	0	0	0.0000	0.000	14722.22	0	0	0.0000	0.000
5	5	14726.59	0.11	0.11	0.0167	1.000	14722.1	0.12	0.12	0.0177	1.060
15	10	14726.53	0.06	0.17	0.0044	0.264	14722.05	0.05	0.17	0.0051	0.308
30	15	14726.5	0.03	0.2	0.0043	0.260	14721.97	0.08	0.25	0.0057	0.340
45	15	14726.4	0.1	0.3	0.0083	0.500	14721.88	0.09	0.34	0.0080	0.480
60	15	14726.25	0.15	0.45	0.0113	0.680	14721.73	0.15	0.49	0.0147	0.880
75	15	14726.06	0.19	0.64	0.0203	1.220	14721.44	0.29	0.78	0.0200	1.200
90	15	14725.64	0.42	1.06	0.0233	1.400	14721.13	0.31	1.09	0.0217	1.300
105	15	14725.36	0.28	1.34	0.0270	1.620	14720.79	0.34	1.43	0.0307	1.840
120	15	14724.83	0.53	1.87	0.0367	2.200	14720.21	0.58	2.01	0.0347	2.080
135	15	14724.26	0.57	2.44	0.0413	2.480	14719.75	0.46	2.47	0.0377	2.260
150	15	14723.59	0.67	3.11	0.0463	2.780	14719.08	0.67	3.14	0.0473	2.840
165	15	14722.87	0.72	3.83	0.0510	3.060	14718.33	0.75	3.89	0.0540	3.240
180	15	14722.06	0.81	4.64	0.0570	3.420	14717.46	0.87	4.76	0.0620	3.720

În figurile 5.22÷5.25 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și media valorilor conform tabelului 5.30.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

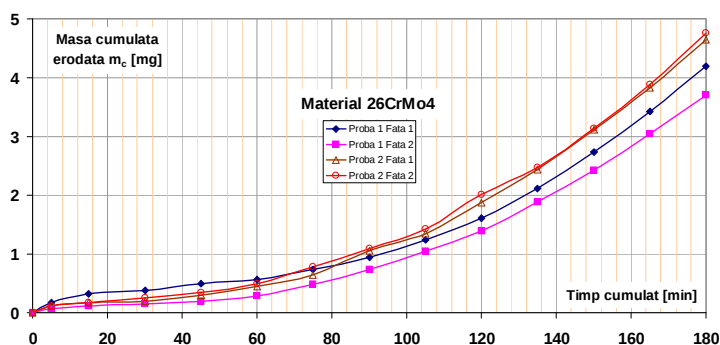


Fig. 5.22 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6

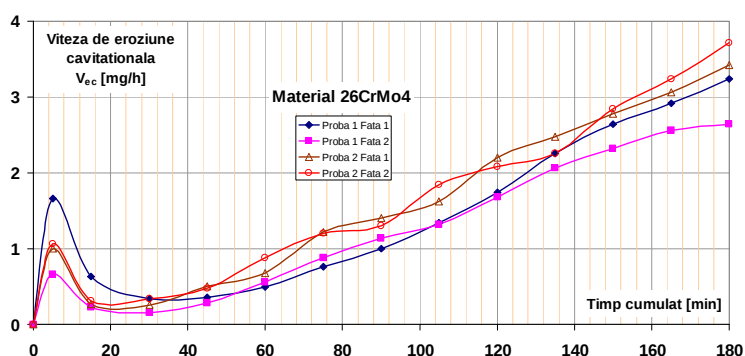


Fig. 5.23 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6

Media valorilor
pentru oțelul 26CrMo6

Tabel
5.30

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.1	1.1
15	0.2	0.4
30	0.2	0.3
45	0.3	0.4
60	0.4	0.7
75	0.7	1.0
90	1.0	1.2
105	1.3	1.5
120	1.7	1.9
135	2.2	2.3
150	2.9	2.6
165	3.5	2.9
180	4.3	3.3

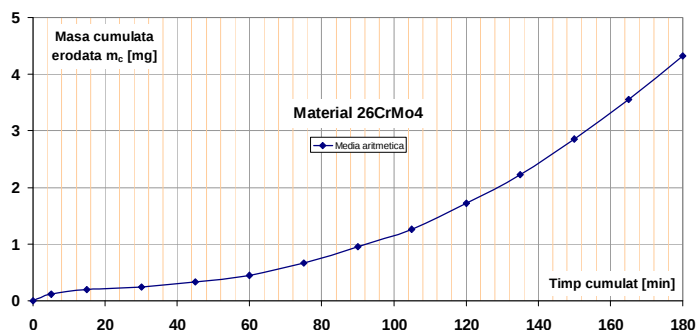


Fig. 5.24 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6 (media aritmetică)

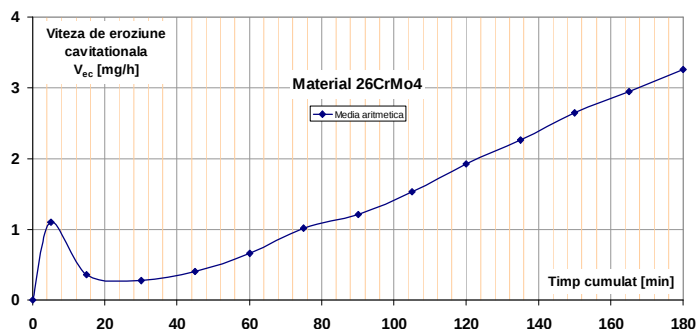


Fig. 5.25 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo6 (media aritmetică)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 1 și suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 2 au pierdut din masa inițială câte 4.2, 3.7, 4.64 respectiv 4.76 mg. Curbele celor 4 suprafețe sunt destul de apropiate diferențele minime fiind între curbele suprafețelor 1 și 2 ale epruvetei 2, **figura 5.22**.

Din graficul vitezei se observă faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare. În **figura 5.26** se prezintă macrofotografii ale suprafețelor celor 2 epruvete din acest material înainte și după cavitație.

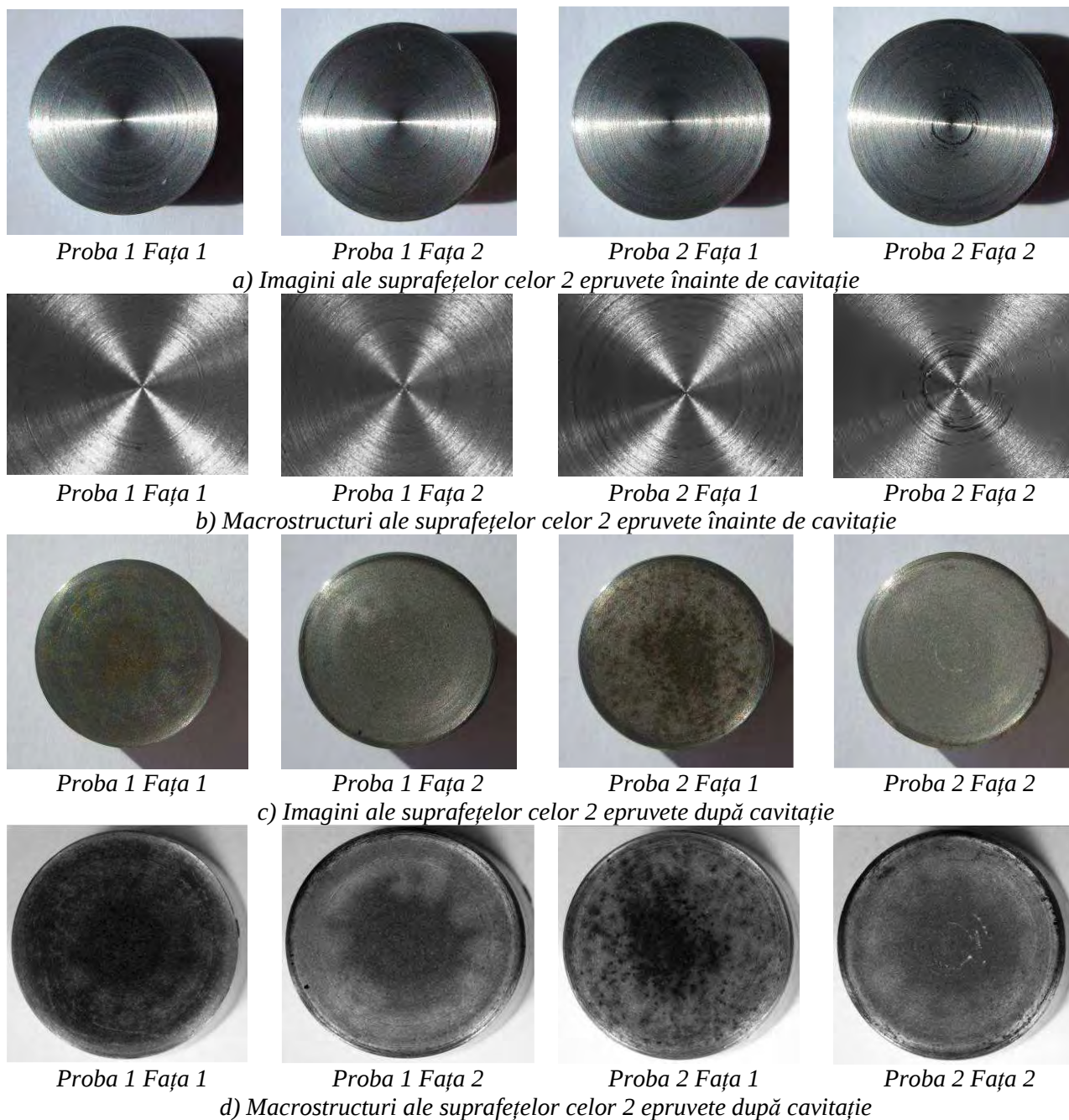


Fig. 5.26 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din 26CrMo4 înainte și după cavitație

5.2.5 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul aliat de îmbunătățire 34CrNiMo6

Acest oțel a fost supus testului de cavitație pentru o perioadă totală de 180 minute, obținând rezultatele prezentate în **tabelele 5.31÷5.34**.

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 1 Fața 1			Tabel 5.31		Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 1 Fața 2			Tabel 5.32	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15297.36	0	0	0.0000	0.000	15294.78	0	0	0.0000	0.000
5	5	15297.3	0.06	0.06	0.0083	0.500	15294.71	0.07	0.07	0.0113	0.680
15	10	15297.29	0.01	0.07	0.0022	0.132	15294.65	0.06	0.13	0.0052	0.312
30	15	15297.23	0.06	0.13	0.0033	0.200	15294.59	0.06	0.19	0.0040	0.240
45	15	15297.19	0.04	0.17	0.0050	0.300	15294.53	0.06	0.25	0.0073	0.440
60	15	15297.08	0.11	0.28	0.0077	0.460	15294.37	0.16	0.41	0.0103	0.620
75	15	15296.96	0.12	0.4	0.0100	0.600	15294.22	0.15	0.56	0.0110	0.660
90	15	15296.78	0.18	0.58	0.0140	0.840	15294.04	0.18	0.74	0.0130	0.780
105	15	15296.54	0.24	0.82	0.0150	0.900	15293.83	0.21	0.95	0.0157	0.940
120	15	15296.33	0.21	1.03	0.0163	0.980	15293.57	0.26	1.21	0.0187	1.120
135	15	15296.05	0.28	1.31	0.0213	1.280	15293.27	0.3	1.51	0.0217	1.300
150	15	15295.69	0.36	1.67	0.0263	1.580	15292.92	0.35	1.86	0.0250	1.500
165	15	15295.26	0.43	2.1	0.0303	1.820	15292.52	0.4	2.26	0.0293	1.760
180	15	15294.78	0.48	2.58	0.0337	2.020	15292.04	0.48	2.74	0.0347	2.080

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 2 Fața 1			Tabel 5.33		Valorile obținute pe oțelul 34CrNiMo6 - Proba 2 Fața 2			Tabel 5.34	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15057.11	0	0	0.0000	0.000	15054.72	0	0	0.0000	0.000
5	5	15056.99	0.12	0.12	0.0183	1.100	15054.66	0.06	0.06	0.0117	0.700
15	10	15056.92	0.07	0.19	0.0047	0.284	15054.55	0.11	0.17	0.0074	0.444
30	15	15056.9	0.02	0.21	0.0010	0.060	15054.52	0.03	0.2	0.0017	0.100
45	15	15056.89	0.01	0.22	0.0053	0.320	15054.5	0.02	0.22	0.0040	0.240
60	15	15056.74	0.15	0.37	0.0083	0.500	15054.4	0.1	0.32	0.0033	0.200
75	15	15056.64	0.1	0.47	0.0083	0.500	15054.4	0	0.32	0.0050	0.300
90	15	15056.49	0.15	0.62	0.0103	0.620	15054.25	0.15	0.47	0.0080	0.480
105	15	15056.33	0.16	0.78	0.0133	0.800	15054.16	0.09	0.56	0.0083	0.500
120	15	15056.09	0.24	1.02	0.0153	0.920	15054	0.16	0.72	0.0100	0.600
135	15	15055.87	0.22	1.24	0.0180	1.080	15053.86	0.14	0.86	0.0107	0.640
150	15	15055.55	0.32	1.56	0.0240	1.440	15053.68	0.18	1.04	0.0140	0.840
165	15	15055.15	0.4	1.96	0.0253	1.520	15053.44	0.24	1.28	0.0157	0.940
180	15	15054.79	0.36	2.32	0.0227	1.360	15053.21	0.23	1.51	0.0150	0.900

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

În figurile 5.27÷5.30 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în tabelul 5.35 se prezintă media aritmetică a valorilor încercărilor.

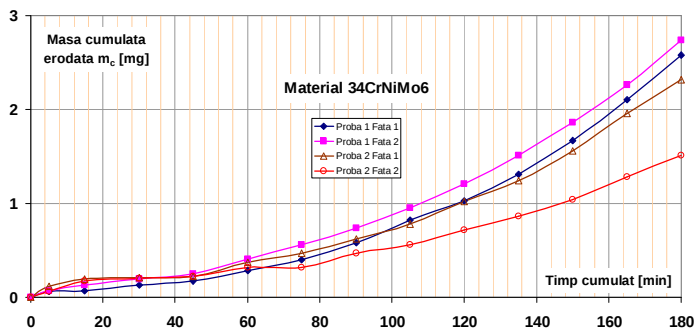


Fig. 5.27 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6

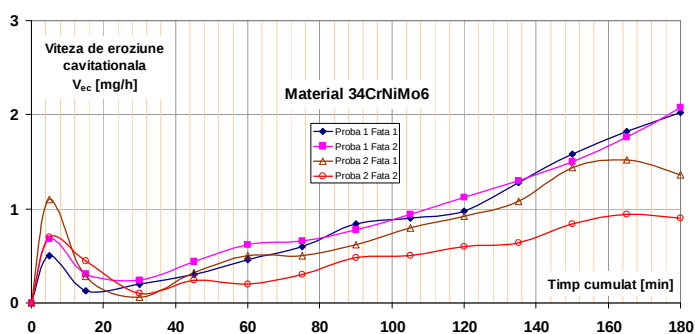


Fig. 5.28 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6

Media valorilor
pentru oțelul
34CrNiMo6

Tabel
5.35

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.1	0.7
15	0.1	0.3
30	0.2	0.1
45	0.2	0.3
60	0.3	0.4
75	0.4	0.5
90	0.6	0.7
105	0.8	0.8
120	1.0	0.9
135	1.2	1.1
150	1.5	1.3
165	1.9	1.5
180	2.3	1.6

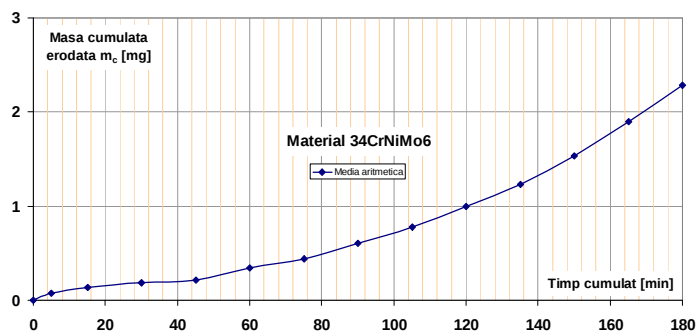


Fig. 5.29 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (media aritmetică)

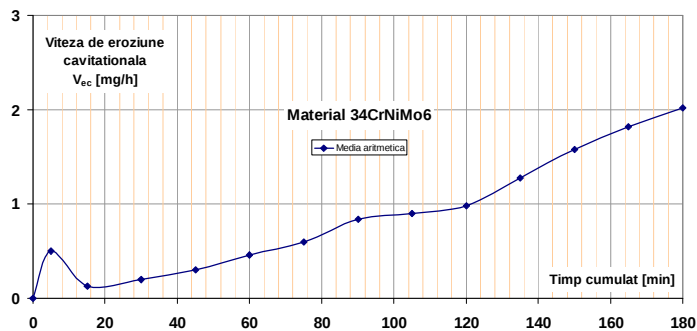
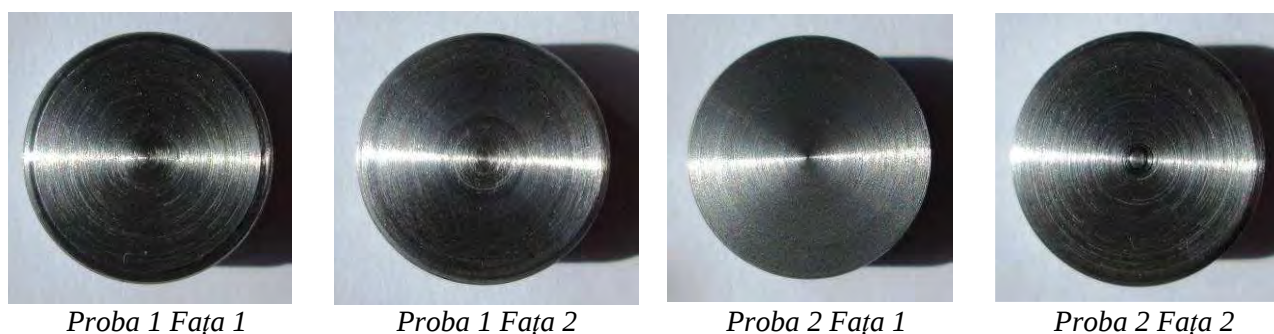


Fig. 5.30 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (media aritmetică)

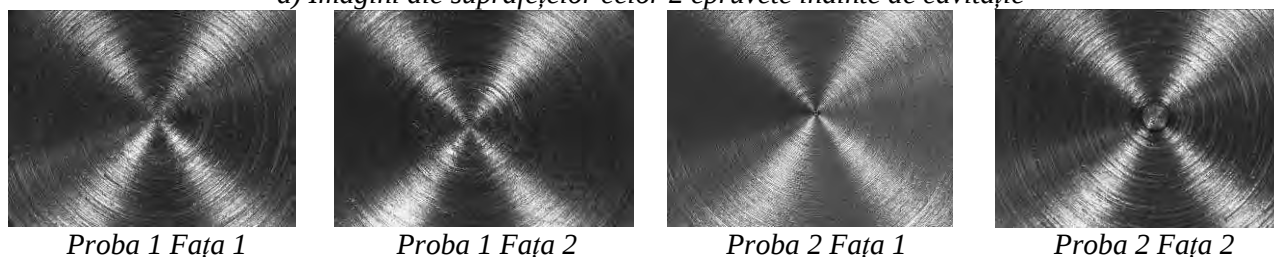
Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Rezultă faptul că cele 4 suprafețe au pierdut fiecare câte 2.58, 2.74, 2.32 și 1.51 mg, ceea ce înseamnă că acest oțel aliat de îmbunătățire prezintă o bună rezistență la eroziune cavitațională. Curbele primelor 3 suprafețe reprezentate în graficul din [figura 5.27](#) se suprapun, curba ultimei suprafețe fiind puțin mai depărtată. Din graficul vitezei se observă că toate aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare.

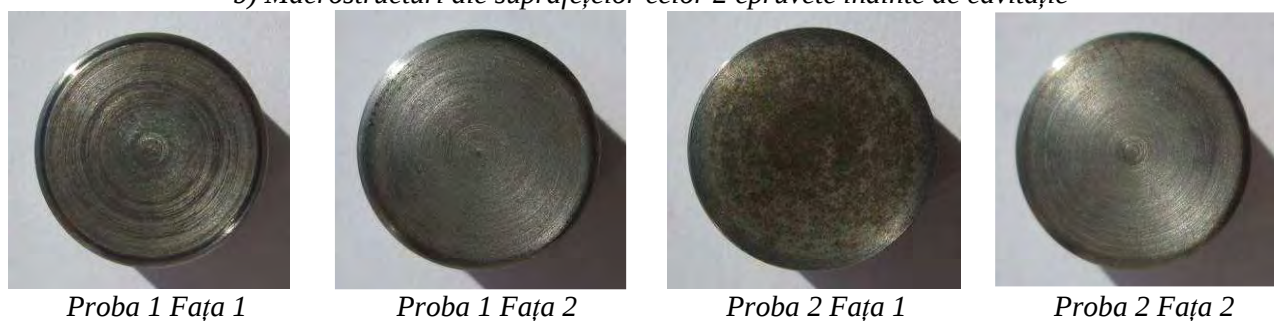
În [figura 5.31](#) se prezintă macrofotografii pentru epruvetele din acest material înainte și după cavitație.



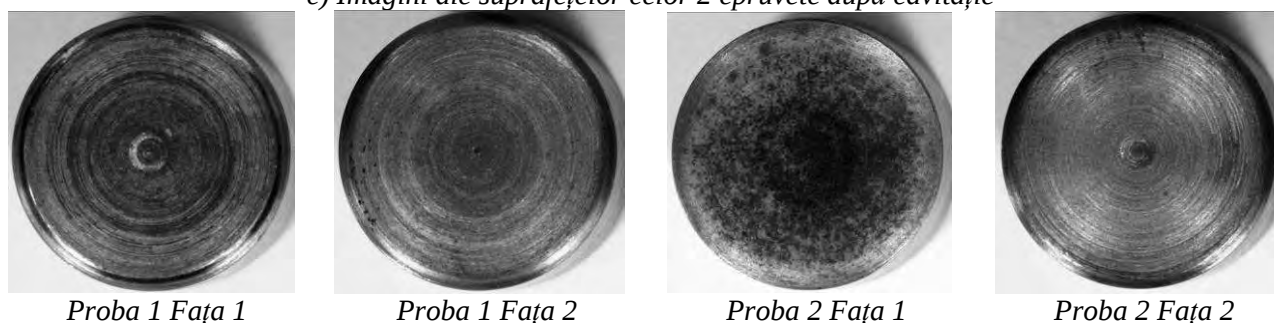
a) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație



b) Macrostructuri ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație



c) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete după cavitație



d) Macrostructuri ale suprafețelor celor 2 epruvete după cavitație

Fig. 5.31 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul 34CrNiMo6 înainte și după cavitație

5.2.6 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X20Cr13

O șarjă diferită a oțelului inoxidabil X20Cr13 a fost studiată și de către autorii din referința [66], însă cu o instalație cu disc rotitor, unde pierderea volumică totală de material a fost de 54,8 mm³, iar ponderea elementelor în compoziția chimică a fost următoarea:

- 0,20 % C;
- 0,5 % Si;
- 0,5 % Mn;
- 13 % Cr;
- 2,5 % Ni;
- 85,3 % Fe.

Pentru oțelul X20Cr13, studiat prin metoda indirectă pe aparat vibrator din dotarea UEMR, în **tabelele 5.36÷5.41** se prezintă compoziția chimică, proprietățile mecanice și rezultatele încercărilor de eroziune cavitațională pe 2 epruvete Φ16x10.

Compoziția chimică pentru X20Cr13 [%]

Tabel 5.36

C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
0,21	0,32	0,42	0,02	0,025	0,03	12,7	0,06	0,28	0,06	85,87

Proprietățile mecanice pentru X20Cr13

Tabel 5.37

Rm	Rp 0.2	A5	Z
[N/mm ²]	[N/mm ²]	%	%
853	662	17	62,8

Timp cumulat	Perioada	<i>Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.38</i>		<i>Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.39</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	16040.91	0	0	0.0000	0.000	16031.59	0	0	0.0000	0.000
5	5	16040.86	0.05	0.05	0.0080	0.480	16031.55	0.04	0.04	0.0060	0.360
15	10	16040.82	0.04	0.09	0.0040	0.240	16031.53	0.02	0.06	0.0031	0.184
30	15	16040.76	0.06	0.15	0.0073	0.440	16031.46	0.07	0.13	0.0053	0.320
45	15	16040.6	0.16	0.31	0.0173	1.040	16031.37	0.09	0.22	0.0127	0.760
60	15	16040.24	0.36	0.67	0.0283	1.700	16031.08	0.29	0.51	0.0243	1.460
75	15	16039.75	0.49	1.16	0.0437	2.620	16030.64	0.44	0.95	0.0373	2.240
90	15	16038.93	0.82	1.98	0.0517	3.100	16029.96	0.68	1.63	0.0497	2.980
105	15	16038.2	0.73	2.71	0.0587	3.520	16029.15	0.81	2.44	0.0623	3.740
120	15	16037.17	1.03	3.74	0.0750	4.500	16028.09	1.06	3.5	0.0743	4.460
135	15	16035.95	1.22	4.96	0.0820	4.920	16026.92	1.17	4.67	0.0857	5.140
150	15	16034.71	1.24	6.2	0.0903	5.420	16025.52	1.4	6.07	0.0983	5.900
165	15	16033.24	1.47	7.67	0.1040	6.240	16023.97	1.55	7.62	0.1060	6.360
180	15	16031.59	1.65	9.32	0.1160	6.960	16022.34	1.63	9.25	0.1113	6.680

Timp cumulat	Peri-oda	Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 2 Fața 1			Tabel 5.40		Valorile obținute pe oțel X20Cr13 - Proba 2 Fața 2			Tabel 5.41	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat				per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15932.29	0	0	0.0000	0.000	15922.04	0	0	0.0000	0.000
5	5	15932.11	0.18	0.18	0.0353	2.120	15921.91	0.13	0.13	0.0210	1.260
15	10	15931.77	0.34	0.52	0.0233	1.400	15921.8	0.11	0.24	0.0069	0.412
30	15	15931.66	0.11	0.63	0.0073	0.440	15921.79	0.01	0.25	0.0053	0.320
45	15	15931.55	0.11	0.74	0.0153	0.920	15921.64	0.15	0.4	0.0150	0.900
60	15	15931.2	0.35	1.09	0.0323	1.940	15921.34	0.3	0.7	0.0280	1.680
75	15	15930.58	0.62	1.71	0.0453	2.720	15920.8	0.54	1.24	0.0397	2.380
90	15	15929.84	0.74	2.45	0.0560	3.360	15920.15	0.65	1.89	0.0490	2.940
105	15	15928.9	0.94	3.39	0.0713	4.280	15919.33	0.82	2.71	0.0597	3.580
120	15	15927.7	1.2	4.59	0.0807	4.840	15918.36	0.97	3.68	0.0677	4.060
135	15	15926.48	1.22	5.81	0.0883	5.300	15917.3	1.06	4.74	0.0757	4.540
150	15	15925.05	1.43	7.24	0.0977	5.860	15916.09	1.21	5.95	0.0837	5.020
165	15	15923.55	1.5	8.74	0.1003	6.020	15914.79	1.3	7.25	0.0910	5.460
180	15	15922.04	1.51	10.25	0.1010	6.060	15913.36	1.43	8.68	0.0997	5.980

În figurile 5.32÷5.35 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în tabelul 5.42 media valorilor.

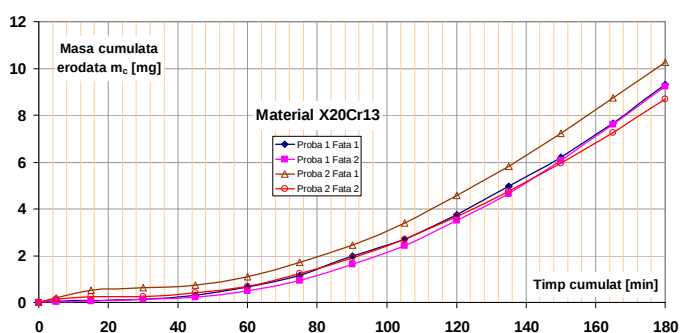


Fig. 5.32 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13

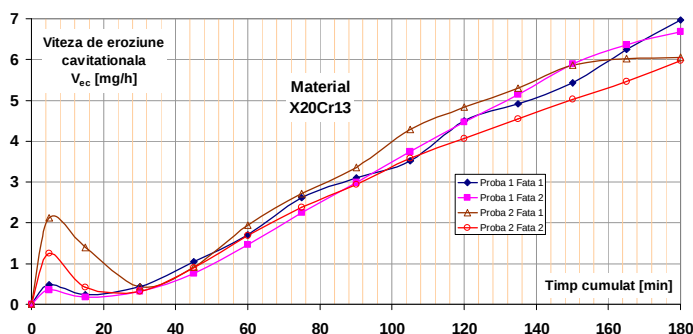


Fig. 5.33 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13

Media valorilor
pentru oțelul
X20Cr13

Tabel
5.42

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.1	1.1
15	0.2	0.6
30	0.3	0.4
45	0.4	0.9
60	0.7	1.7
75	1.3	2.5
90	2.0	3.1
105	2.8	3.8
120	3.9	4.5
135	5.0	5.0
150	6.4	5.6
165	7.8	6.0
180	9.4	6.4

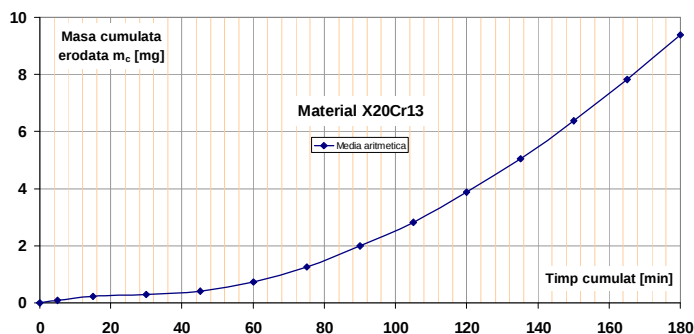


Fig. 5.34 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (media aritmetică)

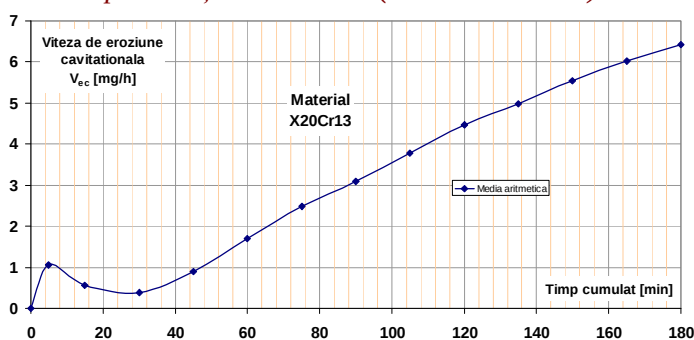


Fig. 5.35 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (media aritmetică)

Rezultă faptul că suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 1 și suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 2, au pierdut fiecare câte 9.32 și 9.25 mg, respectiv 10.25 și 8.68 mg. Curbele obținute pe graficul din figura 5.32 indică faptul că acestea au o alură similară, iar curbele suprafețelor 1 și 2 ale epruvetei 1 precum și curba 2 a epruvetei 2 se suprapun, curba corespunzătoare suprafeței 1 a epruvetei 2 fiind ușor mai depărtată.

Din graficul vitezei se observă că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare. În figura 5.36 se prezintă imagini înainte și după cavitație, imagini care scot în evidență distrugerea provocată după numai 3 ore de atac cavitațional.



Proba 1 Fața 1



Proba 1 Fața 2



Proba 2 Fața 1



Proba 2 Fața 2

a) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

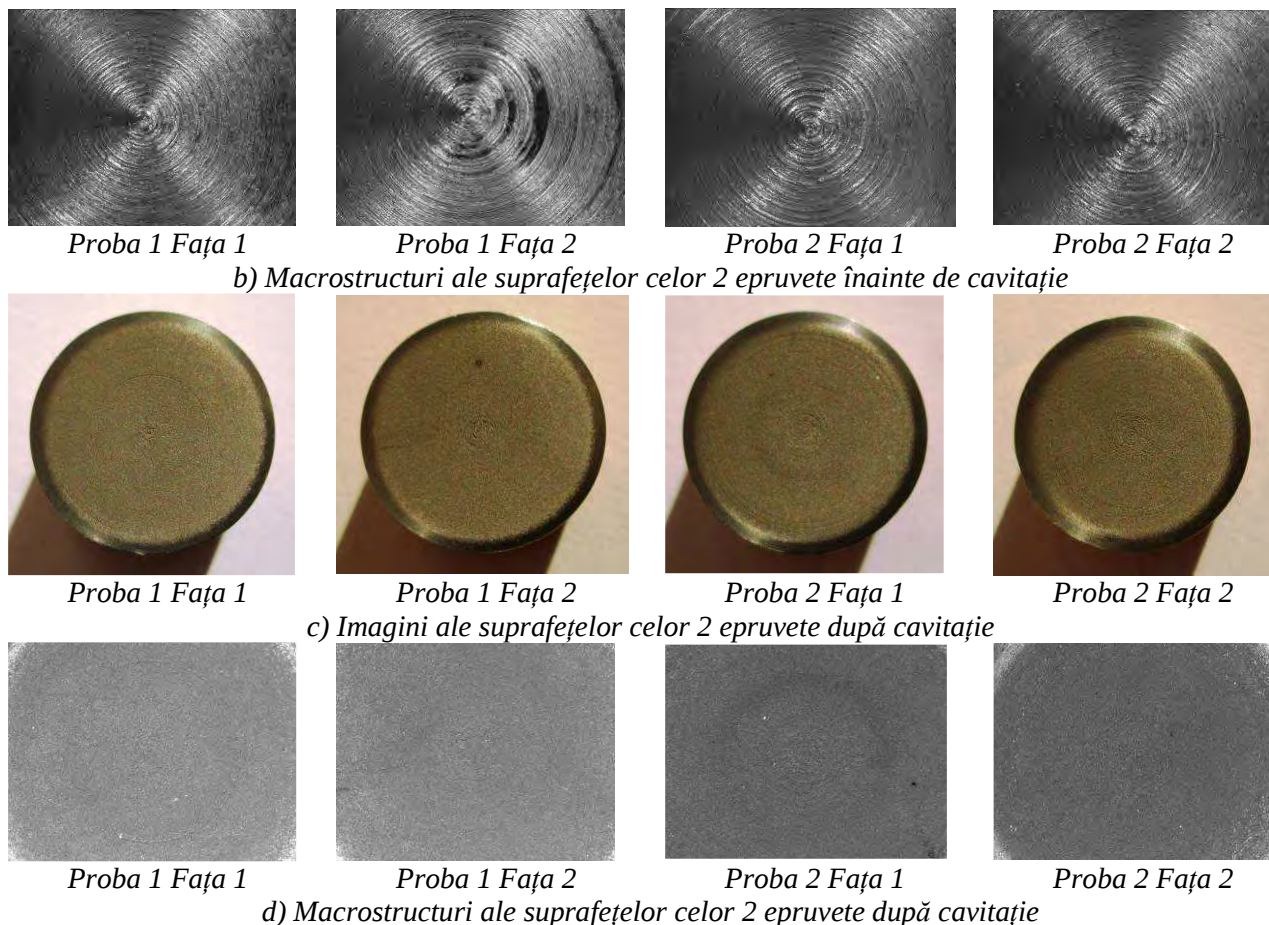


Fig. 5.36 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din oțelul X20Cr13 înainte și după cavitație

5.2.7 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 1

În acest subcapitol se vor analiza 4 șarje diferite în ce privește compoziția chimică a aceluiași oțel inoxidabil X3CrNi13-4, care are structură martensitică cu mici urme de ferită.

Din literatura de specialitate [19], [21], [32], [118] reiese faptul că oțelurile inoxidabile sunt cel mai des folosite în fabricarea rotoarelor și paletelor de turbine hidraulice, datorită unei foarte bune rezistențe la distrugerile prin cavitație.

Aceste 4 șarje au fost prelevate din zone diferite de pe paletele unui turbine hidraulice dintr-o hidrocentrală din România. În figurile 5.37÷5.40 se prezintă imaginile acestor probe prelevate de pe palete, iar în tabelul 5.43 compoziția chimică a celor 4 șarje notate după cum urmează:

- X3CrNi13-4 (1) – șarjă 1;
- X3CrNi13-4 (2) – șarjă 2;
- X3CrNi13-4 (3) – șarjă 3;
- X3CrNi13-4 (4) – șarjă 4.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

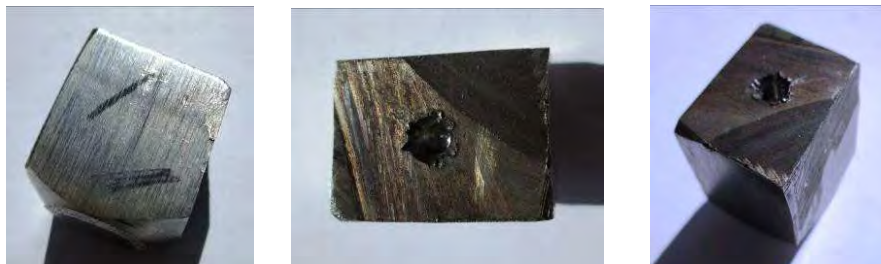


Fig. 5.37 Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (1)



Fig. 5.38 Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (2)



Fig. 5.39 Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (3)



Fig. 5.40 Imagini înainte de prelucrare pentru materialul X3CrNi13-4 (4)

Nr. sarjă	<i>Compoziția chimică pentru oțelurile X3CrNi13-4 [%]</i>							<i>Tabel 5.43</i>		
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
X3CrNi13-4 (1)	0,06	0,34	0,40	0,02	0,010	0,14	3,8	12,7	0,35	82,18
X3CrNi13-4 (2)	0,07	0,41	0,56	0,027	0,014	0,16	5,17	11,15	0,35	82,08
X3CrNi13-4 (3)	0,055	0,62	0,65	0,021	0,012	0,25	3,62	12,95	0,36	81,46
X3CrNi13-4 (4)	0,06	0,43	0,42	0,015	0,009	0,07	3,81	12,5	0,32	82,36

Pentru materialul X3CrNi13-4 (1) în *tabelele 5.44÷5.47* se prezintă valorile rezultatelor obținute în urma testelor pe aparatul vibrator, pe o epruvetă sub formă de cub cu latura de 16 mm. De specificat este faptul că această primă șarjă a pierdut cel mai mult în ceea ce privește masa erodată cumulată la sfârșitul celor 3 ore de testare, față de următoarele 3 șarje prezentate în paragrafele următoare.

*Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate
la fabricația componentelor de turbine hidraulice*

Timp cumu- lat	Peri- oada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 1			Tabel 5.44		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 2			Tabel 5.45	
		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	31277.29	0	0	0.0000	0.000	31289.98	0	0	0.0000	0.000
5	5	31277.19	0.1	0.1	0.0140	0.840	31289.86	0.12	0.12	0.0187	1.120
15	10	31277.17	0.02	0.12	0.0015	0.088	31289.78	0.08	0.2	0.0067	0.400
30	15	31277.16	0.01	0.13	0.0087	0.520	31289.71	0.07	0.27	0.0037	0.220
45	15	31276.91	0.25	0.38	0.0227	1.360	31289.67	0.04	0.31	0.0073	0.440
60	15	31276.48	0.43	0.81	0.0487	2.920	31289.49	0.18	0.49	0.0077	0.460
75	15	31275.45	1.03	1.84	0.0707	4.240	31289.44	0.05	0.54	0.0130	0.780
90	15	31274.36	1.09	2.93	0.0777	4.660	31289.1	0.34	0.88	0.0317	1.900
105	15	31273.12	1.24	4.17	0.0953	5.720	31288.49	0.61	1.49	0.0477	2.860
120	15	31271.5	1.62	5.79	0.0950	5.700	31287.67	0.82	2.31	0.0617	3.700
135	15	31270.27	1.23	7.02	0.0957	5.740	31286.64	1.03	3.34	0.0677	4.060
150	15	31268.63	1.64	8.66	0.0967	5.800	31285.64	1	4.34	0.0770	4.620
165	15	31267.37	1.26	9.92	0.0933	5.600	31284.33	1.31	5.65	0.0843	5.060
180	15	31265.83	1.54	11.46	0.1120	6.720	31283.11	1.22	6.87	0.0783	4.700

Timp cumu- lat	Peri- oada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 3			Tabel 5.46		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (1) - Suprafața 4			Tabel 5.47	
		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	31283.11	0	0	0.0000	0.000	31266.09	0	0	0.0000	0.000
5	5	31282.98	0.13	0.13	0.0193	1.160	31265.78	0.31	0.31	0.0467	2.800
15	10	31282.92	0.06	0.19	0.0044	0.264	31265.62	0.16	0.47	0.0109	0.656
30	15	31282.89	0.03	0.22	0.0017	0.100	31265.57	0.05	0.52	0.0040	0.240
45	15	31282.87	0.02	0.24	0.0020	0.120	31265.5	0.07	0.59	0.0193	1.160
60	15	31282.83	0.04	0.28	0.0060	0.360	31264.99	0.51	1.1	0.0443	2.660
75	15	31282.69	0.14	0.42	0.0153	0.920	31264.17	0.82	1.92	0.0703	4.220
90	15	31282.37	0.32	0.74	0.0247	1.480	31262.88	1.29	3.21	0.0907	5.440
105	15	31281.95	0.42	1.16	0.0353	2.120	31261.45	1.43	4.64	0.0947	5.680
120	15	31281.31	0.64	1.8	0.0507	3.040	31260.04	1.41	6.05	0.0933	5.600
135	15	31280.43	0.88	2.68	0.0637	3.820	31258.65	1.39	7.44	0.0873	5.240
150	15	31279.4	1.03	3.71	0.0710	4.260	31257.42	1.23	8.67	0.0783	4.700
165	15	31278.3	1.1	4.81	0.0703	4.220	31256.3	1.12	9.79	0.0800	4.800
180	15	31277.29	1.01	5.82	0.0643	3.860	31255.02	1.28	11.07	0.0907	5.440

În figurile 5.41÷5.44 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în tabelul 5.48 se prezintă media valorilor celor 4 tabele prezentate anterior.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

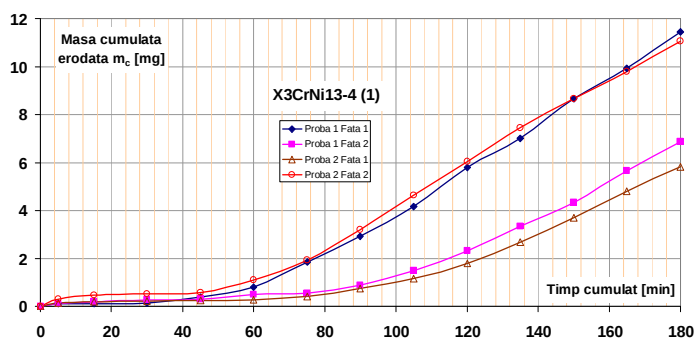


Fig. 5.41 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1)

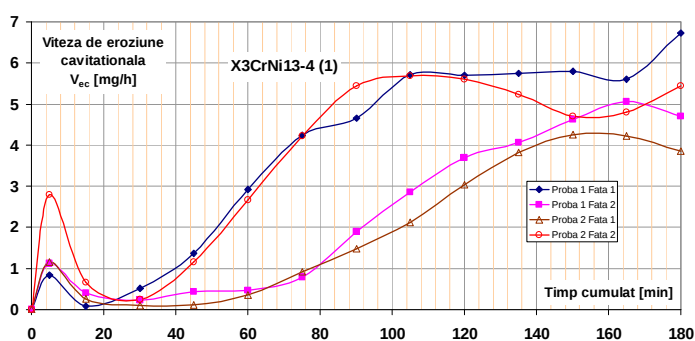


Fig. 5.42 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1)

Media valorilor
pentru oțelul
X3CrNi13-4 (1)

Tabel
5.48

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.2	1.5
15	0.2	0.4
30	0.3	0.3
45	0.4	0.8
60	0.7	1.6
75	1.2	2.5
90	1.9	3.4
105	2.9	4.1
120	4.0	4.5
135	5.1	4.7
150	6.3	4.8
165	7.5	4.9
180	8.8	5.2

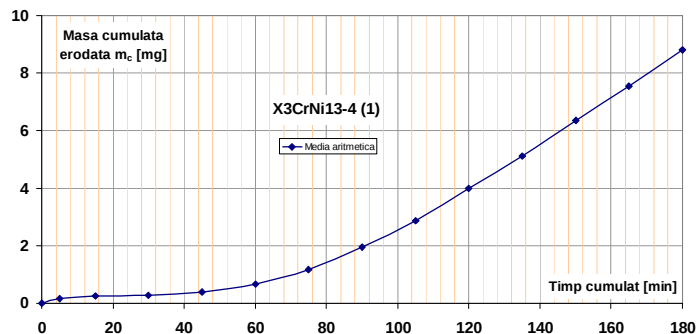


Fig. 5.43 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1) (media aritmetică)

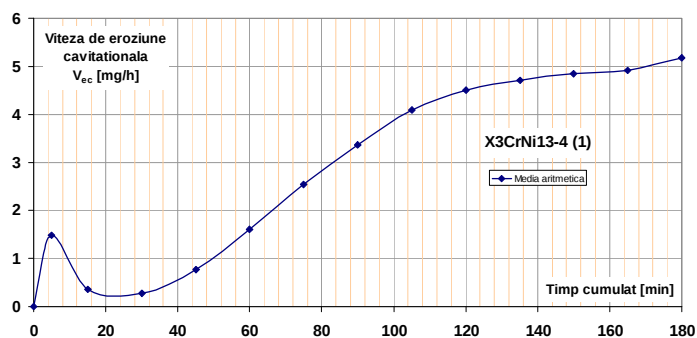


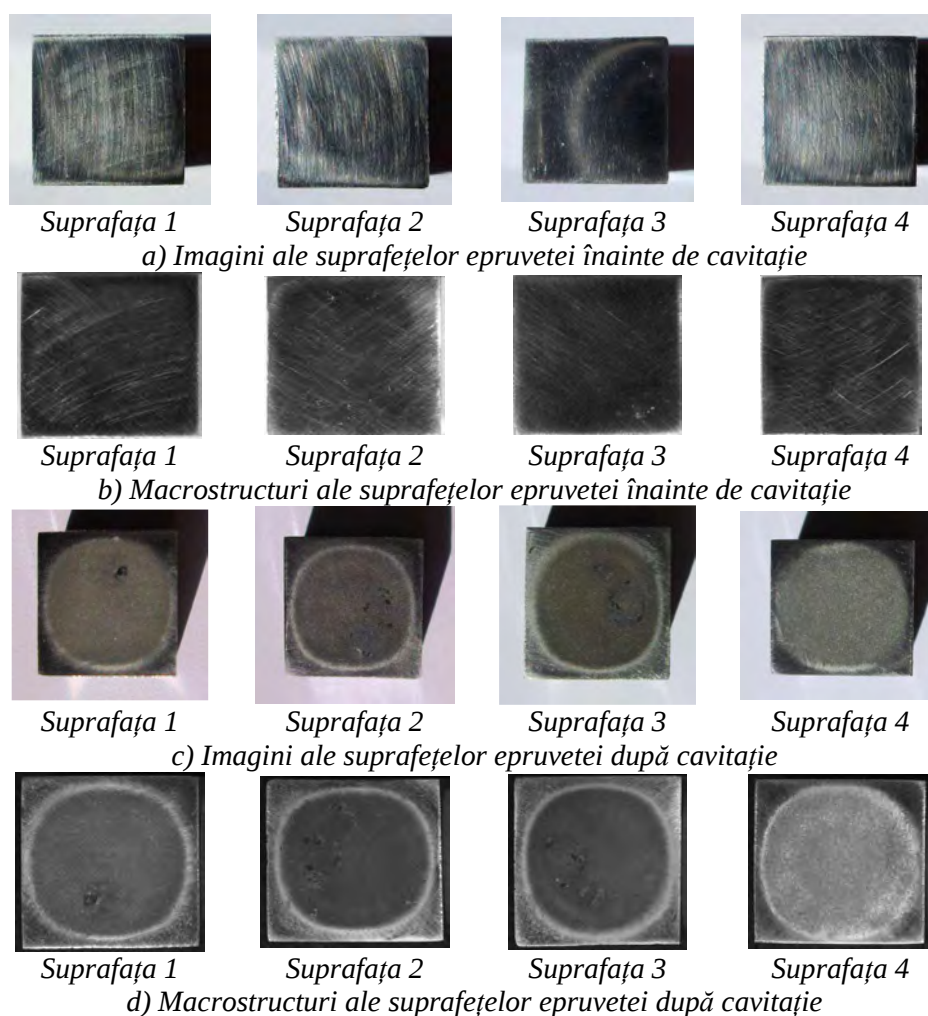
Fig. 5.44 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (1) (media aritmetică)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Pentru această epruvetă sub formă de cub cu latura de 16 mm, cele 4 suprafețe distincte notate cu 1, 2, 3 și 4 au pierdut fiecare câte 11.46, 6.87, 5.82 respectiv 11.07 mg. Curbele suprafețelor 1 cu 4 respectiv 2 cu 3 sunt apropiate, **figura 5.41**.

Aceste curbe se reproduc ca alură, dar valorile pierderilor masice diferă. Din graficul vitezei se observă faptul că cele 4 curbe au parcurs stadiul de incipiență și cel de accelerare.

În **figura 5.45** se prezintă imaginile acestei epruvete realizate cu aparatul de fotografiat și cu stereomicroscopul din dotarea UEMR.



**Fig. 5.45 Imagini și macrostructuri ale epruvetei din materialul
X3CrNi13-4 (1) înainte și după cavitație**

Din fotografiile obținute după cavitație, în special cele redată la stereomicroscop, se observă foarte clar suprafețele erodate prin eroziune cavitațională prin formarea unui cerc pe fiecare suprafață pătratică a epruvetei. Primele 3 suprafețe însă prezintă unele zgârieturi datorită suportului de prindere cu 4 șuruburi.

5.2.8 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 2

Din acest material s-au prelucrat 2 epruvete sub formă de cilindru $\Phi 16 \times 10$. În **tabelele 5.49÷5.52** se prezintă valorile rezultatelor obținute în urma testelor de cavitație.

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) – Proba 1 Fața 1			Tabel 5.49		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) – Proba 1 Fața 2			Tabel 5.50	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15142.99	0	0	0.0000	0.000	15140.73	0	0	0.0000	0.000
5	5	15142.98	0.01	0.01	0.0020	0.120	15140.72	0.01	0.01	0.0020	0.120
15	10	15142.96	0.02	0.03	0.0012	0.072	15140.7	0.02	0.03	0.0023	0.136
30	15	15142.96	0	0.03	0.0007	0.040	15140.66	0.04	0.07	0.0017	0.100
45	15	15142.94	0.02	0.05	0.0030	0.180	15140.65	0.01	0.08	0.0010	0.060
60	15	15142.87	0.07	0.12	0.0047	0.280	15140.63	0.02	0.1	0.0033	0.200
75	15	15142.8	0.07	0.19	0.0090	0.540	15140.55	0.08	0.18	0.0060	0.360
90	15	15142.6	0.2	0.39	0.0123	0.740	15140.45	0.1	0.28	0.0063	0.380
105	15	15142.43	0.17	0.56	0.0153	0.920	15140.36	0.09	0.37	0.0090	0.540
120	15	15142.14	0.29	0.85	0.0180	1.080	15140.18	0.18	0.55	0.0130	0.780
135	15	15141.89	0.25	1.1	0.0217	1.300	15139.97	0.21	0.76	0.0163	0.980
150	15	15141.49	0.4	1.5	0.0273	1.640	15139.69	0.28	1.04	0.0207	1.240
165	15	15141.07	0.42	1.92	0.0360	2.160	15139.35	0.34	1.38	0.0243	1.460
180	15	15140.41	0.66	2.58	0.0520	3.120	15138.96	0.39	1.77	0.0277	1.660

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) – Proba 2 Fața 1			Tabel 5.51		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (2) – Proba 2 Fața 2			Tabel 5.52	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14928.78	0	0	0.0000	0.000	14926.52	0	0	0.0000	0.000
5	5	14928.75	0.03	0.03	0.0047	0.280	14926.51	0.01	0.01	0.0017	0.100
15	10	14928.73	0.02	0.05	0.0015	0.088	14926.5	0.01	0.02	0.0009	0.052
30	15	14928.72	0.01	0.06	0.0003	0.020	14926.49	0.01	0.03	0.0007	0.040
45	15	14928.72	0	0.06	0.0023	0.140	14926.48	0.01	0.04	0.0003	0.020
60	15	14928.65	0.07	0.13	0.0033	0.200	14926.48	0	0.04	0.0043	0.260
75	15	14928.62	0.03	0.16	0.0063	0.380	14926.35	0.13	0.17	0.0083	0.500
90	15	14928.46	0.16	0.32	0.0113	0.680	14926.23	0.12	0.29	0.0103	0.620
105	15	14928.28	0.18	0.5	0.0137	0.820	14926.04	0.19	0.48	0.0113	0.680
120	15	14928.05	0.23	0.73	0.0163	0.980	14925.89	0.15	0.63	0.0140	0.840
135	15	14927.79	0.26	0.99	0.0220	1.320	14925.62	0.27	0.9	0.0223	1.340
150	15	14927.39	0.4	1.39	0.0270	1.620	14925.22	0.4	1.3	0.0263	1.580
165	15	14926.98	0.41	1.8	0.0313	1.880	14924.83	0.39	1.69	0.0300	1.800
180	15	14926.45	0.53	2.33	0.0393	2.360	14924.32	0.51	2.2	0.0380	2.280

În figurile 5.46÷5.49 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională, iar în tabelul 5.53 se prezintă media aritmetică a valorilor celor 4 încercări.

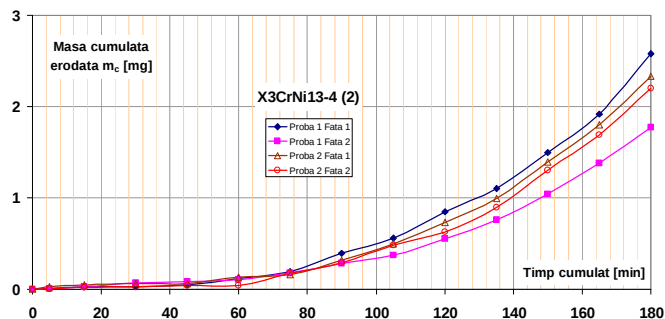


Fig. 5.46 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2)

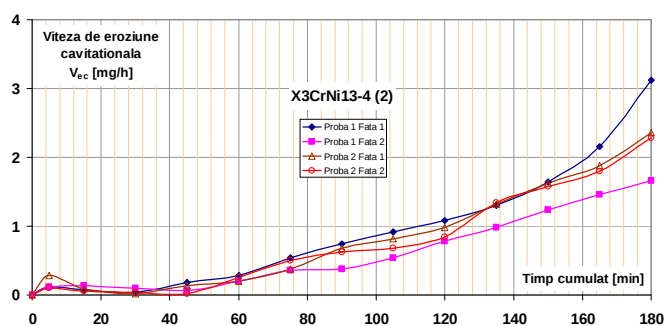


Fig. 5.47 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2)

Media valorilor
pentru oțelul
X3CrNi13-4 (2)

Tabel
5.53

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0.0	0.0
5	0.0	0.2
15	0.0	0.1
30	0.0	0.1
45	0.1	0.1
60	0.1	0.2
75	0.2	0.4
90	0.3	0.6
105	0.5	0.7
120	0.7	0.9
135	0.9	1.2
150	1.3	1.5
165	1.7	1.8
180	2.2	2.4

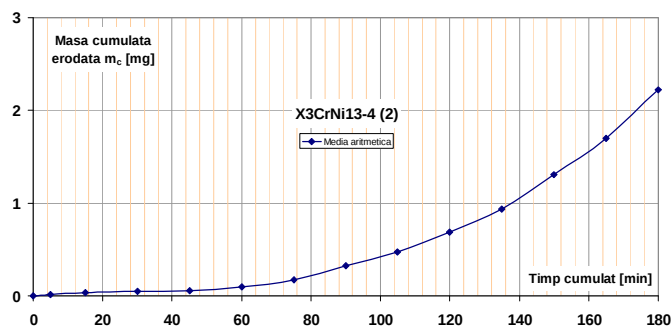


Fig. 5.48 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2) (media aritmetică)

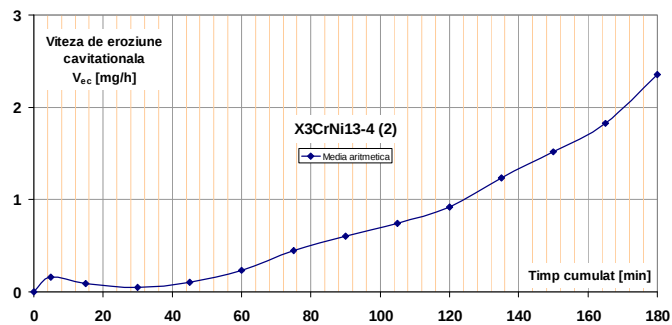


Fig. 5.49 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (2) (media aritmetică)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Suprafețele celor 2 epruvete sub formă de cilindru au pierdut fiecare câte 2.58 și 1.77 mg pentru fața 1 și 2 a epruvetei 1, respectiv câte 2.33 și 2.2 mg pentru fața 1 și 2 a epruvetei 2. Din **figura 5.46** rezultă că aceste curbe se reproduc, având aceeași evoluție în timp, iar din **figura 5.47** se observă faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și cel de accelerare.

În **figura 5.50** se prezintă macrofotografii ale celor 2 epruvete obținute, înainte de cavitație și după cavitație.

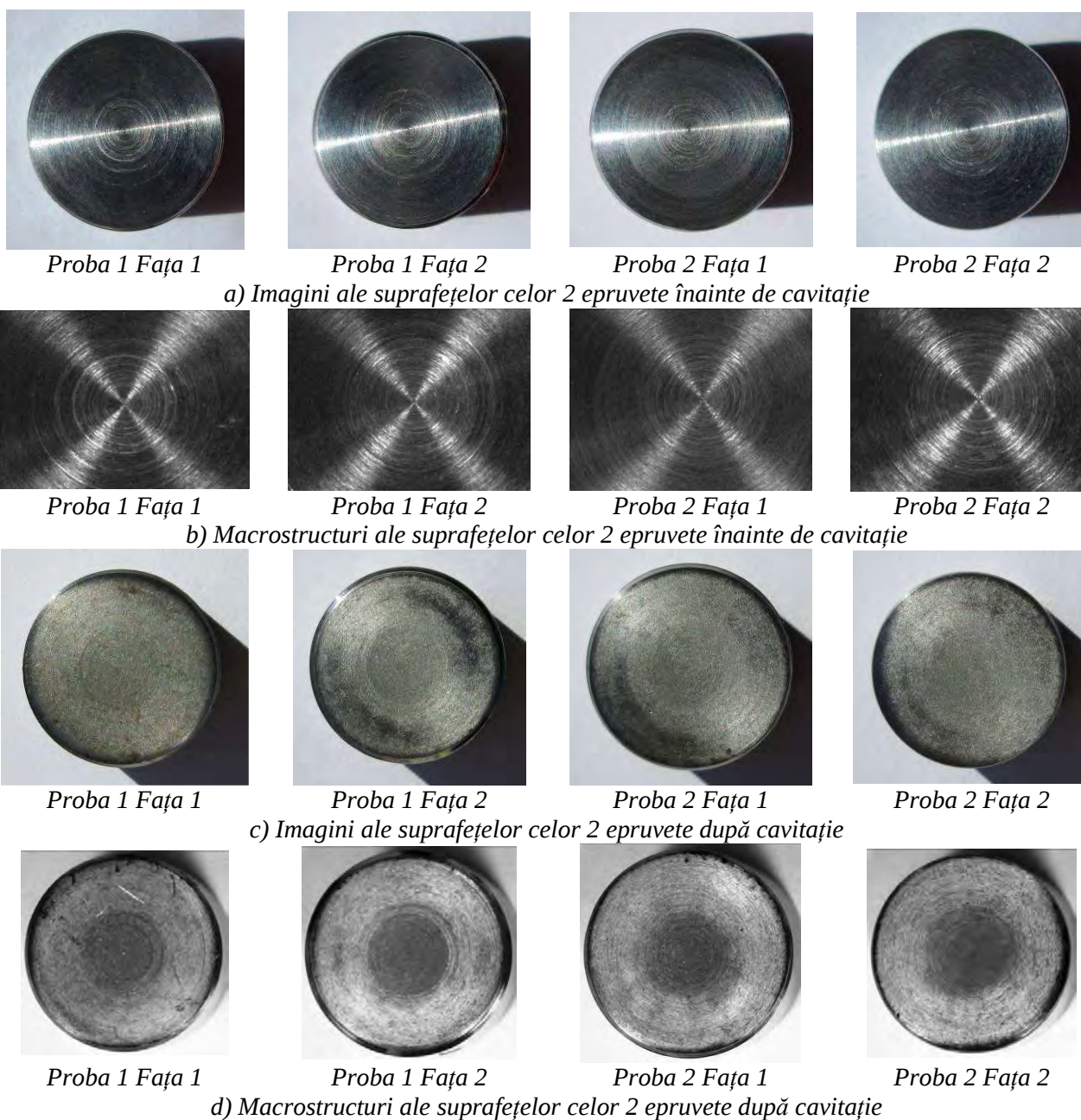


Fig. 5.50 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (2) înainte și după cavitație

Din fotografiile obținute după cavitație, se observă suprafețele erodate prin eroziune cavitațională prin formarea unui cerc în centrul fiecărei suprafațe a celor 2 epruvete.

5.2.9 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 3

Rezultatele obținute în urma cercetărilor de eroziune cavitațională pe acest material din șarja 3 sunt redată în **tabelele 5.54÷5.57**.

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) – Proba 1 Fața 1			Tabel 5.54		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) – Proba 1 Fața 2			Tabel 5.55	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15030.56	0	0	0.0000	0.000	15027.81	0	0	0.0000	0.000
5	5	15030.55	0.01	0.01	0.0017	0.100	15027.8	0.01	0.01	0.0023	0.140
15	10	15030.54	0.01	0.02	0.0006	0.036	15027.77	0.03	0.04	0.0021	0.124
30	15	15030.54	0	0.02	0.0003	0.020	15027.76	0.01	0.05	0.0017	0.100
45	15	15030.53	0.01	0.03	0.0007	0.040	15027.72	0.04	0.09	0.0033	0.200
60	15	15030.52	0.01	0.04	0.0047	0.280	15027.66	0.06	0.15	0.0040	0.240
75	15	15030.39	0.13	0.17	0.0090	0.540	15027.6	0.06	0.21	0.0107	0.640
90	15	15030.25	0.14	0.31	0.0130	0.780	15027.34	0.26	0.47	0.0157	0.940
105	15	15030	0.25	0.56	0.0177	1.060	15027.13	0.21	0.68	0.0163	0.980
120	15	15029.72	0.28	0.84	0.0220	1.320	15026.85	0.28	0.96	0.0210	1.260
135	15	15029.34	0.38	1.22	0.0280	1.680	15026.5	0.35	1.31	0.0260	1.560
150	15	15028.88	0.46	1.68	0.0313	1.880	15026.07	0.43	1.74	0.0323	1.940
165	15	15028.4	0.48	2.16	0.0360	2.160	15025.53	0.54	2.28	0.0347	2.080
180	15	15027.8	0.6	2.76	0.0440	2.640	15025.03	0.5	2.78	0.0320	1.920

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) – Proba 2 Fața 1			Tabel 5.56		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (3) – Proba 2 Fața 2			Tabel 5.57	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15273.14	0	0	0.0000	0.000	15270.56	0	0	0.0000	0.000
5	5	15273.1	0.04	0.04	0.0057	0.340	15270.55	0.01	0.01	0.0017	0.100
15	10	15273.09	0.01	0.05	0.0027	0.164	15270.54	0.01	0.02	0.0006	0.036
30	15	15273.01	0.08	0.13	0.0033	0.200	15270.54	0	0.02	0.0003	0.020
45	15	15272.99	0.02	0.15	0.0033	0.200	15270.53	0.01	0.03	0.0037	0.220
60	15	15272.91	0.08	0.23	0.0040	0.240	15270.43	0.1	0.13	0.0073	0.440
75	15	15272.87	0.04	0.27	0.0077	0.460	15270.31	0.12	0.25	0.0093	0.560
90	15	15272.68	0.19	0.46	0.0130	0.780	15270.15	0.16	0.41	0.0103	0.620
105	15	15272.48	0.2	0.66	0.0173	1.040	15270	0.15	0.56	0.0137	0.820
120	15	15272.16	0.32	0.98	0.0203	1.220	15269.74	0.26	0.82	0.0173	1.040
135	15	15271.87	0.29	1.27	0.0227	1.360	15269.48	0.26	1.08	0.0233	1.400
150	15	15271.48	0.39	1.66	0.0283	1.700	15269.04	0.44	1.52	0.0317	1.900
165	15	15271.02	0.46	2.12	0.0310	1.860	15268.53	0.51	2.03	0.0343	2.060
180	15	15270.55	0.47	2.59	0.0317	1.900	15268.01	0.52	2.55	0.0350	2.100

În figurile 5.51÷5.54 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională, iar în tabelul 5.58 media acestor rezultate.

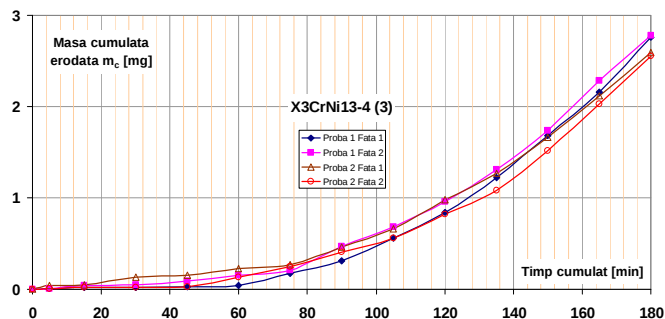


Fig. 5.51 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3)

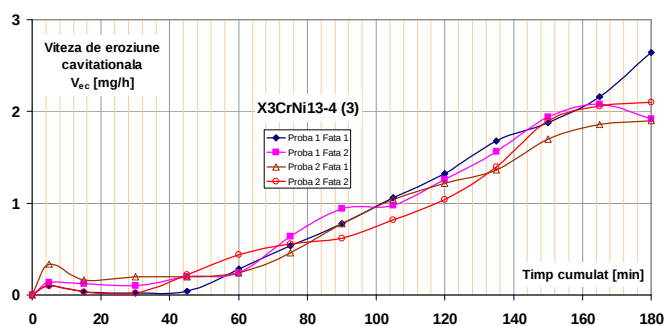


Fig. 5.52 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3)

Media valorilor
pentru oțelul
X3CrNi13-4 (3)

Tabel
5.58

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0.0	0.0
5	0.0	0.2
15	0.0	0.1
30	0.1	0.1
45	0.1	0.2
60	0.1	0.3
75	0.2	0.6
90	0.4	0.8
105	0.6	1.0
120	0.9	1.2
135	1.2	1.5
150	1.6	1.9
165	2.1	2.0
180	2.7	2.1

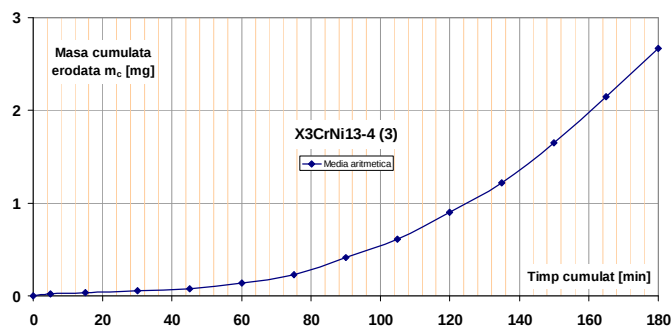


Fig. 5.53 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3) (media aritmetică)

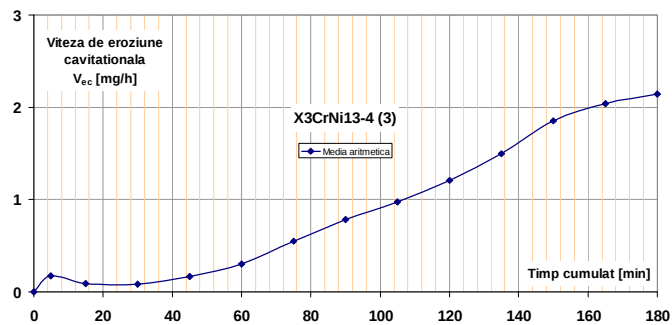


Fig. 5.54 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (3) (media aritmetică)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

Rezultă faptul că suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 1 și suprafețele 1 și 2 ale epruvetei 2 au pierdut fiecare câte 2.76 și 2.78 mg, respectiv câte 2.59 și 2.55 mg. Toate curbele au aceeași alură, diferențele valorice dintre ele fiind foarte mici, **figura 5.51**.

În continuare se prezintă macrofotografii ale epruvetelor înainte și după cavitație, de unde se poate observa că toate suprafețele sunt vizibil erodate prin cavitație.

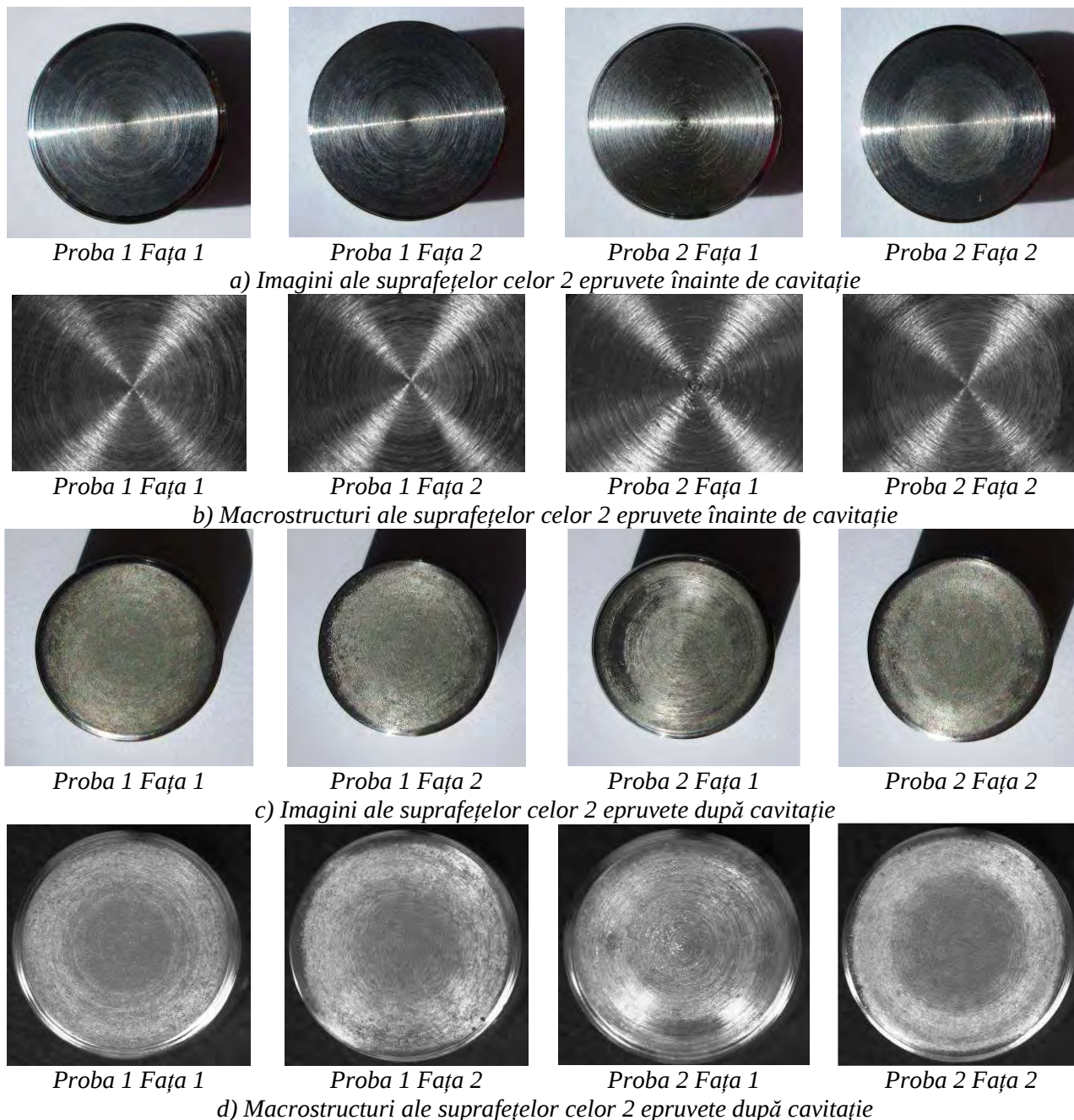


Fig. 5.55 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (3) înainte și după cavitație

5.2.10 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 șarja 4

Rezultatele obținute în urma cercetărilor de eroziune cavitațională pe acest material din șarja numărul 4 sunt redate în **tabelele 5.59÷5.62**.

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 1 Fața 1			Tabel 5.59		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 1 Fața 2			Tabel 5.60	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15637.7	0	0	0.0000	0.000	15632.79	0	0	0.0000	0.000
5	5	15637.56	0.14	0.14	0.0257	1.540	15632.71	0.08	0.08	0.0110	0.660
15	10	15637.35	0.21	0.35	0.0145	0.868	15632.7	0.01	0.09	0.0009	0.052
30	15	15637.28	0.07	0.42	0.0057	0.340	15632.69	0.01	0.1	0.0037	0.220
45	15	15637.18	0.1	0.52	0.0093	0.560	15632.59	0.1	0.2	0.0077	0.460
60	15	15637	0.18	0.7	0.0117	0.700	15632.46	0.13	0.33	0.0107	0.640
75	15	15636.83	0.17	0.87	0.0157	0.940	15632.27	0.19	0.52	0.0140	0.840
90	15	15636.53	0.3	1.17	0.0240	1.440	15632.04	0.23	0.75	0.0183	1.100
105	15	15636.11	0.42	1.59	0.0303	1.820	15631.72	0.32	1.07	0.0230	1.380
120	15	15635.62	0.49	2.08	0.0377	2.260	15631.35	0.37	1.44	0.0227	1.360
135	15	15634.98	0.64	2.72	0.0417	2.500	15631.04	0.31	1.75	0.0293	1.760
150	15	15634.37	0.61	3.33	0.0443	2.660	15630.47	0.57	2.32	0.0370	2.220
165	15	15633.65	0.72	4.05	0.0527	3.160	15629.93	0.54	2.86	0.0383	2.300
180	15	15632.79	0.86	4.91	0.0620	3.720	15629.32	0.61	3.47	0.0430	2.580

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 2 Fața 1			Tabel 5.61		Valorile obținute pe oțel X3CrNi13-4 (4) – Proba 2 Fața 2			Tabel 5.62	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14896.55	0	0	0.0000	0.000	14903.21	0	0	0.0000	0.000
5	5	14896.43	0.12	0.12	0.0167	1.000	14903.12	0.09	0.09	0.0143	0.860
15	10	14896.41	0.02	0.14	0.0031	0.184	14903.05	0.07	0.16	0.0066	0.396
30	15	14896.34	0.07	0.21	0.0043	0.260	14902.96	0.09	0.25	0.0123	0.740
45	15	14896.28	0.06	0.27	0.0077	0.460	14902.68	0.28	0.53	0.0240	1.440
60	15	14896.11	0.17	0.44	0.0117	0.700	14902.24	0.44	0.97	0.0310	1.860
75	15	14895.93	0.18	0.62	0.0140	0.840	14901.75	0.49	1.46	0.0340	2.040
90	15	14895.69	0.24	0.86	0.0163	0.980	14901.22	0.53	1.99	0.0357	2.140
105	15	14895.44	0.25	1.11	0.0173	1.040	14900.68	0.54	2.53	0.0383	2.300
120	15	14895.17	0.27	1.38	0.0187	1.120	14900.07	0.61	3.14	0.0470	2.820
135	15	14894.88	0.29	1.67	0.0217	1.300	14899.27	0.8	3.94	0.0527	3.160
150	15	14894.52	0.36	2.03	0.0247	1.480	14898.49	0.78	4.72	0.0550	3.300
165	15	14894.14	0.38	2.41	0.0243	1.460	14897.62	0.87	5.59	0.0683	4.100
180	15	14893.79	0.35	2.76	0.0223	1.340	14896.44	1.18	6.77	0.0890	5.340

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

În figurile 5.56÷5.59 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, iar în tabelul 5.63 valorile mediei aritmetice.

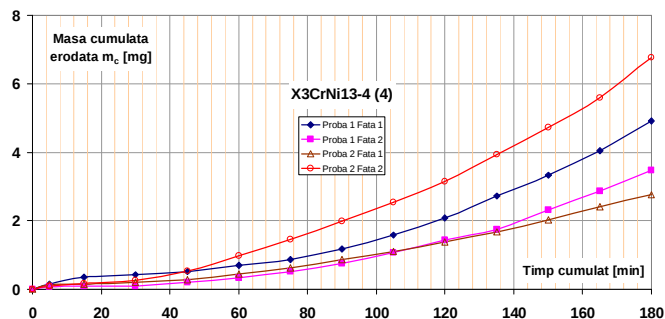


Fig. 5.56 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4)

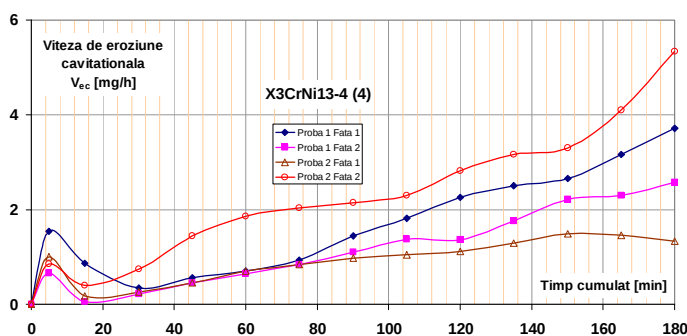


Fig. 5.57 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4)

Media valorilor
pentru oțelul
X3CrNi13-4 (4)

Tabel
5.63

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0.0	0.0
5	0.1	1.0
15	0.2	0.4
30	0.2	0.4
45	0.4	0.7
60	0.6	1.0
75	0.9	1.2
90	1.2	1.4
105	1.6	1.6
120	2.0	1.9
135	2.5	2.2
150	3.1	2.4
165	3.7	2.8
180	4.5	3.2

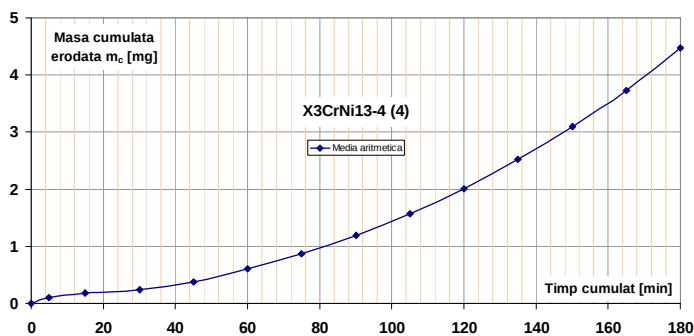


Fig. 5.58 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4) (media aritmetică)

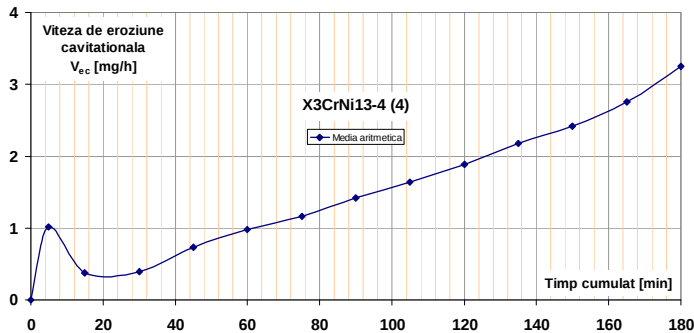


Fig. 5.59 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4 (4) (media aritmetică)

Cele 4 suprafețe ale celor 2 epruvete au pierdut fiecare câte 4.91, 3.47, 2.76 și 6.77 mg. Se observă faptul că aceste curbe se reproduc ca alură, dar diferă valoric. Din graficul vitezei, [figura 5.57](#), rezultă faptul că aceste curbe au parcurs doar stadiul de incipiență și începutul stadiului de accelerare.

În [figura 5.60](#) se prezintă macrofotografii înainte și după cavitație, imagini în care se observă suprafețele erodate prin eroziune cavitațională.

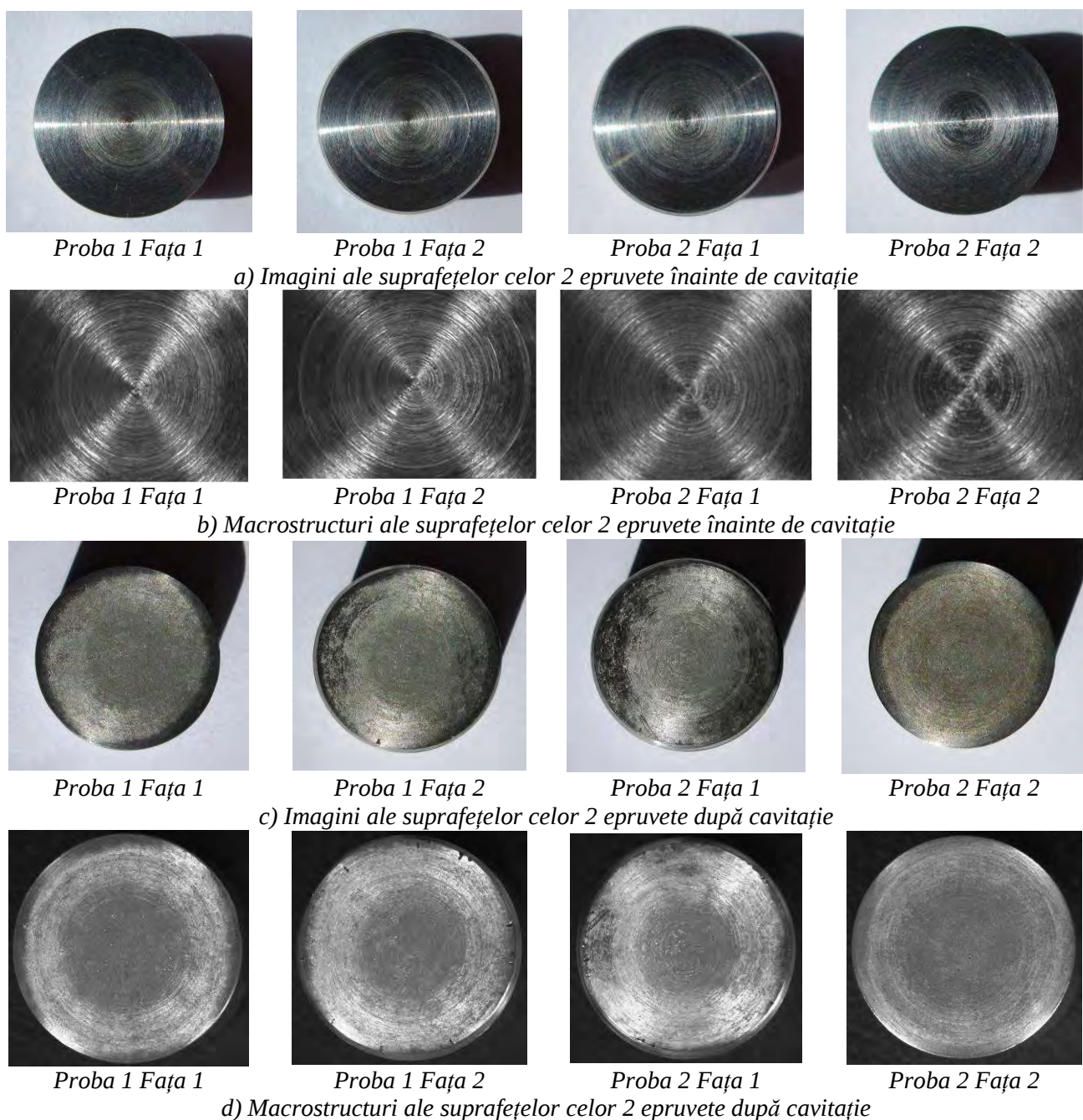


Fig. 5.60 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X3CrNi13-4 (4) înainte și după cavitație

5.2.11 Cercetări de eroziune cavitațională pe oțelul inoxidabil X5CrNi18-10

Acest oțel inoxidabil austenitic este utilizat în domeniile cu mediu coroziv, **tabelul 5.1**, corозиunea fiind un fenomen chimic [35]. Pentru acest material în **tabelele 5.64** și **5.65** se prezintă compoziția chimică respectiv proprietățile mecanice.

Compoziția chimică pentru oțelul X5CrNi18-10 [%]

Tabel 5.64

C	Cr	Mn	Co	N	Ni	P	S	Si	Cu	Fe
0,02	18,231	1,415	0,087	0,086	8,141	0,031	0,022	0,369	0,446	71,15

*Proprietățile mecanice pentru oțelul
X5CrNi18-10*

Tabel 5.65

Rm	Rp 0.2	A	Duritatea
[N/mm ²]	[N/mm ²]	%	
605	294	58,4	nedeterminată

Din **tabelul 5.64** se observă faptul că oțelul X5CrNi18-10 are un conținut mediu de crom și nichel, proporții care îl fac foarte rezistent la corозиune, dar și la eroziunea cavitațională, așa cum va rezulta din cercetările efectuate.

În **tabelele 5.66÷5.69** se prezintă rezultatele încercărilor de eroziune cavitațională pe epruvete din acest material, obținute prin metoda indirectă de cavitație.

Timp cumu- lat	Peri- oada	<i>Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 1 Fața 1</i>			<i>Tabel 5.66</i>		<i>Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 1 Fața 2</i>			<i>Tabel 5.67</i>	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu- lat				per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	16309.43	0	0	0.0000	0.000	16308.69	0	0	0.0000	0.000
5	5	16309.28	0.15	0.15	0.0247	1.480	16308.63	0.06	0.06	0.0083	0.500
15	10	16309.14	0.14	0.29	0.0100	0.600	16308.62	0.01	0.07	0.0011	0.068
30	15	16309.08	0.06	0.35	0.0030	0.180	16308.6	0.02	0.09	0.0007	0.040
45	15	16309.05	0.03	0.38	0.0027	0.160	16308.6	0	0.09	0.0003	0.020
60	15	16309	0.05	0.43	0.0030	0.180	16308.59	0.01	0.1	0.0007	0.040
75	15	16308.96	0.04	0.47	0.0023	0.140	16308.58	0.01	0.11	0.0017	0.100
90	15	16308.93	0.03	0.5	0.0037	0.220	16308.54	0.04	0.15	0.0030	0.180
105	15	16308.85	0.08	0.58	0.0030	0.180	16308.49	0.05	0.2	0.0027	0.160
120	15	16308.84	0.01	0.59	0.0020	0.120	16308.46	0.03	0.23	0.0027	0.160
135	15	16308.79	0.05	0.64	0.0030	0.180	16308.41	0.05	0.28	0.0030	0.180
150	15	16308.75	0.04	0.68	0.0017	0.100	16308.37	0.04	0.32	0.0037	0.220
165	15	16308.74	0.01	0.69	0.0020	0.120	16308.3	0.07	0.39	0.0063	0.380
180	15	16308.69	0.05	0.74	0.0047	0.280	16308.18	0.12	0.51	0.0097	0.580

Timp cumulat	Perioada	Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 2 Fața 1			Tabel 5.68		Valorile obținute pe oțelul X5CrNi18-10 - Proba 2 Fața 2			Tabel 5.69	
		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat				per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	16122.91	0	0	0.0000	0.000	16122.11	0	0	0.0000	0.000
5	5	16122.77	0.14	0.14	0.0203	1.220	16121.99	0.12	0.12	0.0173	1.040
15	10	16122.72	0.05	0.19	0.0035	0.212	16121.95	0.04	0.16	0.0035	0.208
30	15	16122.7	0.02	0.21	0.0023	0.140	16121.91	0.04	0.2	0.0013	0.080
45	15	16122.65	0.05	0.26	0.0040	0.240	16121.91	0	0.2	0.0003	0.020
60	15	16122.58	0.07	0.33	0.0027	0.160	16121.9	0.01	0.21	0.0027	0.160
75	15	16122.57	0.01	0.34	0.0030	0.180	16121.83	0.07	0.28	0.0033	0.200
90	15	16122.49	0.08	0.42	0.0043	0.260	16121.8	0.03	0.31	0.0013	0.080
105	15	16122.44	0.05	0.47	0.0030	0.180	16121.79	0.01	0.32	0.0027	0.160
120	15	16122.4	0.04	0.51	0.0050	0.300	16121.72	0.07	0.39	0.0070	0.420
135	15	16122.29	0.11	0.62	0.0040	0.240	16121.58	0.14	0.53	0.0077	0.460
150	15	16122.28	0.01	0.63	0.0030	0.180	16121.49	0.09	0.62	0.0057	0.340
165	15	16122.2	0.08	0.71	0.0060	0.360	16121.41	0.08	0.7	0.0063	0.380
180	15	16122.1	0.1	0.81	0.0073	0.440	16121.3	0.11	0.81	0.0083	0.500

În figurile 5.61÷5.64 se prezintă graficele curbelor masei cumulate erodată și ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru 4 tipuri de încercări. În tabelul 5.70 sunt redată valorile obținute prin media aritmetică a încercărilor din tabelele 5.66÷5.69, valori în baza cărora s-au trasat graficele din figurile 5.63 și 5.64.

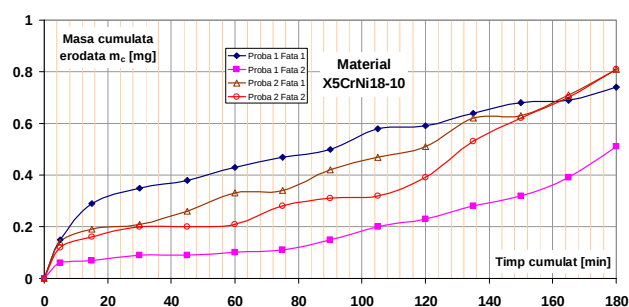


Fig. 5.61 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10

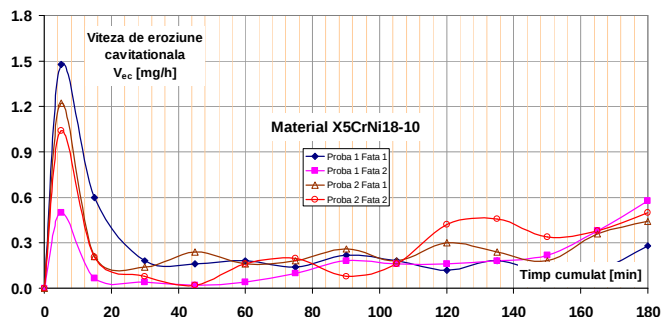


Fig. 5.62 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10

Media valorilor
pentru oțelul
X5CrNi18-10

Tabel
5.70

Timp cumulat	Masa erodată cumulată	Viteza de eroziune cumulată
t	mc	vec
min	mg	mg/h
0	0	0
5	0.1	1.1
15	0.2	0.3
30	0.2	0.1
45	0.2	0.1
60	0.3	0.1
75	0.3	0.2
90	0.3	0.2
105	0.4	0.2
120	0.4	0.2
135	0.5	0.3
150	0.6	0.2
165	0.6	0.3
180	0.7	0.4

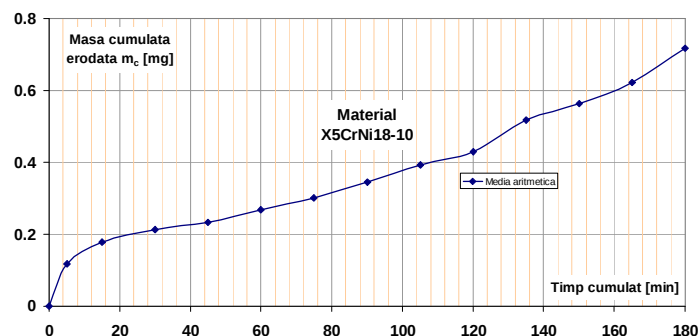


Fig. 5.63 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (media aritmetică)

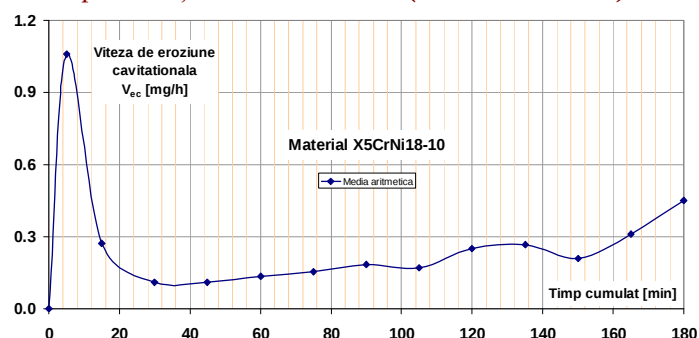
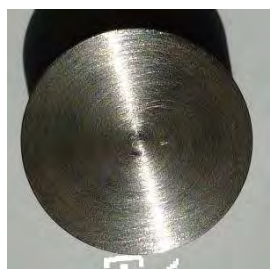


Fig. 5.64 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (media aritmetică)

Cele 4 suprafețele au pierdut câte 0.74, 0.51, 0.81 și 0.81 mg, ceea ce înseamnă foarte puțin comparativ cu oțelurile anterior încercate. Acest material se încadrează în categoria materialelor care sunt foarte rezistente la atacul cavitațional [94], [95]. În continuare se prezintă imagini înainte și după cavitație, imagini din care distrugerile prin cavitație sunt greu observabile.



Proba 1 Fața 1



Proba 1 Fața 2



Proba 2 Fața 1

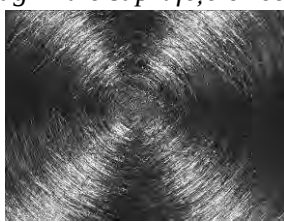


Proba 2 Fața 2

a) Imagini ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație



Proba 1 Fața 1



Proba 1 Fața 2



Proba 2 Fața 1



Proba 2 Fața 2

b) Macrostructuri ale suprafețelor celor 2 epruvete înainte de cavitație

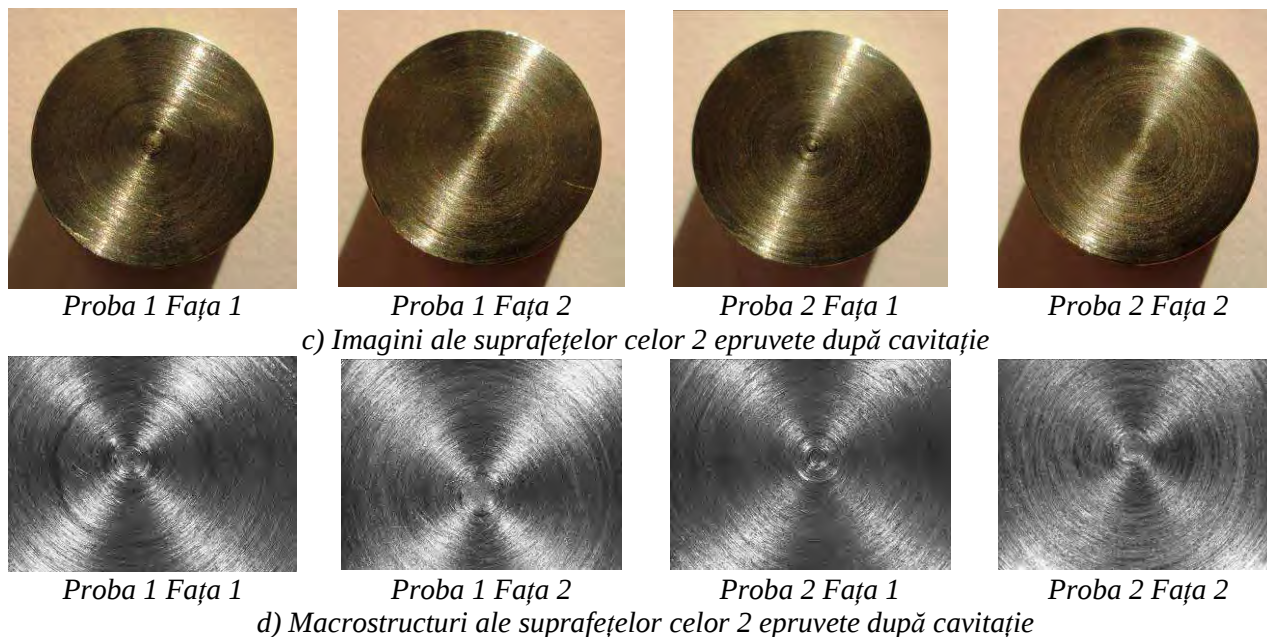


Fig. 5.65 Imagini și macrostructuri ale celor 2 epruvete din X5CrNi18-8 înainte și după cavitație

5.3 Cercetări privind obținerea curbei vitezei de eroziune cavitațională pe diferite materiale

Pe materiale studiate în **subcapitolul 5.2**, fiecare material s-a testat pe patru suprafețe, rezultatele fiind concretizate prin curbele de pierdere masică și viteză de eroziune cavitațională funcție de timp, urmărindu-se reproductibilitatea măsurărilor.

La cercetările din acest paragraf, se vor face încercări pe epruvete din același material numai pentru două suprafețe, cercetări care se vor axa pe obținerea unor curbe ale vitezei de eroziune cavitațională și ale curbei pierderii de material erodat funcție de timp pentru toate cele patru stadii cavitaționale: incubație, accelerare, staționare și decelerare.

Încercările au fost efectuate în două variante, diferite prin durata perioadelor de încercare.

Pentru prima variantă, pentru fiecare încercare se vor parcurge câte o perioadă de timp de 5 și 10 minute, urmate de mai multe perioade de câte 15 minute.

Pentru a doua variantă perioadele de timp diferă comparativ cu cele impuse în cadrul primei variante.

Scopul urmărit a fost de a verifica reproductibilitatea aceleiași curbe ale vitezei de eroziune cavitațională la valori diferite ale perioadelor de timp. Comparația între cele două variante s-a realizat prin reprezentări grafice, unde culoarea albastră corespunde primei variante, iar cea roșie celei de-a doua variante.

5.3.1 Cercetări pe materialul YSn83

Acest material [64] a fost supus la încercări de cavitație în vederea stabilirii curbei vitezei de eroziune cavitațională pentru două variante: pentru 150 de minute pe o perioadă de câte 5 și 10 minute, urmat de 9 perioade de câte 15 minute respectiv pentru 148 de minute pe câte o perioadă de 1 și 2 minute, urmat de 29 de perioade a câte 5 minute.

În tabelul 5.71 se prezintă compoziția chimică, rezultatele obținute se prezintă în tabelele 5.72 și 5.73, iar graficele în figurile 5.66÷5.71.

Compoziția chimică pentru YSn83 [%] Tabel 5.71

Cu	Pb	Sb	Fe	Sn
3,53	0,55	10,9	0,06	84,96

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru YSn83

Tabel 5.72

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	31230.37	0	0	0.0000	0.000	75	15	30810.55	59.82	419.82	3.7650	225.900
5	5	31229.54	0.83	0.83	2.9150	174.900	90	15	30757.42	53.13	472.95	3.6957	221.740
15	10	31145.41	84.13	84.96	8.4401	506.404	105	15	30699.68	57.74	530.69	3.4387	206.320
30	15	31018.2	127.21	212.17	7.0440	422.640	120	15	30654.26	45.42	576.11	2.6637	159.820
45	15	30934.09	84.11	296.28	4.9277	295.660	135	15	30619.77	34.49	610.6	2.0463	122.780
60	15	30870.37	63.72	360	4.1180	247.080	150	15	30592.87	26.9	637.5	1.5403	92.420

Valorile obținute pe perioadele de 5 minute (suprafața 3) pentru YSn83

Tabel 5.73

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	30592.83	0	0	0.0000	0.000	73	5	29984.46	27.59	608.37	6.3740	382.440
1	1	30592.71	0.12	0.12	0.1867	11.200	78	5	29948.31	36.15	644.52	7.0930	425.580
3	2	30592.07	0.64	0.76	1.1366	68.194	83	5	29913.53	34.78	679.3	6.0680	364.080
8	5	30576.18	15.89	16.65	8.0240	481.440	88	5	29887.63	25.9	705.2	3.8550	231.300
13	5	30511.83	64.35	81	12.3060	738.360	93	5	29874.98	12.65	717.85	2.8340	170.040
18	5	30453.12	58.71	139.71	11.0570	663.420	98	5	29859.29	15.69	733.54	2.8750	172.500
23	5	30401.26	51.86	191.57	10.6400	638.400	103	5	29846.23	13.06	746.6	2.6970	161.820
28	5	30346.72	54.54	246.11	10.2940	617.640	108	5	29832.32	13.91	760.51	2.7420	164.520
33	5	30298.32	48.4	294.51	9.7320	583.920	113	5	29818.81	13.51	774.02	2.9500	177.000
38	5	30249.4	48.92	343.43	9.0790	544.740	118	5	29802.82	15.99	790.01	2.8710	172.260
43	5	30207.53	41.87	385.3	8.0120	480.720	123	5	29790.1	12.72	802.73	2.5050	150.300
48	5	30169.28	38.25	423.55	7.6730	460.380	128	5	29777.77	12.33	815.06	2.4470	146.820
53	5	30130.8	38.48	462.03	7.5500	453.000	133	5	29765.63	12.14	827.2	3.0440	182.640
58	5	30093.78	37.02	499.05	8.0670	484.020	138	5	29747.33	18.3	845.5	3.7640	225.840
63	5	30050.13	43.65	542.7	8.1730	490.380	143	5	29727.99	19.34	864.84	3.7670	226.020
68	5	30012.05	38.08	580.78	6.5670	394.020	148	5	29709.66	18.33	883.17	3.5650	213.900

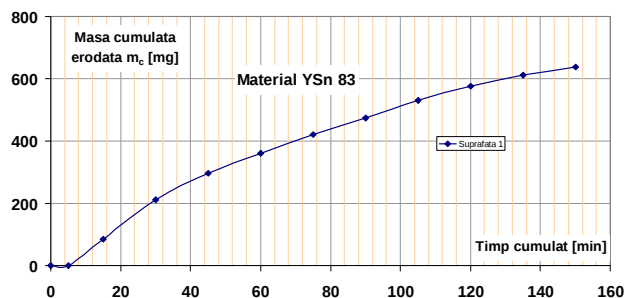


Fig. 5.66 Curba pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 15 minute)

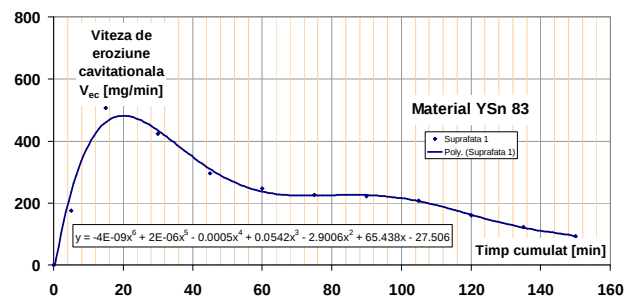


Fig. 5.67 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 15 minute)

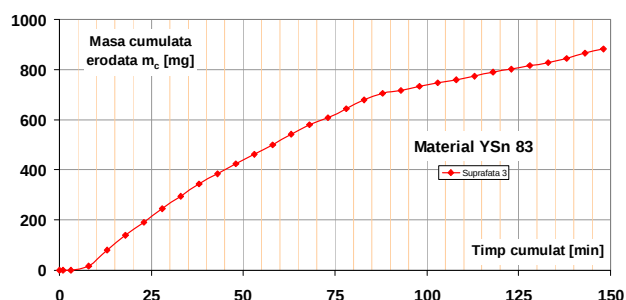


Fig. 5.68 Curba pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 5 minute)

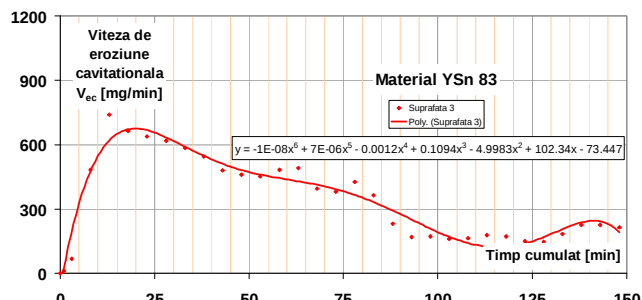


Fig. 5.69 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (perioadă de 5 minute)

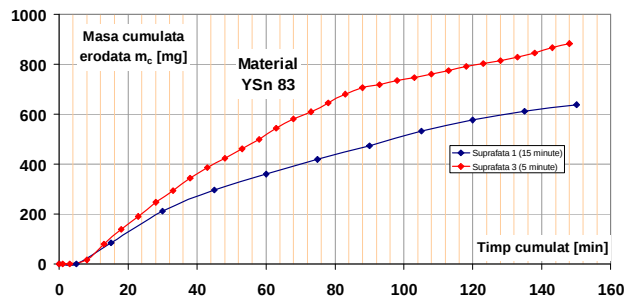


Fig. 5.70 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru YSn83 (comparație)

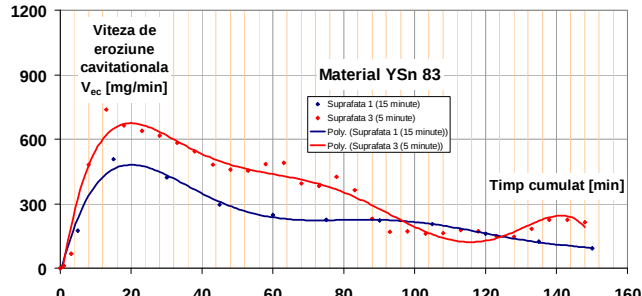


Fig. 5.71 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru YSn83 (comparație)

Așa cum se observă în figura 5.71, apar diferențe ale curbelor la perioade de timp diferite. Astfel epruveta a pierdut 637,5 mg pentru prima variantă de încercare, iar prin a doua variantă de încercare epruveta a pierdut 883,17 mg.

Din reprezentarea curbelor rezultă parcurgerea tuturor celor 4 stadii, inclusiv faza finală, pentru o durată totală de încercare de ~150 minute, datorită slabei rezistențe la cavitație a acestui material.

Curbele din figurile 5.68 și 5.69 au fost interpolate sub formă polinomială pentru a obține o reprezentare matematică a vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp.

Funcția acestor curbe analite este dată în relațiile 5.1 (cu $R^2 = 0.9677$) și 5.2 (cu $R^2 = 0.9472$).

În aceste relații cu v_{ec} s-a notat viteza de eroziune cavitațională, iar cu t s-a notat timpul. Mărimea R este abaterea medie pătratică.

$$v_{ec} = -4 \cdot 10^{-9} t^6 + 2 \cdot 10^{-6} t^5 - 0,0005 t^4 + 0,054 t^3 - 2,9006 t^2 + 65,438 t - 27,506 \quad (5.1)$$

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-8} t^6 + 7 \cdot 10^{-6} t^5 - 0,0012 t^4 + 0,1094 t^3 - 4,9983 t^2 + 102,34 t - 73,447 \quad (5.2)$$

În **figurile 5.72 și 5.73** se prezintă imaginile suprafețelor înainte și după cavitație și macrostructura epruvetei din YSn83 după timpul total de testare de 150 respectiv 148 de minute.



Fig. 5.72 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute



Fig. 5.73 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 5 minute

5.3.2 Cercetări pe materialul EN-GJS-400-15

Această fontă se folosește la fabricarea unor robinete sau vane, componente hidraulice în care poate apare fenomenul de cavitație. Testarea rezistenței la eroziune cavitațională a realizată prin metoda indirectă. Această fontă are compoziția chimică din **tabelul 5.74**.

Compoziția chimică pentru fonta EN-GJS-400-15 [%]

Tabel 5.74

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Mg	Fe
3,5	2,06	0,22	0,050	0,015	0,04	0,03	0,04	0,01	0,038	93,99

Rezultate obținute se prezintă în **tabelele 5.75 și 5.76**, iar în **figurile 5.74÷5.79** se prezintă curbele de pierdere masică și a vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp, prin 2 variante ale perioadelor de încercare: perioade de 15 minute și perioade de 30 minute.

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru EN-GJS-400-15

Tabel 5.75

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	28314.86	0	0	0.0000	0.000	90	15	28306.55	1.3	8.31	0.0847	5.080
5	5	28313.7	1.16	1.16	0.1967	11.800	105	15	28305.31	1.24	9.55	0.0790	4.740
15	10	28312.44	1.26	2.42	0.1055	6.328	120	15	28304.18	1.13	10.68	0.0793	4.760
30	15	28311.32	1.12	3.54	0.0770	4.620	135	15	28302.93	1.25	11.93	0.0883	5.300
45	15	28310.13	1.19	4.73	0.0800	4.800	150	15	28301.53	1.4	13.33	0.0987	5.920
60	15	28308.92	1.21	5.94	0.0760	4.560	165	15	28299.97	1.56	14.89	0.0973	5.840
75	15	28307.85	1.07	7.01	0.0790	4.740	180	15	28298.61	1.36	16.25	0.0840	5.040

Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 3) pentru EN-GJS-400-15

Tabel 5.76

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	28298.66	0	0	0.0000	0.000	90	30	28288.69	3.11	9.97	0.1078	6.470
10	10	28295.98	2.68	2.68	0.2018	12.110	120	30	28285.33	3.36	13.33	0.1240	7.440
30	20	28294.59	1.39	4.07	0.0789	4.734	150	30	28281.25	4.08	17.41	0.1353	8.120
60	30	28291.8	2.79	6.86	0.0983	5.900	180	30	28277.21	4.04	21.45	0.1340	8.040

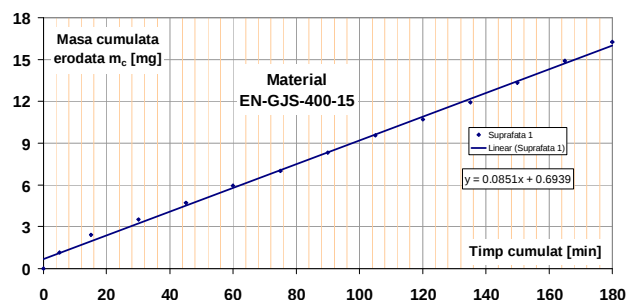


Fig. 5.74 Curba pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 15 minute)

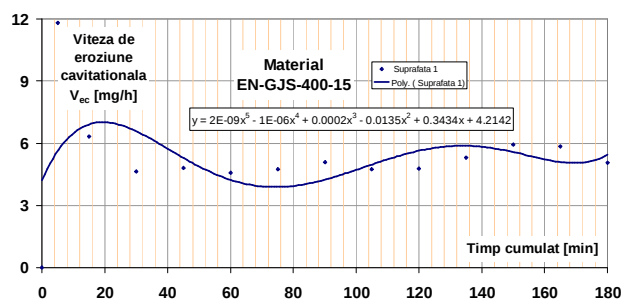


Fig. 5.75 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 15 minute)

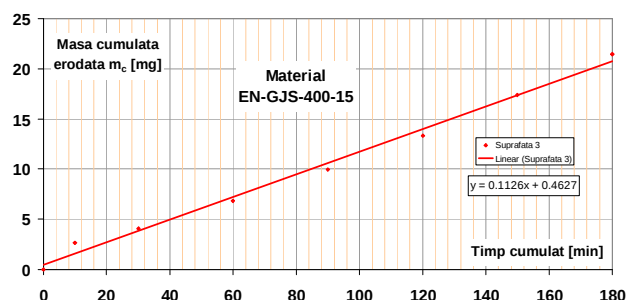


Fig. 5.76 Curba pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 30 minute)

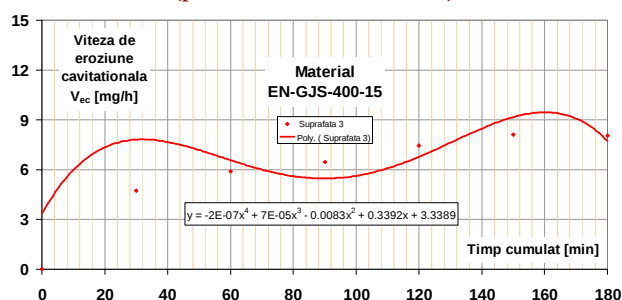


Fig. 5.77 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (perioadă de 30 minute)

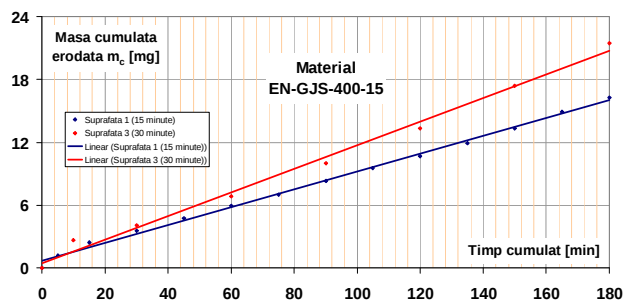


Fig. 5.78 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (comparație)

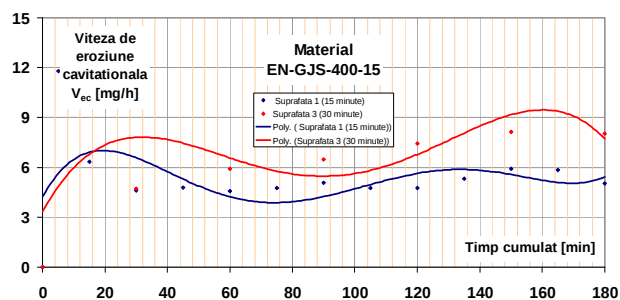


Fig. 5.79 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru EN-GJS-400-15 (comparație)

Așa cum se observă din compararea curbelor obținute pentru cele 2 variante de încercări există anumite diferențe. Epruveta sub formă de cub a pierdut 16,25 mg pentru prima variantă de încercare, iar pentru a doua variantă de încercare s-a pierdut 21,45 mg.

Curbele vitezei de eroziune cavitațională au o alură asemănătoare. Pentru curbele graficelor din figurile 5.74÷5.77 s-au obținut prin interpolare următoarele relații de calcul.

$$M = 0,0851t + 0,6939 \quad (5.3)$$

$$v_{ec} = 2 \cdot 10^{-9}t^5 - 1 \cdot 10^{-6}t^4 + 0,0002t^3 - 0,0135t^2 + 0,3434t + 4,2142 \quad (5.4)$$

$$M = 0,1126t + 0,4627 \quad (5.5)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-7}t^4 + 7 \cdot 10^{-5}t^3 - 0,0083t^2 + 0,3392t + 3,3389 \quad (5.6)$$

Pentru aceste relații abaterile medii pătratice au următoarele valori: relațiile 5.3 (cu $R^2 = 0.9969$) și 5.5 (cu $R^2 = 0.1401$), unde cu M s-a notat pierderea masică a materialului, respectiv relațiile 5.4 (cu $R^2 = 0.9926$) și 5.6 (cu $R^2 = 0.2608$) pentru viteza de eroziune cavitațională. În figurile 5.80 și 5.81 se prezintă imaginile suprafețelor erodate prin atacul cavitațional.

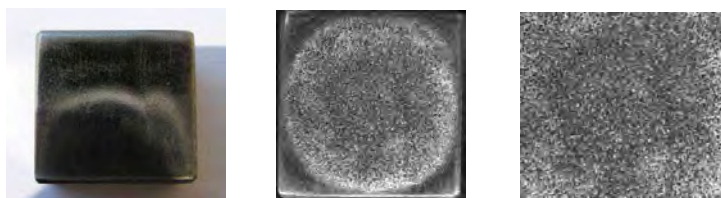


Fig. 5.80 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute



Fig. 5.81 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute

5.3.3 Cercetări pe materialul Fc (EN-GJL)

Fontele cenușii din care face parte acest material, după cum s-a menționat în **tabelul 5.1**, conține proporții mai mari de siliciu peste 2 %, iar carbonul, în întregime sau în cea mai mare parte este sub formă de grafit lamelar [116].

Această fontă supusă la cavitație prin metoda indirectă, are compoziția chimică din **tabelul 5.77**, iar rezultatele cercetărilor prin cele 2 variante de încercări: cu perioade de 5, 10 respectiv 15 minute și perioade de 10, 20 și 30 minute sunt prezentate în **tabelele 5.78 și 5.79**.

Compoziția chimică pentru fonta cu grafit lamelar [%]

Tabel 5.77

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Fe
3,3	2,19	0,84	0,122	0,071	0,43	0,3	92,74

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 2 față 1) pentru Fc (EN-GJL)

Tabel 5.78

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14138.23	0	0	0.0000	0.000	90	15	14125.97	4	12.26	0.2987	17.920
5	5	14137.81	0.42	0.42	0.0687	4.120	105	15	14121.01	4.96	17.22	0.3543	21.260
15	10	14137.43	0.38	0.8	0.0516	3.096	120	15	14115.34	5.67	22.89	0.3987	23.920
30	15	14136.35	1.08	1.88	0.0840	5.040	135	15	14109.05	6.29	29.18	0.4207	25.240
45	15	14134.91	1.44	3.32	0.1150	6.900	150	15	14102.72	6.33	35.51	0.4287	25.720
60	15	14132.9	2.01	5.33	0.1647	9.880	165	15	14096.19	6.53	42.04	0.4303	25.820
75	15	14129.97	2.93	8.26	0.2310	13.860	180	15	14089.81	6.38	48.42	0.4203	25.220

Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (proba 1 față 1) pentru Fc (EN-GJL)

Tabel 5.79

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14016.27	0	0	0.0000	0.000	90	30	14001.73	8.52	14.54	0.3717	22.300
10	10	14016.09	0.18	0.18	0.0318	1.910	120	30	13987.95	13.78	28.32	0.5195	31.170
30	20	14014.9	1.19	1.37	0.0977	5.862	150	30	13970.56	17.39	45.71	0.5478	32.870
60	30	14010.25	4.65	6.02	0.2195	13.170	180	30	13955.08	15.48	61.19	0.4842	29.050

Din **tabelul 5.78** se observă că s-a parcurs câte o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv 11 perioade de 15 minute, iar pentru a doua variantă de încercări s-a parcurs câte o perioadă de 10 și 20 minute, respectiv 5 perioade de 30 minute, ceea ce înseamnă că perioadele s-au dublat față de perioadele din prima variantă de încercări.

În **figurile 5.82÷5.87** se prezintă graficele pentru masa erodată cumulată respectiv viteza de eroziune cavitațională funcție de timp pentru cele 2 variante de încercări, precum și grafice privind compararea acestora.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

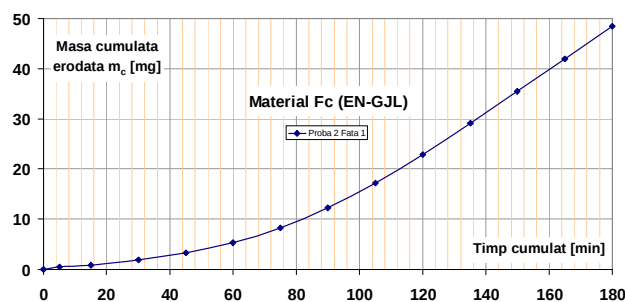


Fig. 5.82 Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 15 minute)

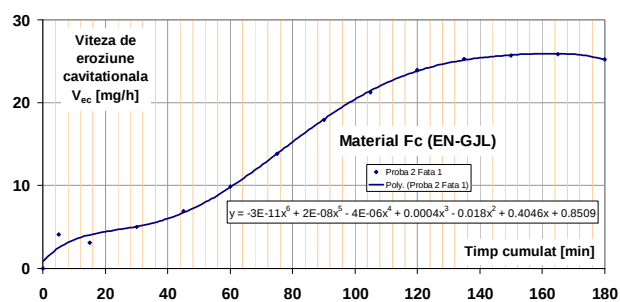


Fig. 5.83 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 15 minute)

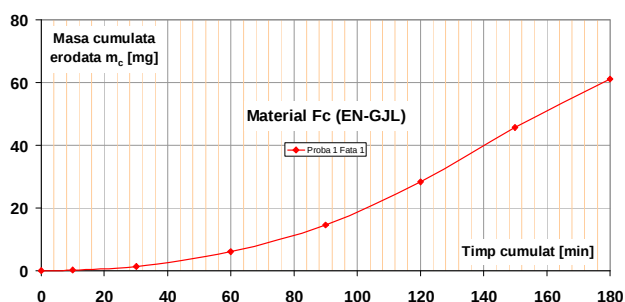


Fig. 5.84 Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 30 minute)

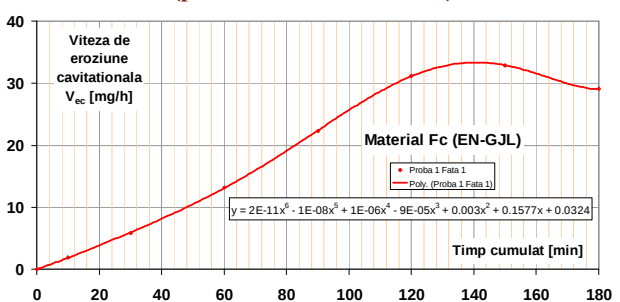


Fig. 5.85 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (perioadă de 30 minute)

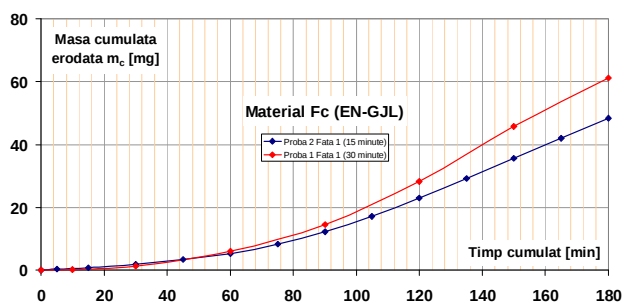


Fig. 5.86 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (comparație)

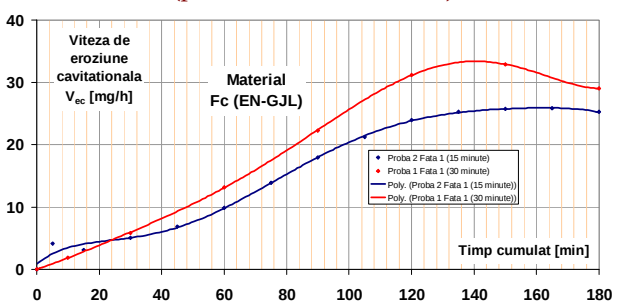


Fig. 5.87 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fc (EN-GJL) (comparație)

Din aceste grafice rezultă că epruveta testată la perioade de 15 minute a pierdut 48,42 mg, iar epruveta testată la perioade de 30 minute a pierdut 61,19 mg.

Curbele din figurile 5.83 și 5.85 au fost approximate prin interpolare polinomială, conform relațiilor 5.7 (cu $R^2 = 0.9964$) și 5.8 (cu $R^2 = 1$).

$$v_{ec} = -3 \cdot 10^{-11} t^6 + 2 \cdot 10^{-8} t^5 - 4 \cdot 10^{-6} t^4 + 0,0004 t^3 - 0,018 t^2 + 0,4046 t + 0,8509 \quad (5.7)$$

$$v_{ec} = 2 \cdot 10^{-8} t^6 - 1 \cdot 10^{-8} t^5 + 1 \cdot 10^{-6} t^4 - 9 \cdot 10 t^3 + 0,003 t^2 + 0,1577 t + 0,0324 \quad (5.8)$$

În figurile ce urmează se prezintă imaginile suprafețelor analizate înainte și după cavitație, precum și macrostructura epruvetei sub formă de cub cu latura de 16 mm, după timpul total de testare de 180 minute.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

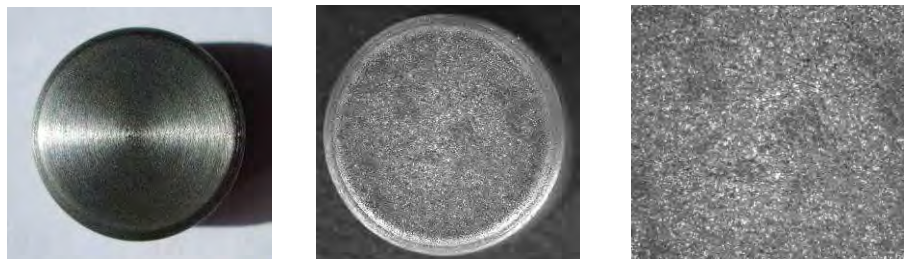


Fig. 5.88 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute

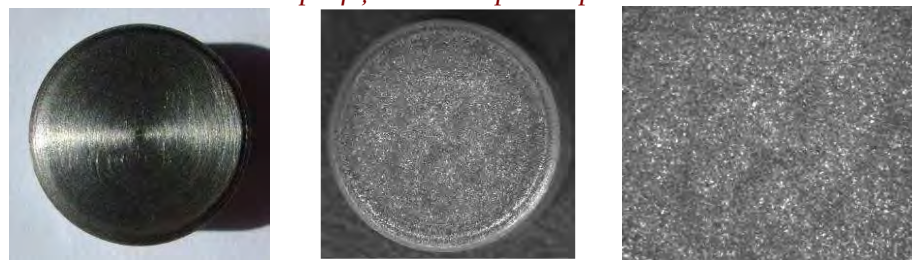


Fig. 5.89 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute

5.3.4 Cercetări pe materialul AlSi12

Pentru obținerea curbei vitezei de eroziune cavitațională s-a testat și acest material cu 88 % Al [108]. În tabelul 5.80 este prezentată compoziția chimică pentru acest material.

Compoziția chimică pentru AlSi12 [%]

Tabel 5.80

Cu	Fe	Mn	Mg	Si	Zn	Ti	Al
0,01	0,47	0,44	< 0,005	11,03	0,03	0,01	88

Rezultate obținute se prezintă numeric în tabelele 5.81 și 5.82 și grafic în figurile 5.90÷5.95, sub forma curbelor de pierdere masică pentru cele 2 variante ale perioadelor de încercare: 15 minute respectiv 8 minute.

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 2) pentru AlSi12

Tabel 5.81

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	10327.87	0	0	0.0000	0.000	105	15	10215.86	9.04	112.01	0.6053	36.320
5	5	10327.04	0.83	0.83	0.4447	26.680	120	15	10206.74	9.12	121.13	0.6497	38.980
15	10	10317.02	10.02	10.85	1.4092	84.552	135	15	10196.37	10.37	131.5	0.7757	46.540
30	15	10286.72	30.3	41.15	1.7767	106.600	150	15	10183.47	12.9	144.4	0.7473	44.840
45	15	10263.72	23	64.15	1.2920	77.520	165	15	10173.95	9.52	153.92	0.7020	42.120
60	15	10247.96	15.76	79.91	0.9283	55.700	180	15	10162.41	11.54	165.46	0.5720	34.320
75	15	10235.87	12.09	92	0.7687	46.120	195	15	10156.79	5.62	171.08	0.3033	18.200
90	15	10224.9	10.97	102.97	0.6670	40.020	210	15	10153.31	3.48	174.56	0.1607	9.640

Valorile obținute pe perioadele de 8 minute (suprafața 4) pentru AlSi12

Tabel 5.82

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	10153.5	0	0	0.0000	0.000	104	8	10005.61	13.45	147.89	1.5912	95.475
3	3	10152.9	0.6	0.6	0.2968	17.805	112	8	9993.6	12.01	159.9	1.4881	89.288
8	5	10150.61	2.29	2.89	0.6496	38.978	120	8	9981.8	11.8	171.7	1.3469	80.813
16	8	10142.96	7.65	10.54	1.1731	70.388	128	8	9972.05	9.75	181.45	1.2312	73.875
24	8	10131.84	11.12	21.66	1.4381	86.287	136	8	9962.1	9.95	191.4	1.1219	67.312
32	8	10119.95	11.89	33.55	1.5606	93.637	144	8	9954.1	8	199.4	0.8744	52.462
40	8	10106.87	13.08	46.63	1.4750	88.500	152	8	9948.11	5.99	205.39	1.0131	60.788
48	8	10096.35	10.52	57.15	1.4631	87.788	160	8	9937.89	10.22	215.61	1.1800	70.800
56	8	10083.46	12.89	70.04	1.7763	106.575	168	8	9929.23	8.66	224.27	1.0387	62.325
64	8	10067.93	15.53	85.57	1.7712	106.275	176	8	9921.27	7.96	232.23	1.0056	60.338
72	8	10055.12	12.81	98.38	1.5981	95.887	184	8	9913.14	8.13	240.36	1.1069	66.413
80	8	10042.36	12.76	111.14	1.5981	95.888	192	8	9903.56	9.58	249.94	1.2656	75.938
88	8	10029.55	12.81	123.95	1.4563	87.375	200	8	9892.89	10.67	260.61	1.0725	64.350
96	8	10019.06	10.49	134.44	1.4962	89.775	208	8	9886.4	6.49	267.1	0.5500	33.000

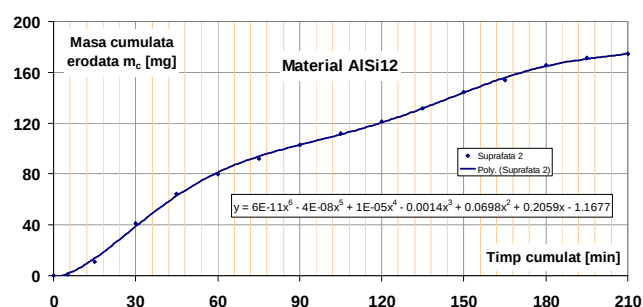


Fig. 5.90 Curba pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 15 minute)

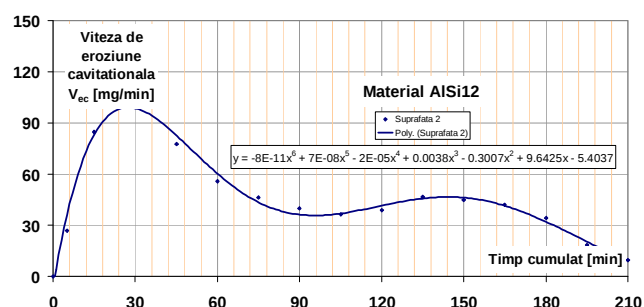


Fig. 5.91 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 15 minute)

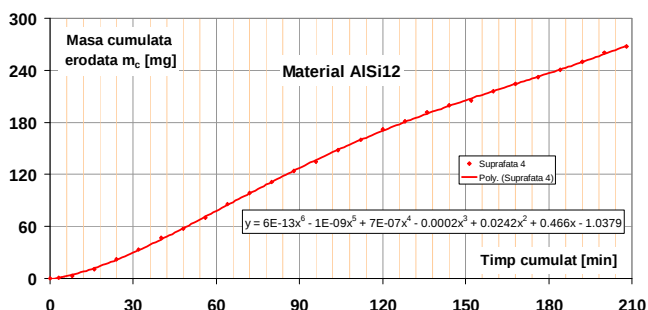


Fig. 5.92 Curba pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 8 minute)

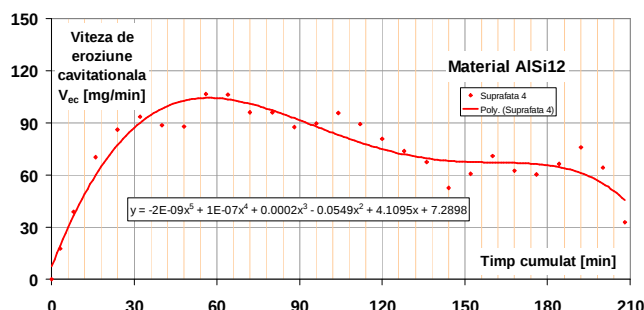


Fig. 5.93 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (perioadă de 8 minute)

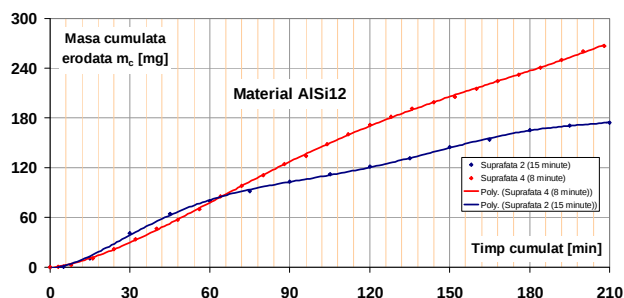


Fig. 5.94 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru AlSi12 (comparație)

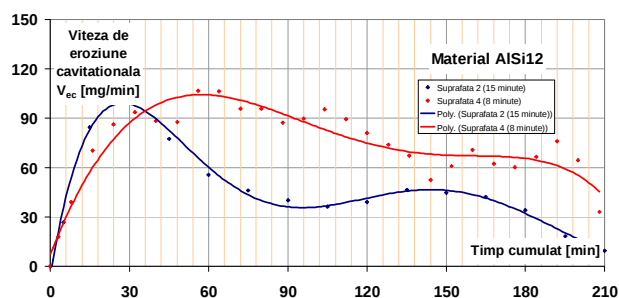


Fig. 5.95 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru AlSi12 (comparație)

Așa cum se observă există diferențe valorice între cele 2 variante de încercări pe același material, deși curbele au aceeași alură. Din tabelele expuse anterior rezultă că suprafața 2 a pierdut 174,56 mg (varianta 1), iar suprafața 4 a pierdut 267,1 mg (varianta 2).

Curbele din figurile 5.90÷5.93 au fost interpolate polinomial, înregistrându-se următoarele abateri medii pătratice: relațiile 5.9 (cu $R^2 = 0.9995$) și 5.11 (cu $R^2 = 0.9762$) pentru pierderea masică, respectiv relațiile 5.10 (cu $R^2 = 0.9998$) și 5.12 (cu $R^2 = 0.8997$) pentru viteza de eroziune cavitațională.

$$M = 6 \cdot 10^{-11} t^6 - 4 \cdot 10^{-8} t^5 + 1 \cdot 10^{-5} t^4 - 0,0014 t^3 + 0,0698 t^2 + 0,2059 t - 1,1677 \quad (5.9)$$

$$v_{ec} = -8 \cdot 10^{-11} t^6 + 7 \cdot 10^{-8} t^5 - 2 \cdot 10^{-5} t^4 + 0,0038 t^3 - 0,3007 t^2 + 9,6425 t - 5,4037 \quad (5.10)$$

$$M = 6 \cdot 10^{-13} t^6 - 1 \cdot 10^{-9} t^5 + 7 \cdot 10^{-7} t^4 - 0,0002 t^3 + 0,0242 t^2 + 0,466 t - 1,0379 \quad (5.11)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-6} t^5 + 1 \cdot 10^{-7} t^4 + 0,0002 t^3 - 0,0549 t^2 + 4,1095 t + 7,2898 \quad (5.12)$$

În figurile 5.96 și 5.97 se prezintă imaginile suprafețelor analizate înainte și după cavitație, cât și macrostructura suprafețelor.



Fig. 5.96 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute



Fig. 5.97 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 8 minute

5.3.5 Cercetări pe materialul CuSn12

Acest bronz a fost supus la cavitație, pe aparatul de testare cu sonotroda din materialul de titan prin metoda indirectă. Compoziția chimică a acestui material este descrisă în **tabelul 5.83**.

Compoziția chimică pentru CuSn12 [%] **Tabel 5.83**

Sn	Pb	Fe	Al	Ni	Zn	Cu
12,3	0,17	< 0,11	0,06	< 0,02	< 0,04	87,3

Pe această epruvetă, sub formă de cub cu latura de 16 mm s-a ales suprafața 4 pentru încercarea de 15 minute pe perioadă și suprafața 2 pentru încercarea de 30 minute pe perioadă. Rezultatele obținute pe acest material sunt evidențiate în **tabelele 5.84 și 5.85**, iar graficele corespunzătoare sunt prezentate în **figurile 5.98÷5.103**.

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 4) pentru CuSn12

Tabel 5.84

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	34004.82	0	0	0.0000	0.000	120	15	33996.25	2.1	8.57	0.1413	8.480
5	5	34004.32	0.5	0.5	0.0727	4.360	135	15	33994.11	2.14	10.71	0.1560	9.360
15	10	34004.14	0.18	0.68	0.0172	1.032	150	15	33991.57	2.54	13.25	0.1840	11.040
30	15	34003.9	0.24	0.92	0.0207	1.240	165	15	33988.59	2.98	16.23	0.1983	11.900
45	15	34003.52	0.38	1.3	0.0373	2.240	180	15	33985.62	2.97	19.2	0.1950	11.700
60	15	34002.78	0.74	2.04	0.0587	3.520	195	15	33982.74	2.88	22.08	0.1910	11.460
75	15	34001.76	1.02	3.06	0.0843	5.060	210	15	33979.89	2.85	24.93	0.1850	11.100
90	15	34000.25	1.51	4.57	0.1137	6.820	225	15	33977.19	2.7	27.63	0.1750	10.500
105	15	33998.35	1.9	6.47	0.1333	8.000	-	-	-	-	-	-	-

Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 2) pentru CuSn12

Tabel 5.85

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	33979.03	0	0	0.0000	0.000	120	30	33965.54	5.23	13.49	0.1940	11.640
10	10	33976.75	2.28	2.28	0.1607	9.640	150	30	33959.13	6.41	19.9	0.2293	13.760
30	20	33976.23	0.52	2.8	0.0413	2.480	180	30	33951.78	7.35	27.25	0.2375	14.250
60	30	33974.3	1.93	4.73	0.0910	5.460	210	30	33944.88	6.9	34.15	0.2472	14.830
90	30	33970.77	3.53	8.26	0.1460	8.760	240	30	33936.95	7.93	42.08	0.2815	16.890

Suprafața 4 a pierdut din masa materialului 27,63 mg pentru o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv pentru 14 perioade de 15 minute, iar suprafața 2 a pierdut din masa materialului 42,08 mg pentru o perioadă de 10 și 20 de minute, respectiv 7 perioade de 30 minute.

Există diferențe între rezultatele celor 2 tipuri de încercări referitoare la valorile vitezei de eroziune cavitațională.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

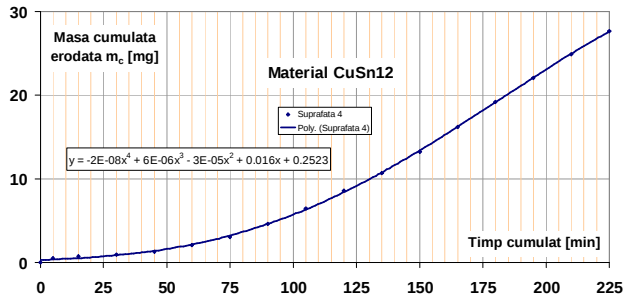


Fig. 5.98 Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 15 minute)

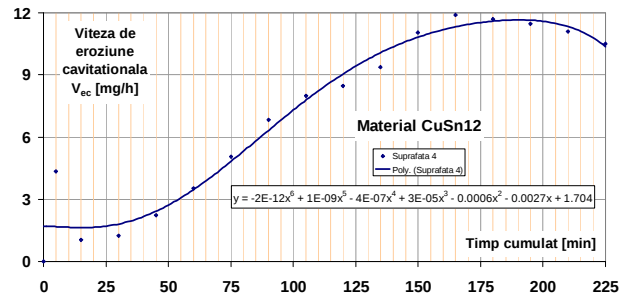


Fig. 5.99 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 15 minute)

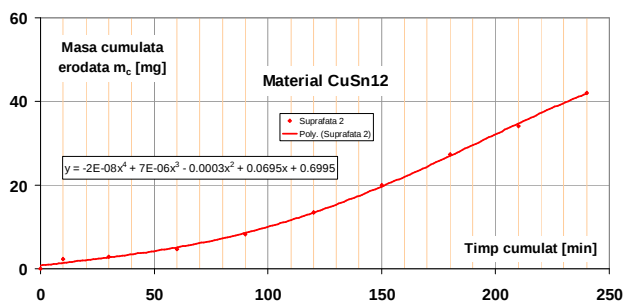


Fig. 5.100 Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 30 minute)

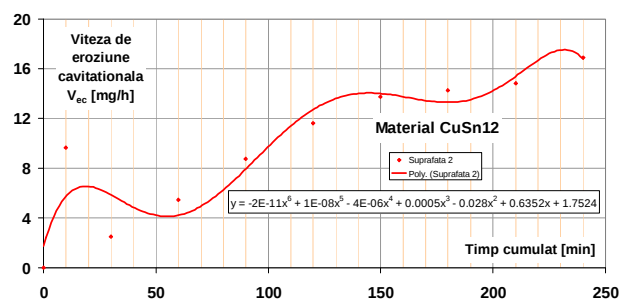


Fig. 5.101 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (perioadă de 30 minute)

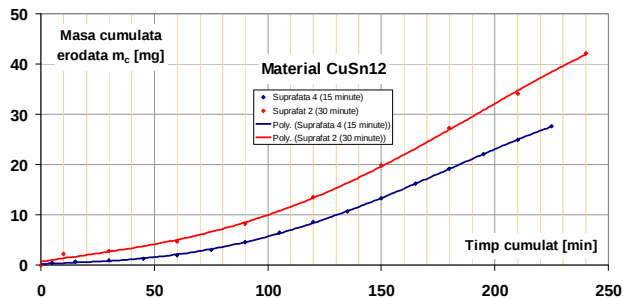


Fig. 5.102 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru CuSn12 (comparație)

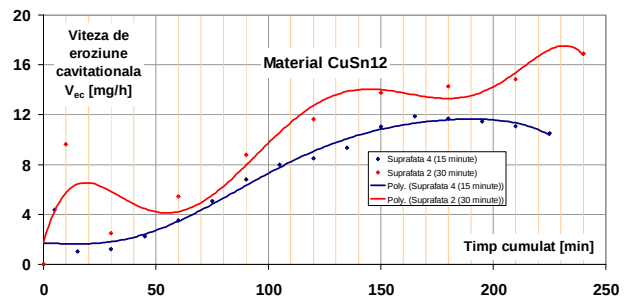


Fig. 5.103 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn12 (comparație)

Curbele din figurile 5.98÷5.101 au fost interpolate polinomial, iar abaterile medii patratice înregistrate au fost: relațiile 5.13 (cu $R^2 = 0.9998$) și 5.15 (cu $R^2 = 0.9559$) pentru pierderea masică, respectiv în relațiile 5.14 (cu $R^2 = 0.999$) și 5.16 (cu $R^2 = 0.8792$) pentru viteza de eroziune cavitațională.

$$M = -2 \cdot 10^{-8} t^4 + 6 \cdot 10^{-6} t^3 - 3 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,016t + 0,2523 \quad (5.13)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-12} t^6 + 1 \cdot 10^{-9} t^5 - 4 \cdot 10^{-7} t^4 + 3 \cdot 10^{-5} t^3 - 0,0006t^2 - 0,0027t + 1,704 \quad (5.14)$$

$$M = -2 \cdot 10^{-8} t^4 + 7 \cdot 10^{-6} t^3 - 0,0003t^2 + 0,0695t + 0,6995 \quad (5.15)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-11} t^6 + 1 \cdot 10^{-8} t^5 - 4 \cdot 10^{-6} t^4 + 0,0005t^3 - 0,028t^2 + 0,6352t + 1,7524 \quad (5.16)$$

În figurile 5.104 și 5.105 se prezintă imaginile suprafețelor analizate înainte și după cavitație, cât și macrostructura acestora după timpul total de testare.



Fig. 5.104 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute (timp total de 225 minute)



Fig. 5.105 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute (timp total de 240 minute)

5.3.6 Cercetări pe materialul CuSn10Pb5

Acest bronz a fost supus la cavitație în vederea stabilirii curbei vitezei de eroziune cavitațională și are compoziție chimică descrisă în tabelul 5.86.

Compoziția chimică pentru CuSn10Pb5 [%]

Tabel 5.86

Sb	Sn	Pb	Fe	Al	Ni	Zn	P	Cu
0,03	10,2	4,69	< 0,1	< 0,006	< 0,02	< 0,04	< 0,07	84,84

Pe această epruvetă, sub formă de cub cu latura de 16 mm s-a ales suprafața 4 și suprafața 2 pentru cele 2 variante de încercări: perioade de 15 minute respectiv perioade de 30 minute. Rezultatele obținute pe acest material sunt evidențiate în tabelele 5.87 și 5.88, iar graficele corespunzătoare se vor prezenta în figurile 5.106÷5.111.

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 4) pentru CuSn10Pb5

Tabel 5.87

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	36112.72	0	0	0.0000	0.000	135	15	36095.26	3.52	17.46	0.2607	15.640
5	5	36112.33	0.39	0.39	0.0660	3.960	150	15	36090.96	4.3	21.76	0.3013	18.080
15	10	36111.91	0.42	0.81	0.0383	2.296	165	15	36086.22	4.74	26.5	0.3307	19.840
30	15	36111.42	0.49	1.3	0.0383	2.300	180	15	36081.04	5.18	31.68	0.3413	20.480
45	15	36110.76	0.66	1.96	0.0563	3.380	195	15	36075.98	5.06	36.74	0.3283	19.700
60	15	36109.73	1.03	2.99	0.0900	5.400	210	15	36071.19	4.79	41.53	0.3227	19.360
75	15	36108.06	1.67	4.66	0.1337	8.020	225	15	36066.3	4.89	46.42	0.3483	20.900
90	15	36105.72	2.34	7	0.1810	10.860	240	15	36060.74	5.56	51.98	0.3697	22.180
105	15	36102.63	3.09	10.09	0.2313	13.880	255	15	36055.21	5.53	57.51	0.3533	21.200
120	15	36098.78	3.85	13.94	0.2457	14.740	270	15	36050.14	5.07	62.58	0.3227	19.360

Valorile obținute pe perioadele de 30 minute (suprafața 2) pentru CuSn10Pb5

Tabel 5.88

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	36050.14	0	0	0.0000	0.000	150	30	36024.74	9.62	25.4	0.3350	20.100
10	10	36049.57	0.57	0.57	0.0462	2.770	180	30	36014.26	10.48	35.88	0.3675	22.050
30	20	36049.08	0.49	1.06	0.0374	2.242	210	30	36002.69	11.57	47.45	0.3933	23.600
60	30	36047.38	1.7	2.76	0.1062	6.370	240	30	35990.66	12.03	59.48	0.4038	24.230
90	30	36042.71	4.67	7.43	0.2170	13.020	270	30	35978.46	12.2	71.68	0.4095	24.570
120	30	36034.36	8.35	15.78	0.2995	17.970	-	-	-	-	-	-	-

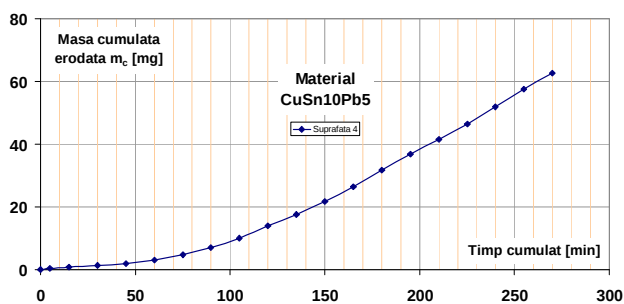


Fig. 5.106 Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 15 minute)

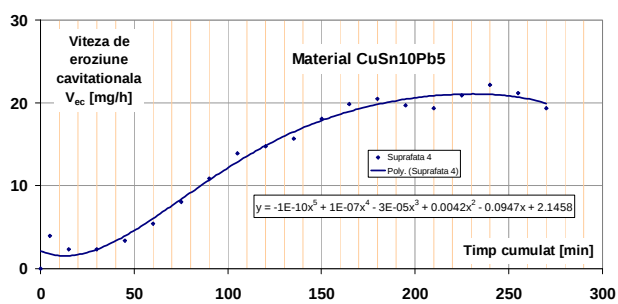


Fig. 5.107 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 15 minute)

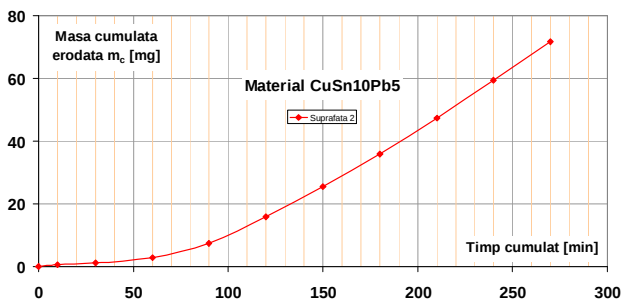


Fig. 5.108 Curba pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 30 minute)

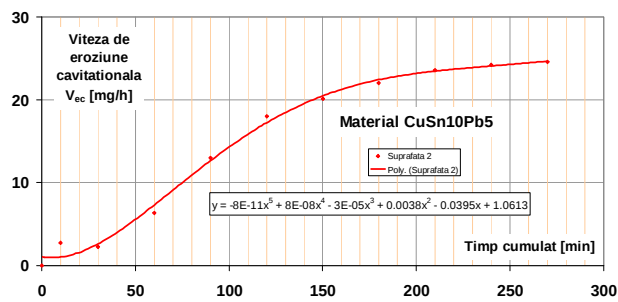


Fig. 5.109 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (perioadă de 30 minute)

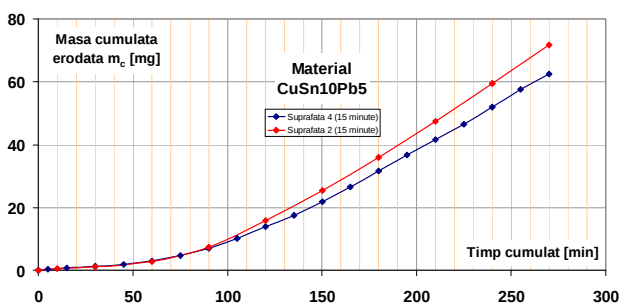


Fig. 5.110 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (comparație)

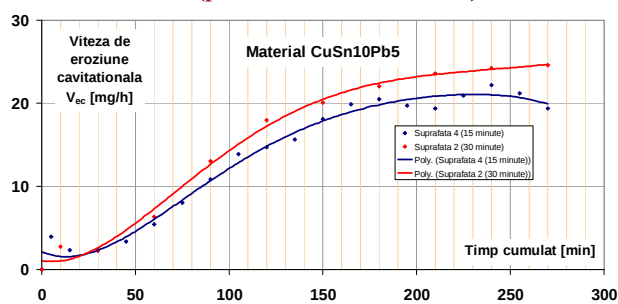


Fig. 5.111 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru CuSn10Pb5 (comparație)

Suprafețele analizate au pierdut în total fiecare câte 62,58 mg pentru prima variantă de încercare, respectiv 71,68 pentru al doilea tip de încercare. Din grafice se observă o bună reproductibilitate a celor 2 tipuri de curbe pentru cele 2 variante de încercări.

Curbele din **figurile 5.107 și 5.109** au fosat interpolate polinomial, similar cu cele din [105], abaterile medii pătratice înregistrate fiind următoarele: **relațiile 5.17** (cu $R^2 = 0.9837$) și **5.18** (cu $R^2 = 0.9934$).

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-10} t^5 + 1 \cdot 10^{-7} t^4 - 3 \cdot 10^{-5} t^3 + 0,0042 t^2 - 0,0947 t + 2,1458 \quad (5.17)$$

$$v_{ec} = -8 \cdot 10^{-11} t^5 + 8 \cdot 10^{-8} t^4 - 3 \cdot 10^{-5} t^3 + 0,0038 t^2 - 0,0395 t + 1,0613 \quad (5.18)$$

În **figurile 5.112 și 5.113** se prezintă imaginile suprafețelor analizate înainte și după cavitație, cât și macrostructura suprafețelor erodate după timpul total de testare pe cele 2 variante de încercări.

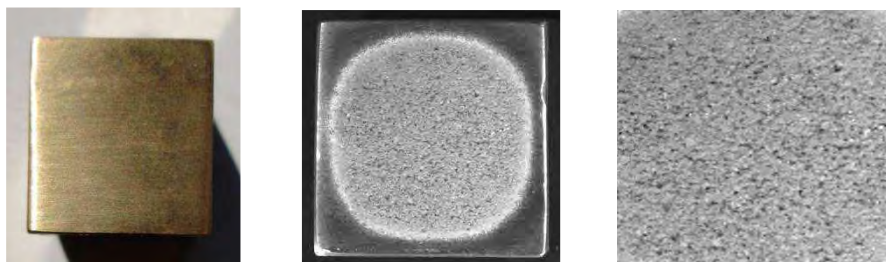


Fig. 5.112 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute



Fig. 5.113 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute

5.3.7 Cercetările pe materialul Fgn (EN-GJS)

Acest material supus la cavitație prin metoda indirectă, are compoziția chimică din **tabelul 5.89**, iar rezultatele obținute pe această fontă sunt prezentate în **tabelele 5.90 și 5.91**, rezultate obținute pe perioade diferite de 15 minute respectiv de 30 de minute pentru un timp total de 300 minute.

Compoziția chimică pentru fonta cu grafit nodular [%]

Tabel 5.89

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
4,81	1,66	0,705	0,122	0,116	0,165	0,092	0,0458
Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	Fe	-
< 0,0003	< 0,00252	< 0,716	0,00261	0,00478	0,0296	91,52	-

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 1 fața 1) pentru Fgn (EN-GJS)

Tabel 5.90

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14384.34	0	0	0.0000	0.000	150	15	14361.53	5.25	22.81	0.3790	22.740
5	5	14383.96	0.38	0.38	0.0660	3.960	165	15	14355.41	6.12	28.93	0.4527	27.160
15	10	14383.5	0.46	0.84	0.0489	2.936	180	15	14347.95	7.46	36.39	0.5517	33.100
30	15	14382.7	0.8	1.64	0.0597	3.580	195	15	14338.86	9.09	45.48	0.6367	38.200
45	15	14381.71	0.99	2.63	0.0753	4.520	210	15	14328.85	10.01	55.49	0.5927	35.560
60	15	14380.44	1.27	3.9	0.1017	6.100	225	15	14321.08	7.77	63.26	0.4907	29.440
75	15	14378.66	1.78	5.68	0.1237	7.420	240	15	14314.13	6.95	70.21	0.5417	32.500
90	15	14376.73	1.93	7.61	0.1413	8.480	255	15	14304.83	9.3	79.51	0.5830	34.980
105	15	14374.42	2.31	9.92	0.1837	11.020	270	15	14296.64	8.19	87.7	0.5113	30.680
120	15	14371.22	3.2	13.12	0.2547	15.280	285	15	14289.49	7.15	94.85	0.4713	28.280
135	15	14366.78	4.44	17.56	0.3230	19.380	300	15	14282.5	6.99	101.84	0.4607	27.640

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (proba 2 fața 1) pentru Fgn (EN-GJS)

Tabel 5.91

Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Peri-oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu-lat						per perioada	cumu-lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	13549.37	0	0	0.0000	0.000	150	30	13519.7	9.39	29.67	0.3473	20.840
10	10	13548.82	0.55	0.55	0.0732	4.390	180	30	13508.25	11.45	41.12	0.3715	22.290
30	20	13546.63	2.19	2.74	0.1172	7.030	210	30	13497.41	10.84	51.96	0.3923	23.540
60	30	13542.77	3.86	6.6	0.1580	9.480	240	30	13484.71	12.7	64.66	0.4135	24.810
90	30	13537.15	5.62	12.22	0.2280	13.680	270	30	13472.6	12.11	76.77	0.3930	23.580
120	30	13529.09	8.06	20.28	0.2908	17.450	300	30	13461.13	11.47	88.24	0.3717	22.300

Din rezultatele obținute, se observă că epruveta încercată la perioade de 15 minute a pierdut 101,84 mg, în timp ce epruveta încercată la perioade de 30 minute a pierdut doar 88,24 mg.

În figurile 5.114÷5.119 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată funcție de timp, viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și compararea acestora 2 tipuri de curbe pentru cele 2 variante de încercări.

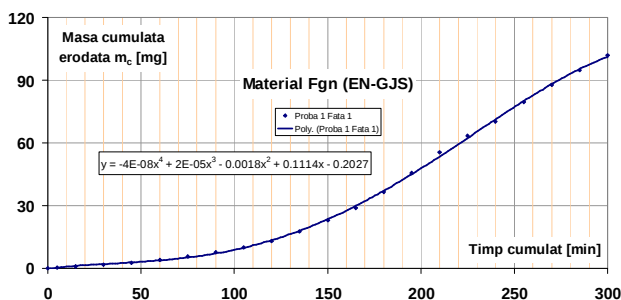


Fig. 5.114 Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 15 minute)

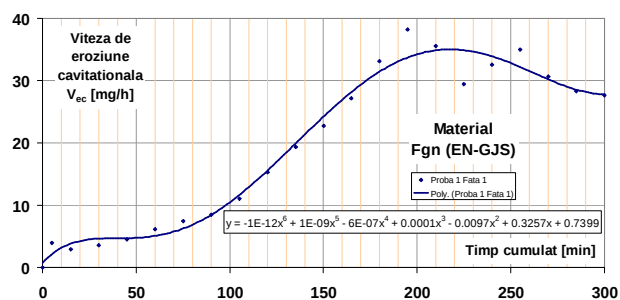


Fig. 5.115 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 15 minute)

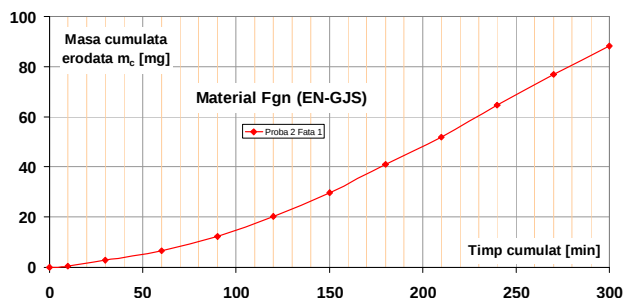


Fig. 5.116 Curba pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 30 minute)

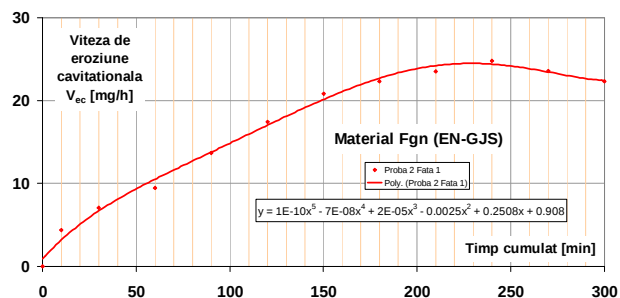


Fig. 5.117 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (perioadă de 30 minute)

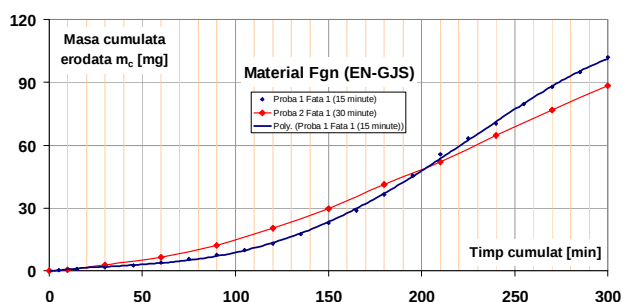


Fig. 5.118 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (comparație)

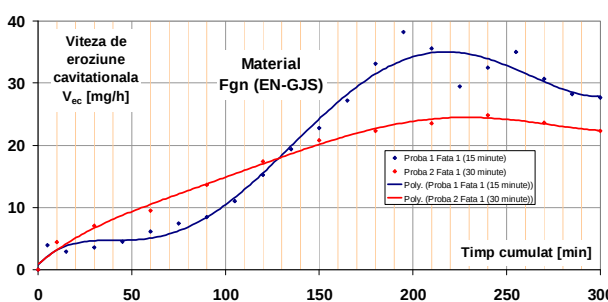


Fig. 5.119 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru Fgn (EN-GJS) (comparație)

Din figurile 5.118 și 5.119 se observă diferențele care există pentru cele 2 variante de încercări: prima variantă de încercare este pentru o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv pe 19 perioade de 15 minute, iar a doua variantă de încercare este pe o perioadă de 10 și 20 minute, respectiv pe 9 perioade de 30 minute.

Curbele pentru pierderea masică funcție de timp și curbele vitezei de eroziune cavitațională sunt ușor diferite și nu se reproduc. Ambele curbe se intersectează. Curbele vitezei de eroziune au parcurs toate cele 4 stadii pentru ambele variante de încercări.

Curbele din figurile 5.114, 5.115 și 5.117 au fost interpolate polinomial, înregistrându-se următoarele abateri medii pătratice: relațiile 5.19 (cu $R^2 = 0.9996$) pentru pierderea masică, respectiv relațiile 5.20 (cu $R^2 = 0.9788$) și 5.21 (cu $R^2 = 0.9939$) pentru viteza de eroziune cavitațională.

$$M = -4 \cdot 10^{-8} t^4 + 2 \cdot 10^{-5} t^3 - 0,0018 t^2 + 0,1114 t - 0,2027 \quad (5.19)$$

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-12} t^6 + 1 \cdot 10^{-9} t^5 - 6 \cdot 10^{-7} t^4 + 0,0001 t^3 - 0,0097 t^2 + 0,3257 t + 0,7399 \quad (5.20)$$

$$v_{ec} = 1 \cdot 10^{-10} t^5 - 7 \cdot 10^{-8} t^4 + 2 \cdot 10^{-5} t^3 - 0,0025 t^2 + 0,2508 t + 0,908 \quad (5.21)$$

În figurile 5.120 și 5.121 se prezintă imaginile suprafețelor înainte și după cavitație, cât și macrostructura acestora după timpul total de testare, imagini realizate cu ajutorul unui aparat de fotografiat și cu un stereomicroscop.

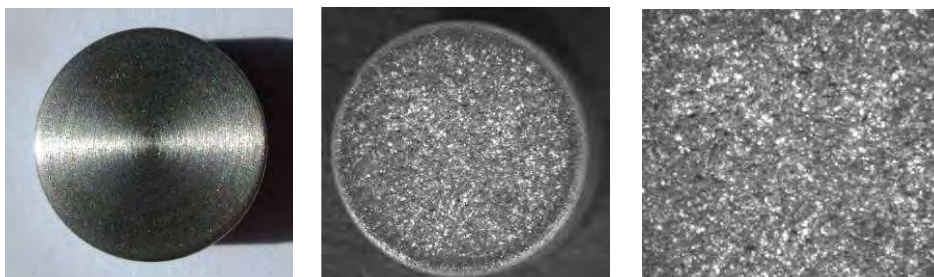


Fig. 5.120 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute

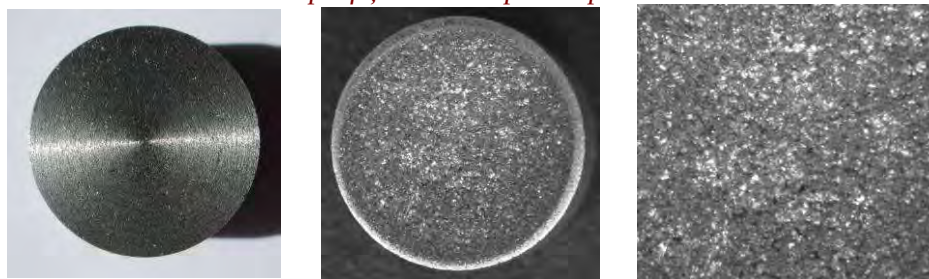


Fig. 5.121 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 30 minute

5.3.8 Cercetările pe materialul OLC 35

Acest material OLC35 (șarjă 1) a fost supus la cavitație prin metoda indirectă. Compoziția chimică a acestui oțel este descrisă în tabelul 5.92.

Compoziția chimică pentru oțelul OLC35 [%]

Tabel 5.92

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Fe
0,39	0,28	0,73	0,008	0,008	0,05	0,03	0,06	0,01	98,37

Pe epruveta din acest material, sub formă de cub cu latura de 16 mm s-a ales suprafața 1 și suprafața 3. S-au făcut 2 variante de încercări și anume: prima variantă de încercare a fost pentru o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv pe 23 perioade de 15 minute, iar a doua variantă de încercare a fost pe o perioadă de 15 și 30 minute, respectiv pe 7 perioade de 45 minute.

Pentru acest material din categoria oțelurilor, încercările au fost efectuate pentru o durată totală de 360 minute, perioadele de timp pentru a doua variantă (45 minute) fiind de 3 ori mai mari decât pentru prima variantă (15 minute).

Rezultatele acestor 2 tipuri de încercări sunt consemnate în tabelele 5.93 și 5.94, unde se poate urmări evoluția în timp a comportamentului la cavitație a acestui oțel.

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 1) pentru oțelul OLC35

Tabel 5.93

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	30801.71	0	0	0.0000	0.000	180	15	30789.21	2.56	12.5	0.1757	10.540
5	5	30801.49	0.22	0.22	0.0370	2.220	195	15	30786.5	2.71	15.21	0.1850	11.100
15	10	30801.26	0.23	0.45	0.0143	0.860	210	15	30783.66	2.84	18.05	0.2023	12.140
30	15	30801.24	0.02	0.47	0.0013	0.080	225	15	30780.43	3.23	21.28	0.2137	12.820
45	15	30801.22	0.02	0.49	0.0073	0.440	240	15	30777.25	3.18	24.46	0.2143	12.860
60	15	30801.02	0.2	0.69	0.0173	1.040	255	15	30774	3.25	27.71	0.2200	13.200
75	15	30800.7	0.32	1.01	0.0367	2.200	270	15	30770.65	3.35	31.06	0.2357	14.140
90	15	30799.92	0.78	1.79	0.0537	3.220	285	15	30766.93	3.72	34.78	0.2383	14.300
105	15	30799.09	0.83	2.62	0.0783	4.700	300	15	30763.5	3.43	38.21	0.2220	13.320
120	15	30797.57	1.52	4.14	0.1017	6.100	315	15	30760.27	3.23	41.44	0.2287	13.720
135	15	30796.04	1.53	5.67	0.1187	7.120	330	15	30756.64	3.63	45.07	0.2363	14.180
150	15	30794.01	2.03	7.7	0.1423	8.540	345	15	30753.18	3.46	48.53	0.2177	13.060
165	15	30791.77	2.24	9.94	0.1600	9.600	360	15	30750.11	3.07	51.6	0.1917	11.500

Valorile obținute pe perioadele de 15 minute (suprafața 3) pentru oțelul OLC35

Tabel 5.94

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	30750.77	0	0	0.0000	0.000	180	45	30734.35	8.83	16.42	0.2242	13.453
15	15	30749.83	0.94	0.94	0.0436	2.613	225	45	30723	11.35	27.77	0.2404	14.427
45	30	30749.67	0.16	1.1	0.0167	1.003	270	45	30712.71	10.29	38.06	0.2278	13.667
90	45	30748.15	1.52	2.62	0.0721	4.327	315	45	30702.5	10.21	48.27	0.2294	13.767
135	45	30743.18	4.97	7.59	0.1533	9.200	360	45	30692.06	10.44	58.71	0.2346	14.073

Din rezultatele obținute, se observă că suprafața 1 încercată la perioadele de 15 minute a pierdut 51,6 mg, în timp ce suprafața 3 încercată la perioadele de 45 minute a pierdut 58,71 mg.

În figurile 5.122÷5.127 se prezintă graficele pentru masa cumulată erodată funcție de timp, viteza de eroziune cavitațională și o comparație între acestea.

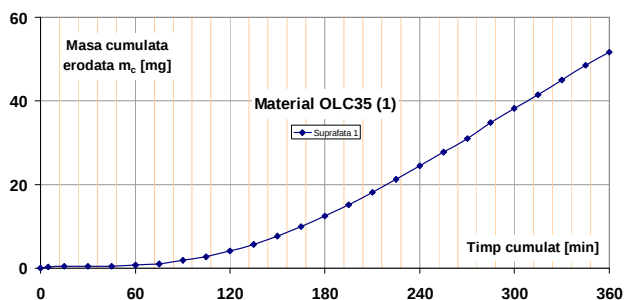


Fig. 5.122 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 15 minute)

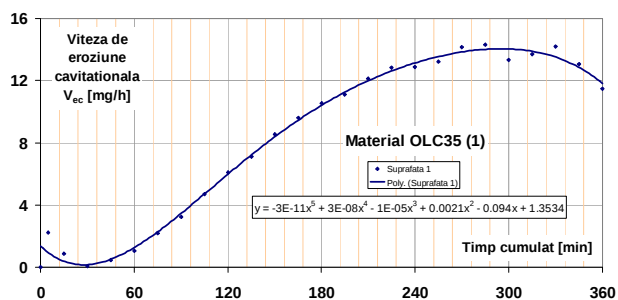


Fig. 5.123 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 15 minute)

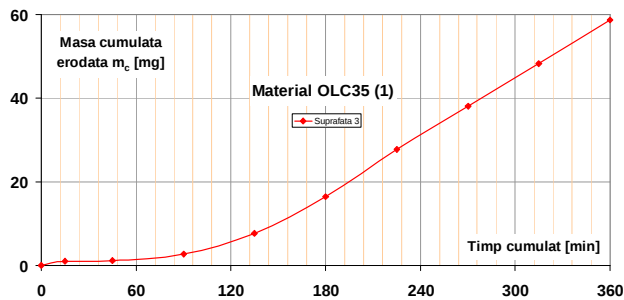


Fig. 5.124 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 45 minute)

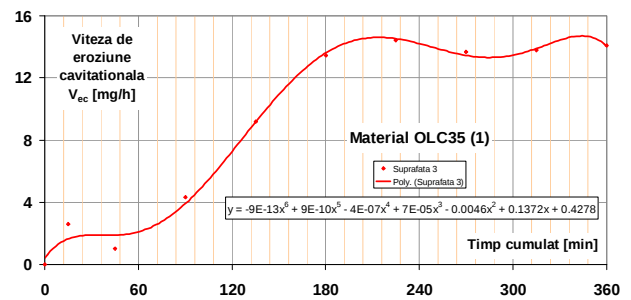


Fig. 5.125 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (perioadă de 45 minute)

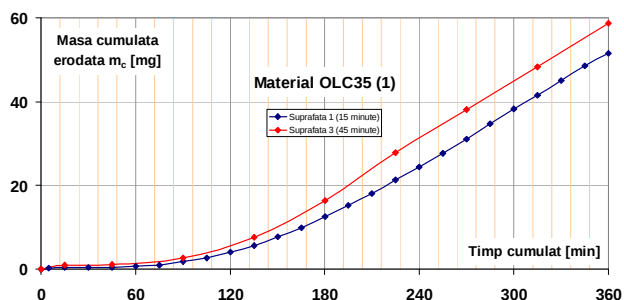


Fig. 5.126 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC35 (comparație)

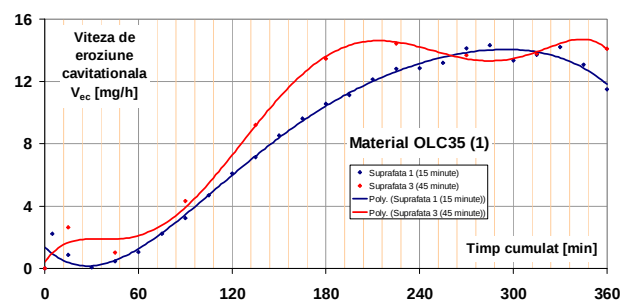


Fig. 5.127 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC35 (comparație)

Curbele din figurile 5.123 și 5.125 au fost interpolate polinomial, înregistrându-se următoarele abateri medii pătratice: în relațiile 5.22 (cu $R^2 = 0.9923$) pentru pierderea masică, respectiv 5.23 (cu $R^2 = 0.9934$) pentru curba vitezei de eroziune cavitațională.

$$v_{ec} = -3 \cdot 10^{-11} t^5 + 3 \cdot 10^{-8} t^4 - 1 \cdot 10^{-5} t^3 + 0,0021 t^2 - 0,094 t + 1,3534 \quad (5.22)$$

$$v_{ec} = -9 \cdot 10^{-13} t^6 + 9 \cdot 10^{-10} t^5 - 4 \cdot 10^{-7} t^4 + 7 \cdot 10^{-5} t^3 - 0,0046 t^2 + 0,1372 t + 0,4278 \quad (5.23)$$

Din figura 5.126, se observă că în proporție de peste 95 % cele 2 curbe se reproduc ca alură, unde cu culoarea albastră a fost reprezentată curba pentru perioadele de 15 minute, iar cu culoarea roșie a fost reprezentată curba pentru perioadele de 45 minute.

Din figura 5.127, se observă că cele 2 curbe sunt diferite în evoluția acestora. Astfel, curba reprezentativă pentru perioadele de 15 minute are o evoluție mai corectă și parcurge cele 4 stadii, iar curba reprezentativă pentru perioadele de 45 minute, prezintă o evoluție ciclică.

În figurile 5.128 și 5.129 se prezintă imaginile suprafețelor analizate înainte și după cavitație, cât și macrostructura acestora după timpul total de testare de 360 de minute.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

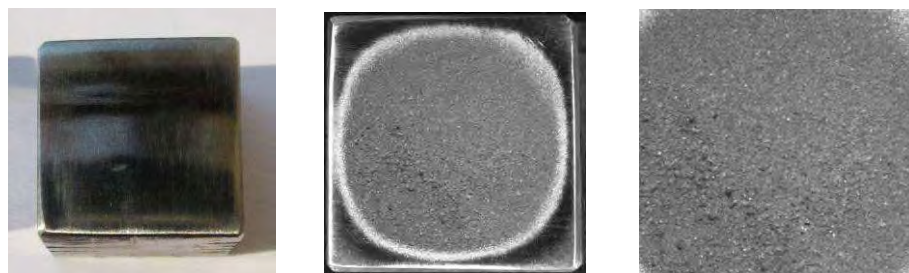


Fig. 5.128 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 15 minute



Fig. 5.129 Imagini ale epruvetei înainte de cavitație, după cavitație și macrostructura suprafeței erodate pentru perioade de 45 minute

5.3.9 Comparare rezultate obținute pentru curba vitezei de eroziune cavitațională

Pentru materialele cercetate anterior prin metoda indirectă de cavitație s-a urmărit obținerea curbei vitezei eroziunii cavitaționale pentru cele 4 stadii de evoluție în condițiile unor perioade de timp diferite. În **tabelul 5.95** se prezintă comparativ timpul total cumulat, masa inițială, masa finală și pierderea cumulată totală.

Comparație materialelor analizate

Tabel 5.95

Nr. crt.	Materialul	Timp total cumulat [min]	Masa inițială [mg]	Masa finală [mg]	Pierderea cumulată [mg]
1	YSn83	150	31230.37	30592.87	637.5
2	EN-GJS-400-15	180	28314.86	28298.61	16.25
3	Fc (EN-GJL)	180	14138.23	14089.81	48.42
4	AlSi12	210	10327.87	10153.31	174.56
5	CuSn12	225	34004.82	33977.19	27.63
6	CuSn10Pb5	270	36112.72	36050.14	62.58
7	Fgn (EN-GJS)	300	14384.34	14282.5	101.84
8	OLC 35	360	30801.71	30750.11	51.6

În **figura 5.130** se prezintă o comparație a acestor materiale funcție de masa pierdută, pentru un timp comun de 180 de minute, pe o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv pe 11 perioade de câte 15 minute. De asemenea, în figurile **5.131** și **5.132** se prezintă variația pierderii masice și variația vitezei de eroziune cavitațională. În aceste grafice nu vor fi incluse materialele YSn83 și AlSi12, deoarece acestea au pierdut foarte mult din masa inițială.

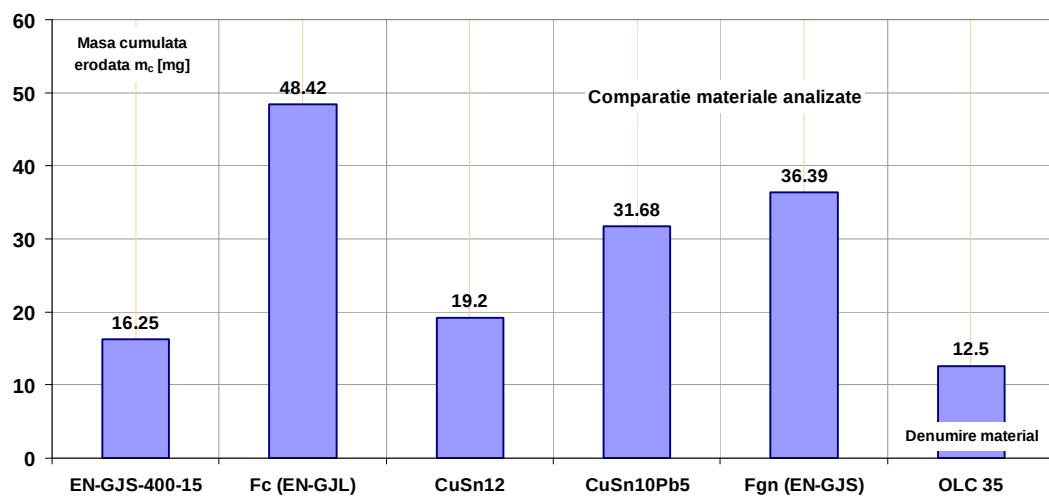


Fig. 5.130 Comparație materiale analizate la 180 de minute de atac cavitațional

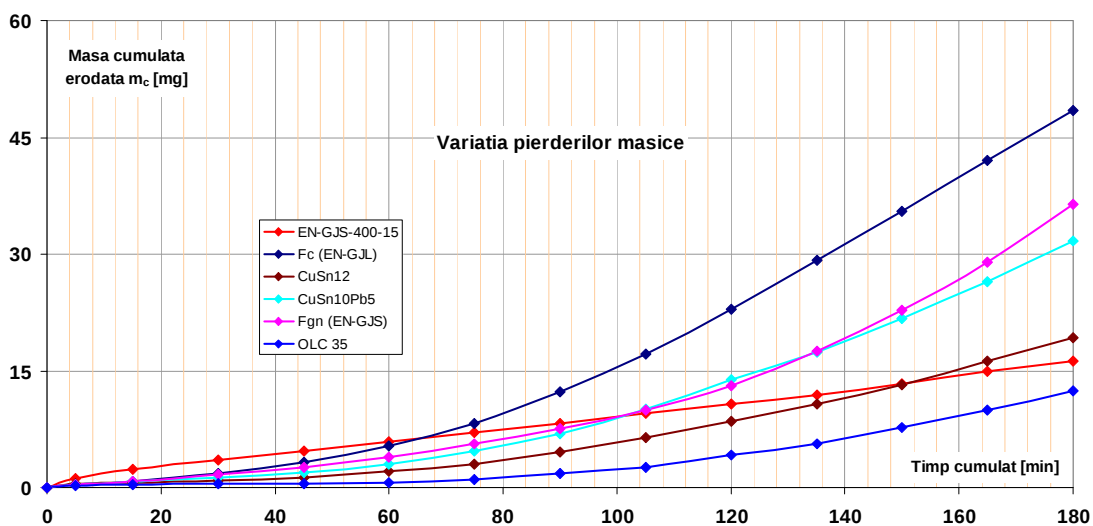


Fig. 5.131 Variația pierderii masice a materialelor analizate la 180 de minute

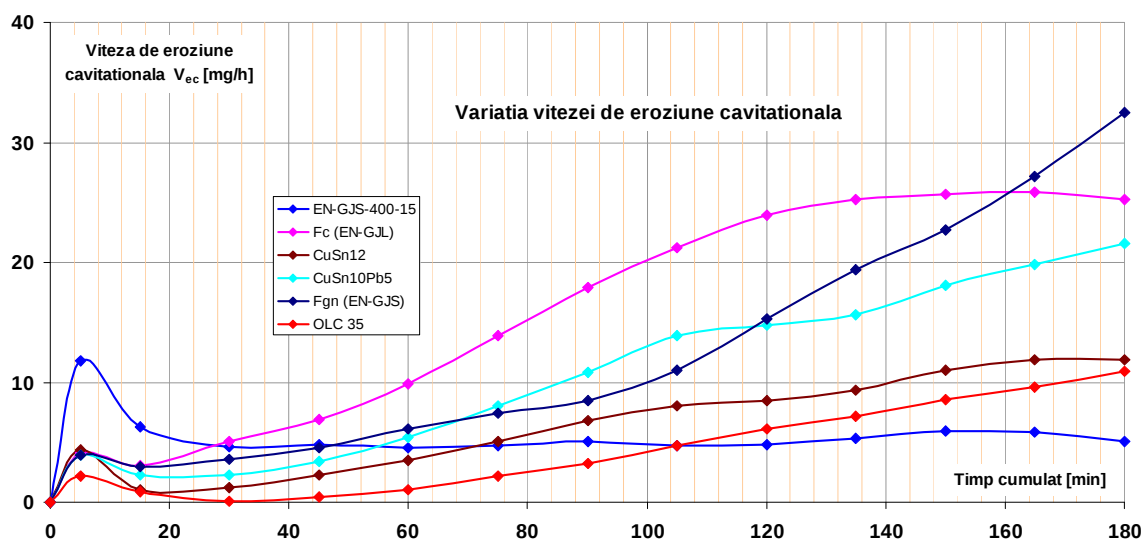


Fig. 5.132 Variația vitezei de eroziune cavitațională a materialelor analizate la 180 de minute

Din **figura 5.130** rezultă că oțelul OLC 35 a pierdut doar 12,5 mg, urmat de fonta cenușie specială cu grafit nodular EN-GJS-400-15, care a pierdut 16,25 mg și de bronzul CuSn12, care a pierdut 19,2 mg.

În ce privește fonta cu grafit lamelar Fc (EN-GJL), aceasta este mai slabă decât fonta cu grafit nodular Fgn (EN-GJS) așa cum se observă din **figura 5.130** și din literatura de specialitate [112].

Pentru curbele vitezei eroziunii cavitaționale din **figura 5.132**, s-au determinat relațiile de interpolare polinomiale corespunzătoare unei durate de 180 de minute.

$$v_{ec} = -4 \cdot 10^{-11} t^6 + 2 \cdot 10^{-8} t^5 - 4 \cdot 10^{-6} t^4 + 0,0004 t^3 - 0,016 t^2 + 0,224 t + 1,2518 \quad (5.24)$$

$$v_{ec} = -5 \cdot 10^{-11} t^6 + 3 \cdot 10^{-8} t^5 - 6 \cdot 10^{-6} t^4 + 0,0006 t^3 - 0,0241 t^2 + 0,4015 t + 0,861 \quad (5.25)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-12} t^6 + 2 \cdot 10^{-9} t^5 - 6 \cdot 10^{-7} t^4 + 0,0001 t^3 - 0,0069 t^2 + 0,2341 t + 1,1118 \quad (5.26)$$

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-11} t^6 + 1 \cdot 10^{-8} t^5 - 2 \cdot 10^{-6} t^4 + 0,0002 t^3 - 0,0102 t^2 + 0,1435 t + 0,6375 \quad (5.27)$$

Relațiile analitice 5.24, 5.25, 5.26, 5.27 aparțin curbelor experimentale a materialelor CuSn12 cu $R^2 = 0.9594$, CuSn10Pb5 cu $R^2 = 0.9926$, Fgn (EN-GJS) cu $R^2 = 0.9945$ și OLC 35 cu $R^2 = 0.9881$.

5.4 Cercetări privind rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate extinse ale atacului cavitațional

Pe materiale studiate anterior în &5.3, prin metoda indirectă de cavitație s-a urmărit stabilirea unei curbe a vitezei eroziunii cavitaționale pentru cele 4 stadii de evoluție și obținerea unor suprafețe vizibil erodate prin cavitație.

În acest subcapitol se vor efectua cercetări privind rezistența la eroziune cavitațională a acelorși oțeluri analizate în **subcapitolul 5.2** la un timp total de 180 minute, cuprinzând câte 4 încercări referitoare la reproducerea curbelor, urmărind extinderea duratelor de încercare la cel puțin 900 minute (15 ore) și de cel mult 1800 minute (30 ore). Cercetările au fost efectuate pe aceleași epruvete, suprafețele încercate fiind cele care au pierdut cel mai puțin din masa inițială.

Se vor prezenta grafice ale curbelor de pierdere masică și de viteză a eroziunii cavitaționale pentru timpul total cumulat și se vor face comparații între evoluția acestor curbe, pentru câte o perioadă de 5 și 10 minute, respectiv 11 perioade de 15 minute, preluate din **subcapitolul 5.3**, respectiv perioadele de 30, 45 și 60 minute de la caz la caz, toate acestea pentru un timp total de 180 de minute. De asemenea pentru fiecare material se prezintă imagini ale epruvetelor erodate vizibil

prin cavitație. Rezultatele detaliate ale încercărilor vor fi prezentate ulterior pe fiecare material în parte.

Rezultatele încercărilor sunt prezentate în **tabelul 5.96**, mai puțin oțelurile C35 și 41Cr4 care la primele tipuri de încercări (din **subcapitolul 5.2**) au prezentat fisuri vizibile.

Centralizatorul materialelor analizate

Tabel 5.96

Nr. crt.	Marca oțelului	Timp per perioadă [min]	Timp total cumulat [min]/[ore]	Masa inițială [mg]	Masa finală [mg]	Pierdere cumulată [mg]
1	OLC 45	45	900/15	14941.59	14825.44	116.15
2	26CrMo4			14829.8	14752.96	76.84
3	34CrNiMo6			15053.24	15017.9	35.34
4	X20Cr13	30	1080/18	15913.29	15816.59	96.7
5	X3CrNi13-4 (1)			31144.06	31045.75	98.31
6	X3CrNi13-4 (2)			15007.36	14928.3	79.06
7	X3CrNi13-4 (3)			15154.5	15103.6	50.9
8	X3CrNi13-4 (4)	60	1800/30	14759.45	14667.78	91.67
9	X5CrNi18-10			16308.17	16256.18	51.99

Din cercetările ulterioare pe toate aceste materiale centralizate în **tabelul 5.96** se vor reprezenta grafic curbele vitezelor de eroziune cavitațională, iar prin intermediul interpolărilor polinomiale se va putea observa că aceste curbe au parcurs cele 3 stadii de evoluție din cele 4 și anume stadiul de incubare, cel de accelerare și cel de staționare.

În **figurile 5.133÷5.135** se prezintă o comparație a acestor oțeluri funcție de masa pierdută pentru un timp comun de 900 de minute, variația pierderii masice precum și variația vitezei de eroziune cavitațională.

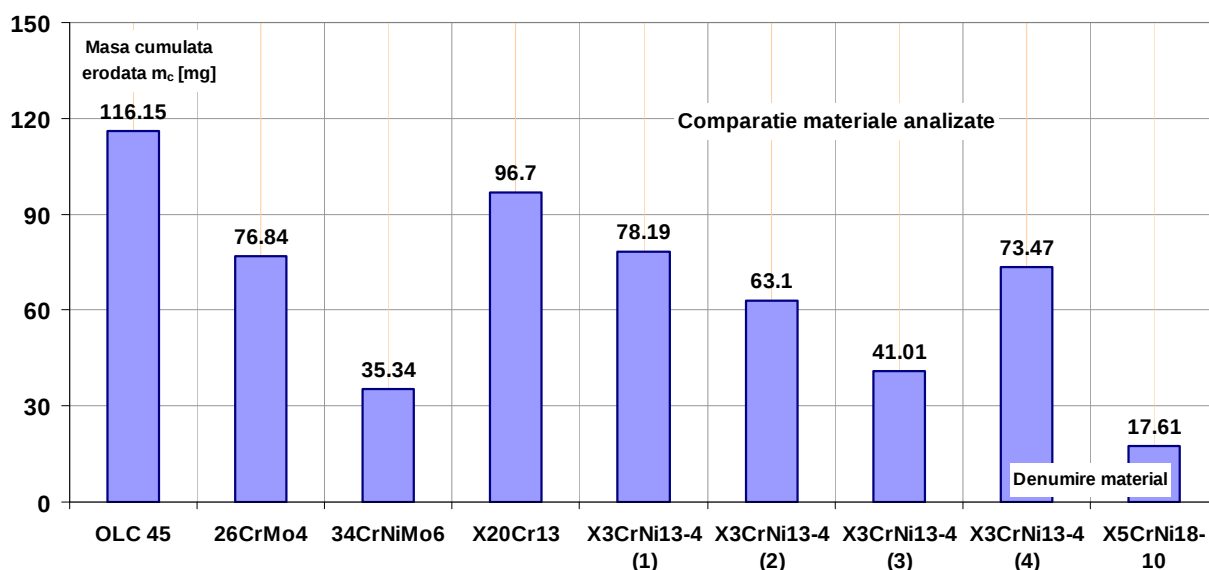


Fig. 5.133 Comparație materiale la 900 de minute de atac cavitațional

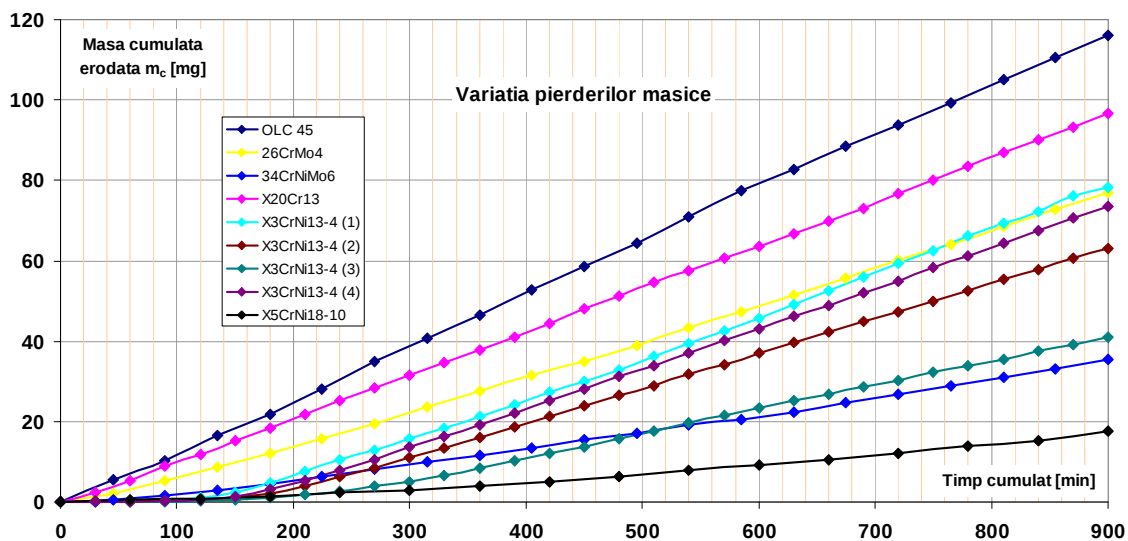


Fig. 5.134 Variația pierderii masice a materialelor analizate la 900 de minute

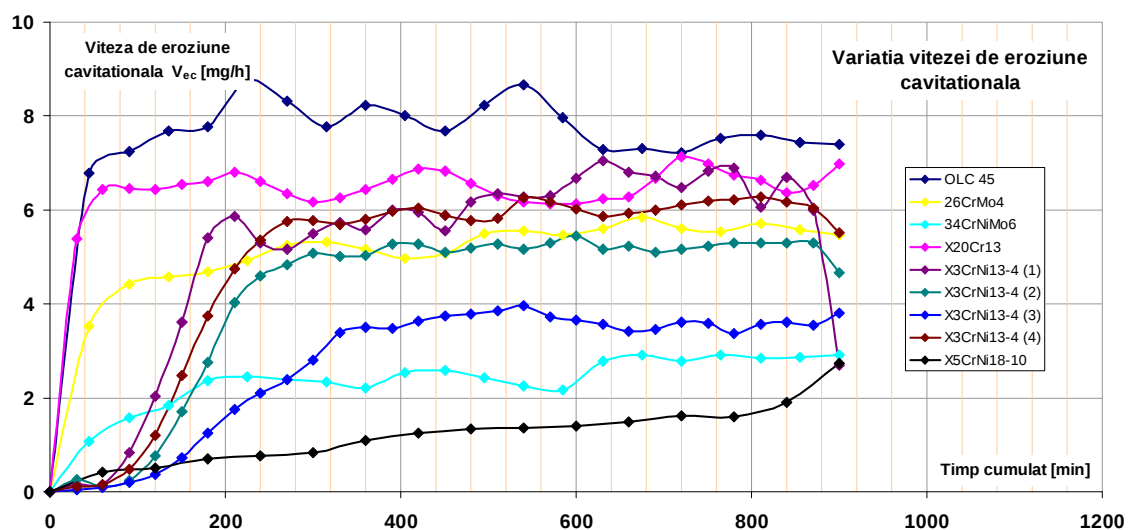


Fig. 5.135 Variația vitezei de eroziune cavitațională a materialelor analizate la 900 de minute

Din figura 5.133 se poate observa că oțelul inoxidabil X5CrNi18-10 prezintă o foarte bună rezistență împotriva eroziunii cavitaționale (17,61 mg pierdute), urmat de oțelul de îmbunătățire 34CrNiMo6 (35,34 mg pierdute) și de oțelul inoxidabil X3CrNi13-4 (3) care a pierdut 41,01 mg, pentru timpul total de 900 de minute.

Cele mai slabe oțeluri din comparația din figura 5.133, au fost oțelul OLC45 care a pierdut 116,15 mg, urmat de oțelurile inoxidabile X20Cr13 care a pierdut 96,7 mg și X3CrNi13-4 (1) care a pierdut 78,19 mg, fiecare material fiind cercetat pe perioade diferite de timp și anume perioade de câte 30, 45 sau 60 de minute.

Pentru curbele vitezei din figura 5.135, s-au determinat relațiile de interpolare polinomiale pentru durata de 900 minute.

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-10} t^4 + 2 \cdot 10^{-7} t^3 - 0,0002 t^2 + 0,0528 t - 1,3529 \quad (5.28)$$

$$v_{ec} = 9 \cdot 10^{-16} t^6 - 3 \cdot 10^{-12} t^5 + 3 \cdot 10^{-9} t^4 - 2 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,0005 t^2 - 0,0294 t + 0,263 \quad (5.29)$$

$$v_{ec} = 5 \cdot 10^{-9} t^3 - 2 \cdot 10^{-5} t^3 + 0,0162 t - 0,7394 \quad (5.30)$$

$$v_{ec} = 1 \cdot 10^{-15} t^6 - 3 \cdot 10^{-12} t^5 + 4 \cdot 10^{-9} t^4 - 2 \cdot 10^{-6} t^3 + 0,0006 t^2 - 0,0276 t + 0,1428 \quad (5.31)$$

$$v_{ec} = 9 \cdot 10^{-9} t^3 - 1 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0059 t - 0,0077 \quad (5.32)$$

Relațiile analitice 5.28, 5.29, 5.30, 5.31 și 5.32 aparțin curbelor experimentale a materialelor X3CrNi13-4 (1) cu $R^2 = 0.9003$, X3CrNi13-4 (2) cu $R^2 = 0.9844$, X3CrNi13-4 (3) cu $R^2 = 0.9445$, X3CrNi13-4 (4) cu $R^2 = 0.9881$ și X5CrNi18-10 cu $R^2 = 0.9587$.

5.4.1 Cercetări pentru durate extinse pe materialul OLC45

Acest oțel a fost testat la cavitație, însă pe 20 de perioade a câte 45 minute. Suprafața de testare a fost suprafața 1 a epruvetei 2 prezentată în **subcapitolul 5.2**, suprafață care a pierdut cel mai puțin din masa inițială pentru timpul total de 180 de minute. Rezultate aferente cercetării oțelului OLC45 pentru această suprafață sunt evidențiate în **tabelul 5.97**, pe durata a 900 minute.

Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 1 față 2) pe oțelul OLC45

Tabel 5.97

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14941.59	0	0	0.0000	0.000	495	45	14877.15	5.99	64.44	0.1371	8.227
45	45	14936.01	5.58	5.58	0.1130	6.780	540	45	14870.8	6.35	70.79	0.1444	8.667
90	45	14931.42	4.59	10.17	0.1208	7.247	585	45	14864.15	6.65	77.44	0.1328	7.967
135	45	14925.14	6.28	16.45	0.1280	7.680	630	45	14858.85	5.3	82.74	0.1214	7.287
180	45	14919.9	5.24	21.69	0.1296	7.773	675	45	14853.22	5.63	88.37	0.1218	7.307
225	45	14913.48	6.42	28.11	0.1458	8.747	720	45	14847.89	5.33	93.7	0.1202	7.213
270	45	14906.78	6.7	34.81	0.1384	8.307	765	45	14842.4	5.49	99.19	0.1254	7.527
315	45	14901.02	5.76	40.57	0.1293	7.760	810	45	14836.6	5.8	104.99	0.1267	7.600
360	45	14895.14	5.88	46.45	0.1371	8.227	855	45	14831	5.6	110.59	0.1240	7.440
405	45	14888.68	6.46	52.91	0.1333	8.000	900	45	14825.44	5.56	116.15	0.1231	7.387
450	45	14883.14	5.54	58.45	0.1281	7.687	-	-	-	-	-	-	-

Conform **tabelului 5.97**, pierderea totală de material erodat este de 116.15 mg. În continuare se prezintă graficele obținute pentru pierderea masică și pentru viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și compararea curbelor pentru 180 de minute pe 4 perioade de 45 minute și cele preluate din **subcapitolul 5.2**.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

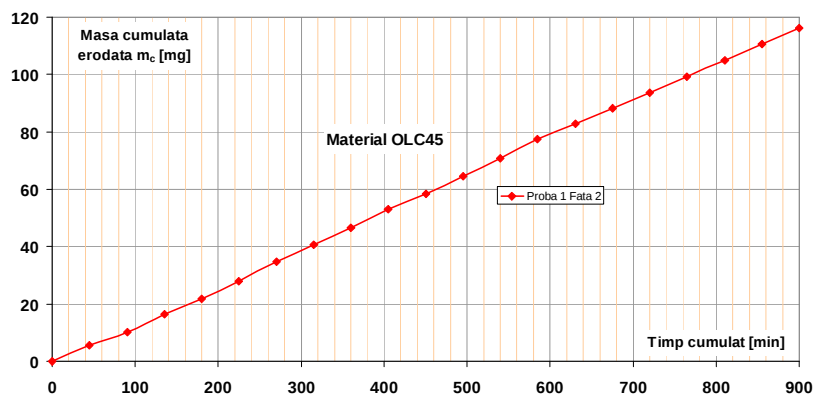


Fig. 5.136 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 la 900 minute

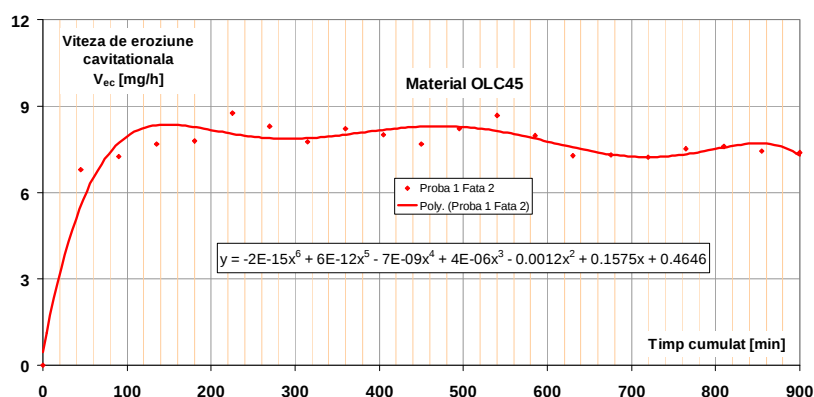


Fig. 5.137 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 la 900 minute (curba analitică și experimentală)

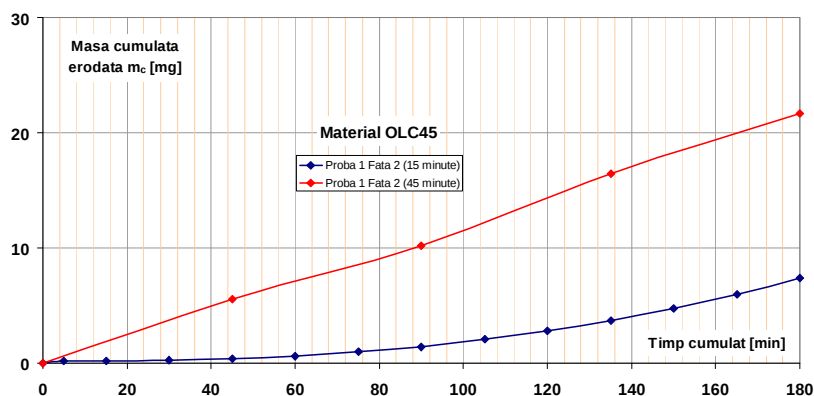


Fig. 5.138 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul OLC45 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

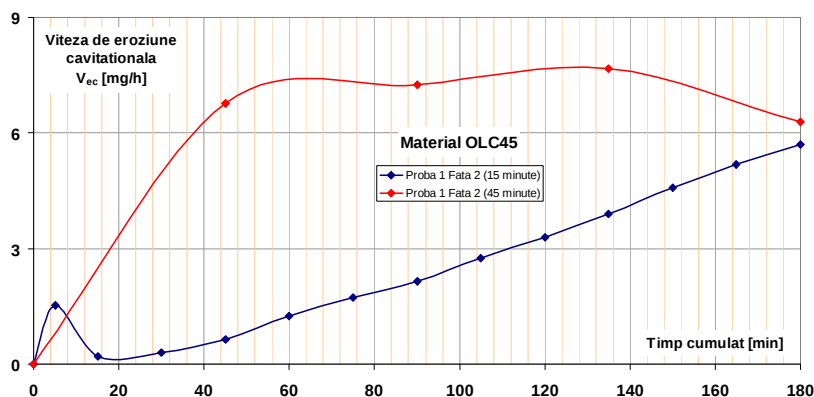


Fig. 5.139 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul OLC45 (comparație curbe experimentale)

Pentru reprezentarea cât mai corectă a curbei vitezei de eroziune cavitațională din **figura 5.137** s-a obținut interpolarea polinomială dată de **relația 5.33** (cu $R^2 = 0.9305$):

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-15} t^6 + 6 \cdot 10^{-12} t^5 - 7 \cdot 10^{-9} t^4 + 4 \cdot 10^{-6} t^3 - 0,0012 t^2 + 0,1575 t + 0,4646 \quad (5.33)$$

Din **figurile 5.138** și **5.139** se observă diferențele care există la schimbarea perioadelor de lucru: 45 minute respectiv 15 minute, corespunzătoare duratei totale de 180 minute.

În **figura 5.140** sunt prezentate imagini ale suprafeței erodate cât și macrostructura după un timp total de 900 de minute.

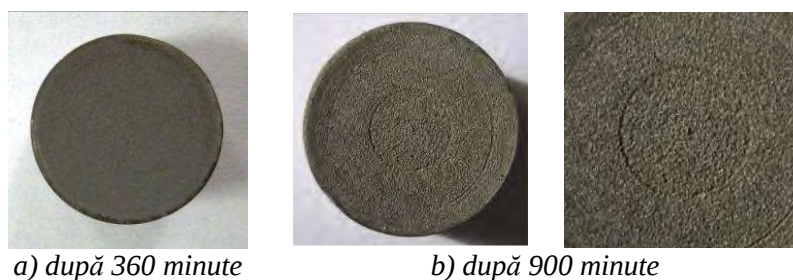


Fig. 5.140 Imagini ale epruvetei erodate din oțelul OLC45

5.4.2 Cercetări pentru durate extinse pe materialul 26CrMo4

Acest oțel a fost testat la cavitație pe perioade de câte 45 minute. Suprafața de testare a fost suprafața 1 a epruvetei a doua. Rezultate aferente cercetări oțelului 26CrMo4 pentru această suprafață sunt evidențiate în **tabelul 5.98**, unde pierderea totală de material este de 76,84 mg. Se prezintă de asemenea, graficele întocmite pentru pierderea masică de material funcție de timp și viteza de eroziune cavitațională, precum și compararea curbelor dintre cele 2 tipuri de încercări.

Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 1 față 2) pe oțelul 26CrMo4 **Tabel 5.98**

Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu- lat						per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14829.8	0	0	0.0000	0.000	495	45	14790.81	4.03	38.99	0.0916	5.493
45	45	14827.69	2.11	2.11	0.0588	3.527	540	45	14786.6	4.21	43.2	0.0927	5.560
90	45	14824.51	3.18	5.29	0.0738	4.427	585	45	14782.47	4.13	47.33	0.0913	5.480
135	45	14821.05	3.46	8.75	0.0762	4.573	630	45	14778.38	4.09	51.42	0.0934	5.607
180	45	14817.65	3.4	12.15	0.0779	4.673	675	45	14774.06	4.32	55.74	0.0973	5.840
225	45	14814.04	3.61	15.76	0.0820	4.920	720	45	14769.62	4.44	60.18	0.0932	5.593
270	45	14810.27	3.77	19.53	0.0877	5.260	765	45	14765.67	3.95	64.13	0.0921	5.527
315	45	14806.15	4.12	23.65	0.0888	5.327	810	45	14761.33	4.34	68.47	0.0952	5.713
360	45	14802.28	3.87	27.52	0.0860	5.160	855	45	14757.1	4.23	72.7	0.0930	5.580
405	45	14798.41	3.87	31.39	0.0827	4.960	900	45	14752.96	4.14	76.84	0.0910	5.460
450	45	14794.84	3.57	34.96	0.0844	5.067	-	-	-	-	-	-	-

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

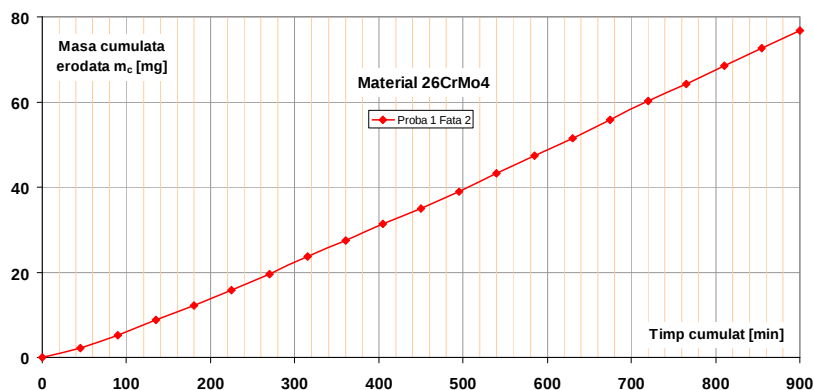


Fig. 5.141 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 la 900 minute

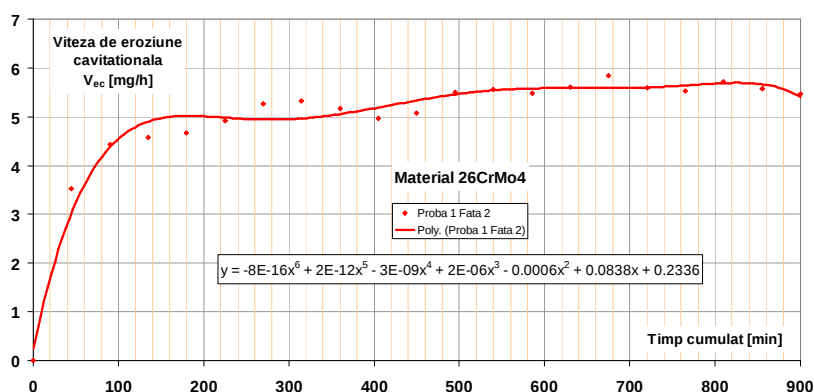


Fig. 5.142 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 la 900 minute (curba analitică și experimentală)

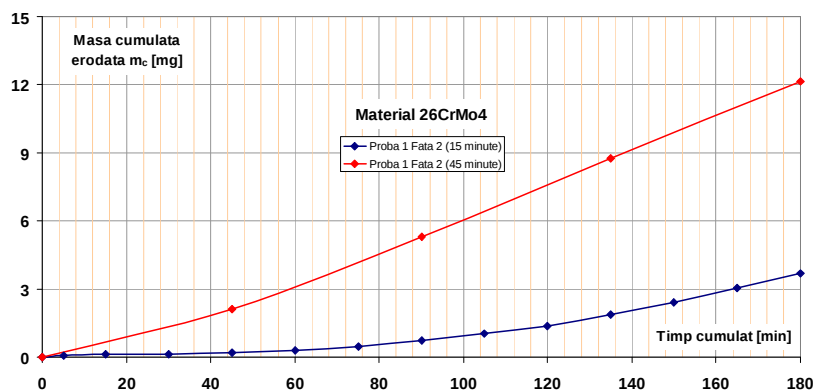


Fig. 5.143 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

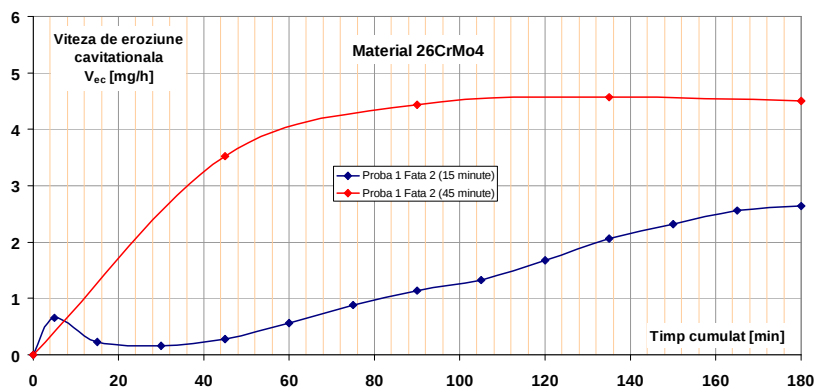


Fig. 5.144 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 26CrMo4 (comparație curbe experimentale)

Curba din figura 5.142 a fost interpolată polinomial de rezultând relația 5.34 (cu $R^2 = 0.9681$):

$$v_{ec} = -8 \cdot 10^{-16} t^6 + 2 \cdot 10^{-12} t^5 - 3 \cdot 10^{-9} t^4 + 2 \cdot 10^{-6} t^3 - 0,0006 t^2 + 0,0838 t + 0,2336 \quad (5.34)$$

Din figurile 5.143 și 5.144 se observă diferențele care există atunci când se schimbă perioadele lucru, de la 15 minute la 45 minute. În figura 5.145 sunt prezentate imagini ale suprafeței erodate și o macrostructură după un timp total de atac de 900 de minute.



a) după 405 minute

b) după 900 minute

Fig. 5.145 Imagini ale epruvetei erodate din oțelul 26CrMo4

5.4.3 Cercetări pentru durate extinse pe materialul 34CrNiMo6

Acest oțel a fost testat la cavitație pe 20 de perioade a câte 45 minute. Suprafața de testare a fost suprafața 2 a epruvetei a doua. Rezultate obținute sunt evidențiate în tabelul 5.99.

Rezultatele obținute pentru perioade de 45 minute (proba 2 față 2)
pe oțelul 34CrNiMo6

Tabel 5.99

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15053.24	0	0	0.0000	0.000	495	45	15036.08	1.77	17.16	0.0406	2.433
45	45	15052.77	0.47	0.47	0.0180	1.080	540	45	15034.2	1.88	19.04	0.0377	2.260
90	45	15051.62	1.15	1.62	0.0263	1.580	585	45	15032.69	1.51	20.55	0.0362	2.173
135	45	15050.4	1.22	2.84	0.0308	1.847	630	45	15030.94	1.75	22.3	0.0464	2.787
180	45	15048.85	1.55	4.39	0.0396	2.373	675	45	15028.51	2.43	24.73	0.0484	2.907
225	45	15046.84	2.01	6.4	0.0409	2.453	720	45	15026.58	1.93	26.66	0.0464	2.787
270	45	15045.17	1.67	8.07	0.0397	2.380	765	45	15024.33	2.25	28.91	0.0487	2.920
315	45	15043.27	1.9	9.97	0.0391	2.347	810	45	15022.2	2.13	31.04	0.0473	2.840
360	45	15041.65	1.62	11.59	0.0368	2.207	855	45	15020.07	2.13	33.17	0.0478	2.867
405	45	15039.96	1.69	13.28	0.0422	2.533	900	45	15017.9	2.17	35.34	0.0487	2.920
450	45	15037.85	2.11	15.39	0.0431	2.587	-	-	-	-	-	-	-

Pierdere totală de material erodat este de numai 35.34 mg. În figurile 5.146÷149 se prezintă graficele întocmite pentru pierdere masică și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și compararea acestora la timpul de 180 de minute pe cele 2 tipuri de încercări.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

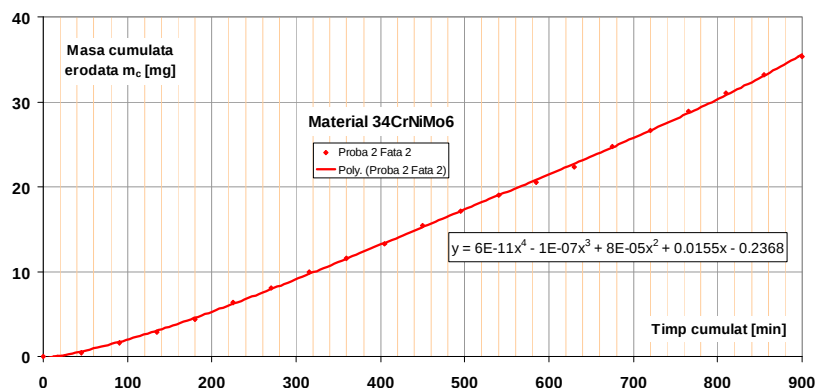


Fig. 5.146 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 la 900 minute (curba analitică și experimentală)

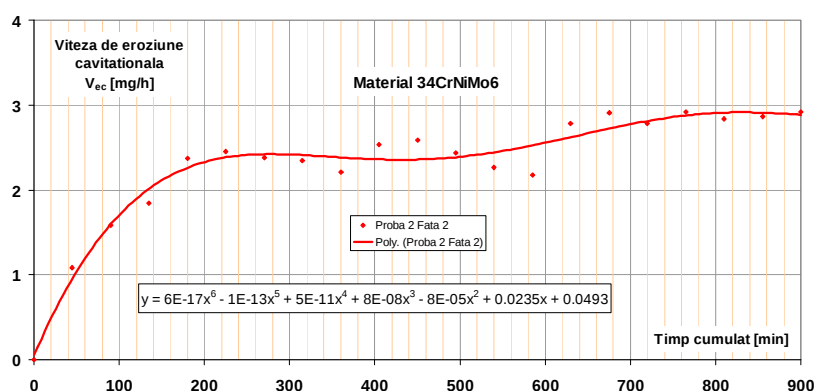


Fig. 5.147 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 la 900 minute (curba analitică și experimentală)

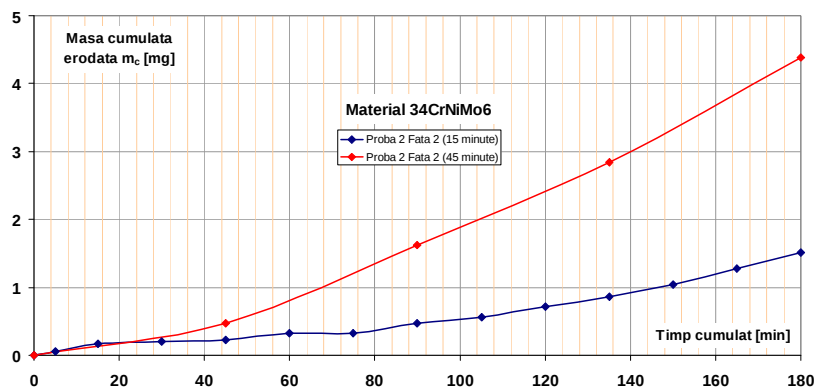


Fig. 5.148 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

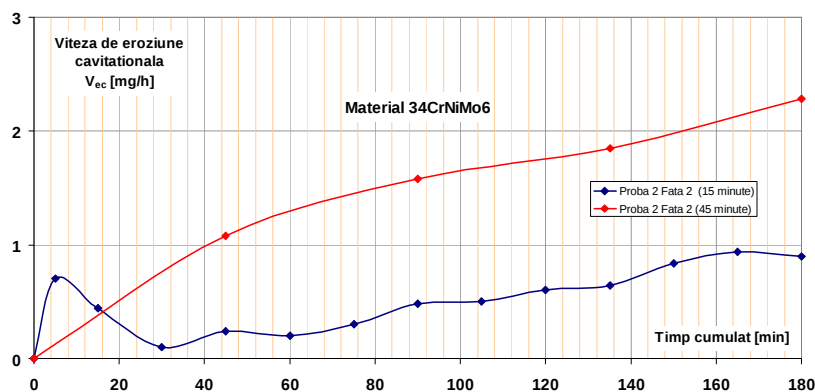


Fig. 5.149 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul 34CrNiMo6 (comparație curbe experimentale)

Curbele din figura 5.146 respectiv 5.147 au fost interpolate polinomial de rezultând abaterea medie pătratică fiind: relația 5.35 (cu $R^2 = 0.9997$) respectiv 5.36 (cu $R^2 = 0.9585$):

$$M = 6 \cdot 10^{-11} t^4 - 1 \cdot 10^{-7} t^3 + 8 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0155t - 0,2368 \quad (5.35)$$

$$v_{ec} = 6 \cdot 10^{-17} t^6 - 1 \cdot 10^{-13} t^5 + 5 \cdot 10^{-11} t^4 + 8 \cdot 10^{-8} t^3 - 8 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0235t + 0,0493 \quad (5.36)$$

Din figurile 5.148 și 5.149 se observă mici diferențe în compararea curbelor obținute pentru perioade de 45 minute și perioade de 15 minute. În figura 5.150 sunt prezentate imagini ale suprafeței erodate și macrostructura după un timp total de 900 de minute.



a) după 360 minute



b) după 900 minute



Fig. 5.150 Imagini ale
epruvetei erodate din
oțelul 34CrNiMo6

5.4.4 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X20Cr13

Acest oțel a fost testat la cavitație, însă pe perioade de câte 30 minute pentru 900 minute (15 ore). Suprafața de testare a fost suprafața 2 a epruvetei 2. Rezultate sunt evidențiate în tabelul 5.100, iar graficele aferente sunt prezentate în figurile 5.151÷154.

Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proba 2 fața 2) pe oțelul X20Cr13

Tabel 5.100

Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu- lat						per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15913.29	0	0	0.0000	0.000	480	30	15862.05	3.31	51.24	0.1093	6.560
30	30	15910.92	2.37	2.37	0.0897	5.380	510	30	15858.8	3.25	54.49	0.1052	6.310
60	30	15907.91	3.01	5.38	0.1072	6.430	540	30	15855.74	3.06	57.55	0.1027	6.160
90	30	15904.49	3.42	8.8	0.1075	6.450	570	30	15852.64	3.1	60.65	0.1020	6.120
120	30	15901.46	3.03	11.83	0.1073	6.440	600	30	15849.62	3.02	63.67	0.1022	6.130
150	30	15898.05	3.41	15.24	0.1090	6.540	630	30	15846.51	3.11	66.78	0.1040	6.240
180	30	15894.92	3.13	18.37	0.1100	6.600	660	30	15843.38	3.13	69.91	0.1047	6.280
210	30	15891.45	3.47	21.84	0.1133	6.800	690	30	15840.23	3.15	73.06	0.1112	6.670
240	30	15888.12	3.33	25.17	0.1100	6.600	720	30	15836.71	3.52	76.58	0.1190	7.140
270	30	15884.85	3.27	28.44	0.1057	6.340	750	30	15833.09	3.62	80.2	0.1162	6.970
300	30	15881.78	3.07	31.51	0.1030	6.180	780	30	15829.74	3.35	83.55	0.1125	6.750
330	30	15878.67	3.11	34.62	0.1042	6.250	810	30	15826.34	3.4	86.95	0.1103	6.620
360	30	15875.53	3.14	37.76	0.1072	6.430	840	30	15823.12	3.22	90.17	0.1062	6.370
390	30	15872.24	3.29	41.05	0.1108	6.650	870	30	15819.97	3.15	93.32	0.1088	6.530
420	30	15868.88	3.36	44.41	0.1147	6.880	900	30	15816.59	3.38	96.7	0.1165	6.990
450	30	15865.36	3.52	47.93	0.1138	6.830	-	-	-	-	-	-	-

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

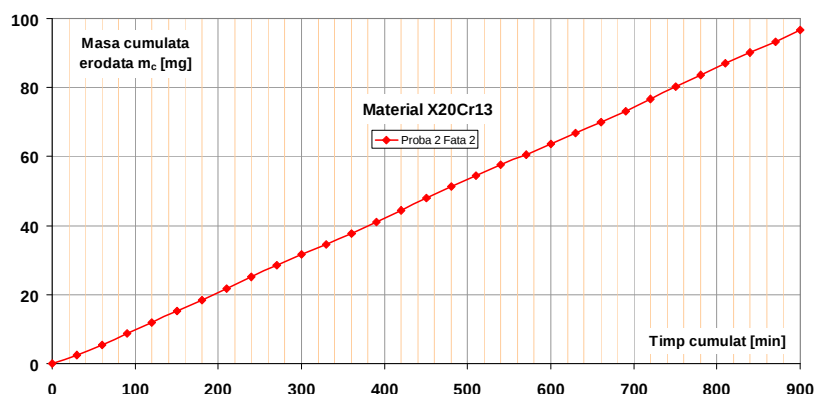


Fig. 5.151 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 la 900 minute

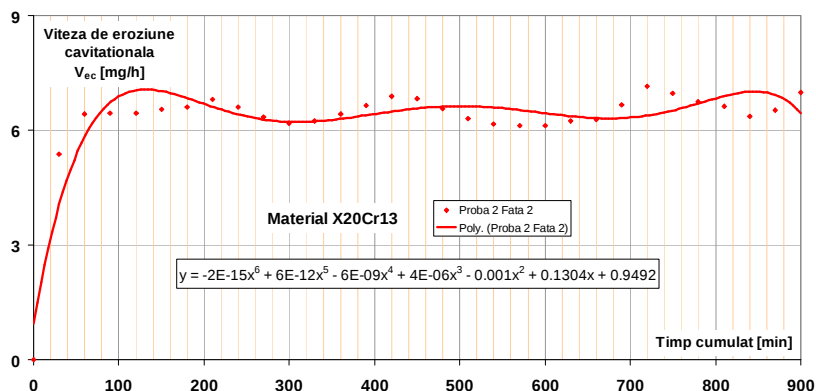


Fig. 5.152 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 la 900 minute (curba analitică și experimentală)

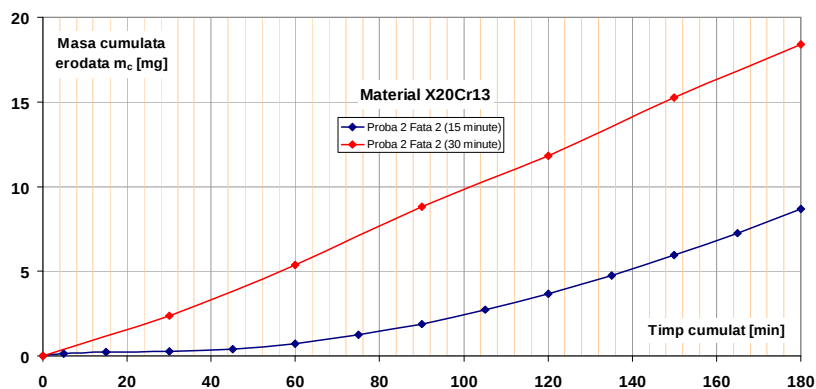


Fig. 5.153 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

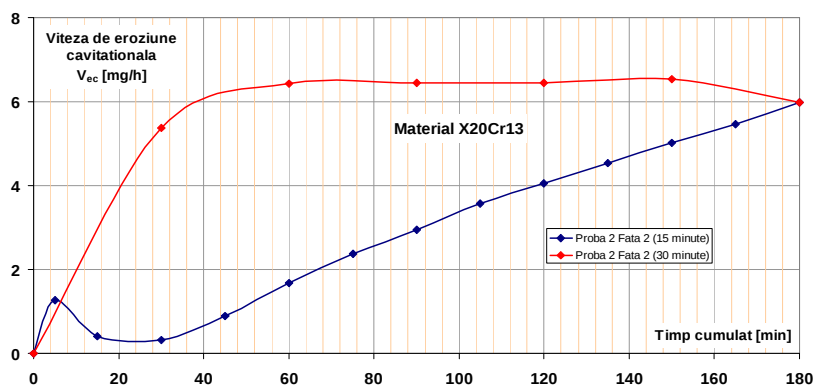


Fig. 5.154 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X20Cr13 (comparație curbe experimentale)

Pierdere totală de material erodat pentru acest oțel inoxidabil martensitic este de 96,7 mg pentru durată atacului cavitațional de 900 de minute.

Din **figurile 5.153 și 5.154** se observă diferențe în compararea curbelor obținute pentru perioade de 30 minute și pentru perioade de 15 minute.

Curba din **figura 5. 152** a fost interpolată polinomial de rezultând **relația 5.37** (cu $R^2 = 0.9997$).

$$v_{ec} = -2 \cdot 10^{-15} t^6 + 6 \cdot 10^{-12} t^5 - 6 \cdot 10^{-9} t^4 + 4 \cdot 10^{-6} t^3 - 0,001 t^2 + 0,1304 t + 0,9492 \quad (5.37)$$

În **figura 5.155** sunt prezentate imagini ale suprafeței erodate și macrostructura după un timp total de 900 de minute.



a) după 600 minute

b) după 900 minute

Fig. 5.155 Imagini ale epruvetei erodate din oțelul X20Cr13

5.4.5 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 1

Oțelul marca X3CrNi13-4 este reprezentat în această cercetare prin 4 epruvete cu compoziții chimice ușor diferite. Pentru acest material folosit la fabricația paletelor de turbine hidraulice s-a realizat o cercetare mai complexă, în sensul că epruvetele din cele 4 șarje au fost prelucrate, anterior atacului cavitațional, pentru analiza structurii metalografice referitoare la forma constituenților structurali și posibila existență în structură a unor carburi.

Se prezintă astfel în **figura 5.156** imagini ale acestor epruvete șlefuite și lustruite pregătite pentru metalografie, imagini ale acestora atacate cu reactiv chimic pentru un timp de 2 minute pe reprize de 20 de secunde, precum și imagini ale acestor epruvete înainte de testul de cavitație de 18 ore pentru fiecare șarjă din acest oțel inoxidabil.

Pentru materialului X3CrNi13-4 (1), suprafața testată fost suprafața 3, adică suprafața care la primul tip de încercări a pierdut cel mai puțin din masa inițială, încercări descrise în **& 5.2**. Rezultatele obținute în cazul acestei prime șarje a oțelului X3CrNi13-4, pentru un timp total cumulat de 1080 de minute, divizat în 36 de perioade a câte 30 de minute fiecare, sunt evidențiate numeric în **tabelul 5.101** și sub formă de grafice în **figurile 5.157÷5.160**.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

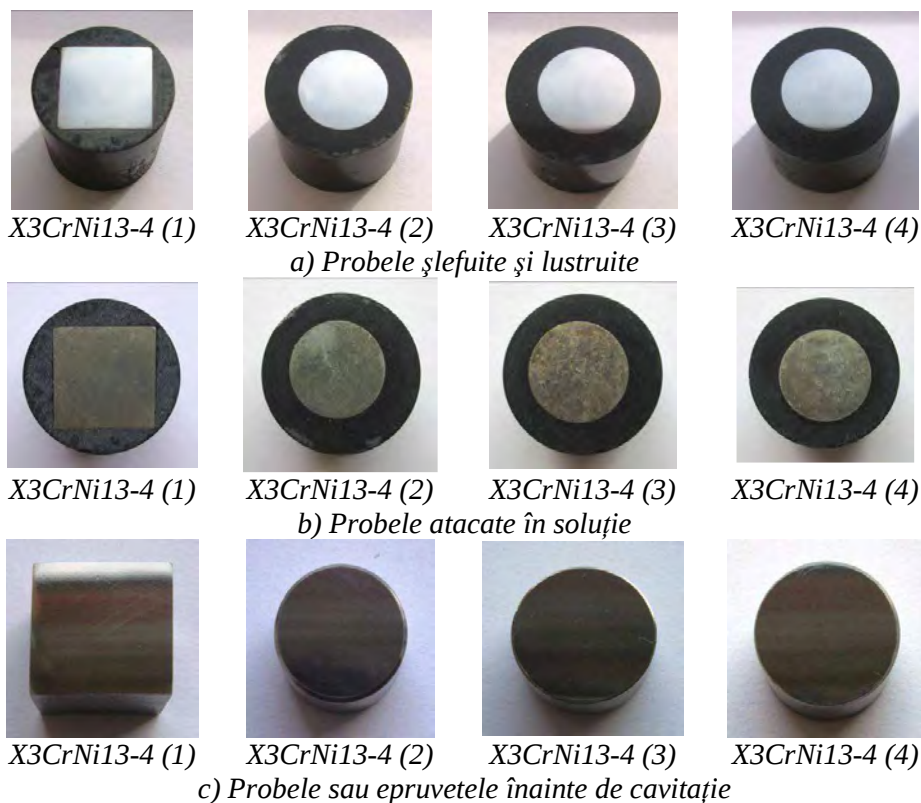


Fig. 5.156 Imagini ale epruvetelor din oțelul inoxidabil X3CrNi13-4

Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (suprafața 3) pe oțelul X3CrNi13-4(1) Tabel 5.101

Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumu- lat						per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	V _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	31144.06	0	0	0.0000	0.000	570	30	31101.58	3.22	42.48	0.1050	6.300
30	30	31143.96	0.1	0.1	0.0027	0.160	600	30	31098.5	3.08	45.56	0.1113	6.680
60	30	31143.9	0.06	0.16	0.0027	0.160	630	30	31094.9	3.6	49.16	0.1173	7.040
90	30	31143.8	0.1	0.26	0.0140	0.840	660	30	31091.46	3.44	52.6	0.1133	6.800
120	30	31143.06	0.74	1	0.0340	2.040	690	30	31088.1	3.36	55.96	0.1120	6.720
150	30	31141.76	1.3	2.3	0.0602	3.610	720	30	31084.74	3.36	59.32	0.1078	6.470
180	30	31139.45	2.31	4.61	0.0900	5.400	750	30	31081.63	3.11	62.43	0.1137	6.820
210	30	31136.36	3.09	7.7	0.0977	5.860	780	30	31077.92	3.71	66.14	0.1148	6.890
240	30	31133.59	2.77	10.47	0.0882	5.290	810	30	31074.74	3.18	69.32	0.1010	6.060
270	30	31131.07	2.52	12.99	0.0860	5.160	840	30	31071.86	2.88	72.2	0.1117	6.700
300	30	31128.43	2.64	15.63	0.0917	5.500	870	30	31068.04	3.82	76.02	0.0998	5.990
330	30	31125.57	2.86	18.49	0.0957	5.740	900	30	31065.87	2.17	78.19	0.0927	5.560
360	30	31122.69	2.88	21.37	0.0930	5.580	930	30	31062.48	3.39	81.58	0.1140	6.840
390	30	31119.99	2.7	24.07	0.1000	6.000	960	30	31059.03	3.45	85.03	0.1147	6.880
420	30	31116.69	3.3	27.37	0.0992	5.950	990	30	31055.6	3.43	88.46	0.1080	6.480
450	30	31114.04	2.65	30.02	0.0925	5.550	1020	30	31052.55	3.05	91.51	0.1043	6.260
480	30	31111.14	2.9	32.92	0.1030	6.180	1050	30	31049.34	3.21	94.72	0.1133	6.800
510	30	31107.86	3.28	36.2	0.1057	6.340	1080	30	31045.75	3.59	98.31	0.1260	7.560
540	30	31104.8	3.06	39.26	0.1047	6.280	-	-	-	-	-	-	-

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

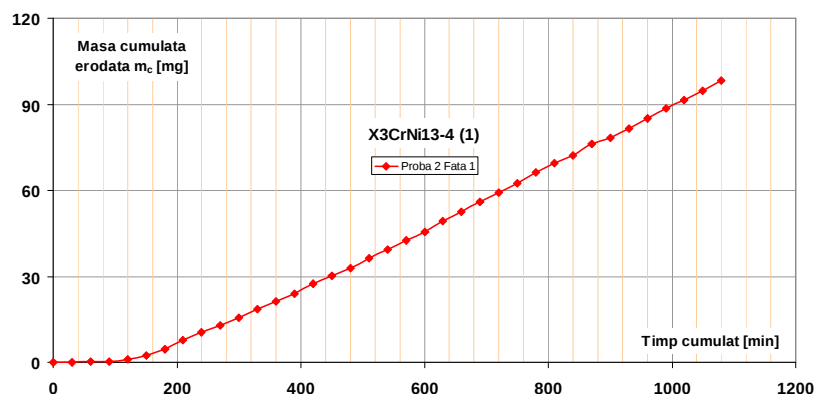


Fig. 5.157 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) la 1080 minute

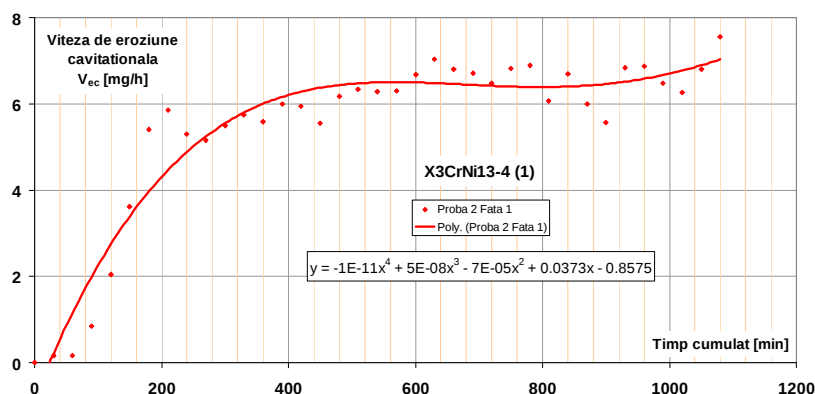


Fig. 5.158 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)

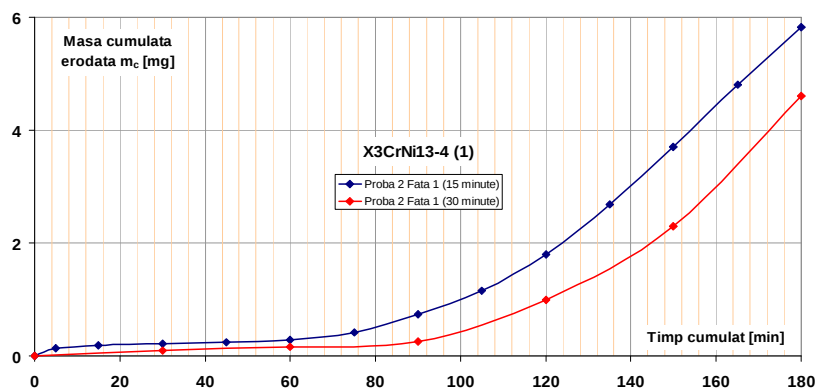


Fig. 5.159 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

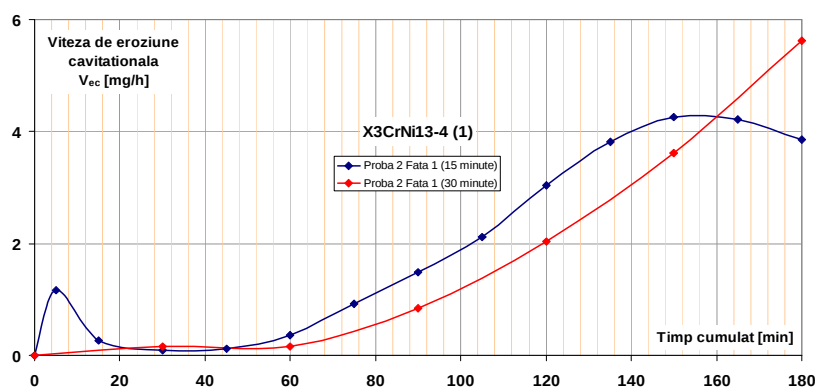


Fig. 5.160 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(1) (comparație curbe experimentale)

Din rezultatele obținute se observă că pierderea totală de material erodat este de 98,31 mg. Curba din **figura 5.158** a fost interpolată polinomial de rezultând **relația 5.38** (cu $R^2 = 0.922$).

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-11} t^4 + 5 \cdot 10^{-8} t^3 - 7 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0373t - 0,8575 \quad (5.38)$$

Din **figura 5.159** se poate observa că cele 2 tipuri de curbe se reproduc, iar curba roșie caracteristică perioadelor de 30 minute fiind sub curba albastră caracteristică perioadelor de 15 minute, ceea ce sugerează faptul că pentru perioadele de 30 de minute materialul s-a erodat mai greu deoarece suprafața acestuia a fost șlefuită și lustruită.

5.4.6 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 2

Suprafața testată a materialului X3CrNi13-4 șarja 2 a fost suprafața 2 a epruvetei 1. Rezultate acestui oțel sunt evidențiate în **tabelul 5.102**, iar în **figurile 5.161÷5.164** se prezintă graficele întocmite pentru pierderea masică și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, respectiv compararea acestora la durata de 180 de minute pe 6 perioade de 30 minute respectiv 1 x 5 minute + 1 x 10 minute + 11 x 15 minute.

Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proda 1 fața 2) pe oțelul X3CrNi13-4(2) Tabel 5.102

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15007.36	0	0	0.0000	0.000	570	30	14973.19	2.42	34.17	0.0883	5.300
30	30	15007.16	0.2	0.2	0.0043	0.260	600	30	14970.31	2.88	37.05	0.0907	5.440
60	30	15007.1	0.06	0.26	0.0020	0.120	630	30	14967.75	2.56	39.61	0.0860	5.160
90	30	15007.04	0.06	0.32	0.0042	0.250	660	30	14965.15	2.6	42.21	0.0873	5.240
120	30	15006.85	0.19	0.51	0.0128	0.770	690	30	14962.51	2.64	44.85	0.0848	5.090
150	30	15006.27	0.58	1.09	0.0285	1.710	720	30	14960.06	2.45	47.3	0.0860	5.160
180	30	15005.14	1.13	2.22	0.0458	2.750	750	30	14957.35	2.71	50.01	0.0870	5.220
210	30	15003.52	1.62	3.84	0.0672	4.030	780	30	14954.84	2.51	52.52	0.0883	5.300
240	30	15001.11	2.41	6.25	0.0767	4.600	810	30	14952.05	2.79	55.31	0.0882	5.290
270	30	14998.92	2.19	8.44	0.0807	4.840	840	30	14949.55	2.5	57.81	0.0883	5.300
300	30	14996.27	2.65	11.09	0.0847	5.080	870	30	14946.75	2.8	60.61	0.0882	5.290
330	30	14993.84	2.43	13.52	0.0835	5.010	900	30	14944.26	2.49	63.1	0.0828	4.970
360	30	14991.26	2.58	16.1	0.0838	5.030	930	30	14941.78	2.48	65.58	0.0892	5.350
390	30	14988.81	2.45	18.55	0.0880	5.280	960	30	14938.91	2.87	68.45	0.0877	5.260
420	30	14985.98	2.83	21.38	0.0880	5.280	990	30	14936.52	2.39	70.84	0.0895	5.370
450	30	14983.53	2.45	23.83	0.0850	5.100	1020	30	14933.54	2.98	73.82	0.0912	5.470
480	30	14980.88	2.65	26.48	0.0863	5.180	1050	30	14931.05	2.49	76.31	0.0873	5.240
510	30	14978.35	2.53	29.01	0.0878	5.270	1080	30	14928.3	2.75	79.06	0.0960	5.760
540	30	14975.61	2.74	31.75	0.0860	5.160	-	-	-	-	-	-	-

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

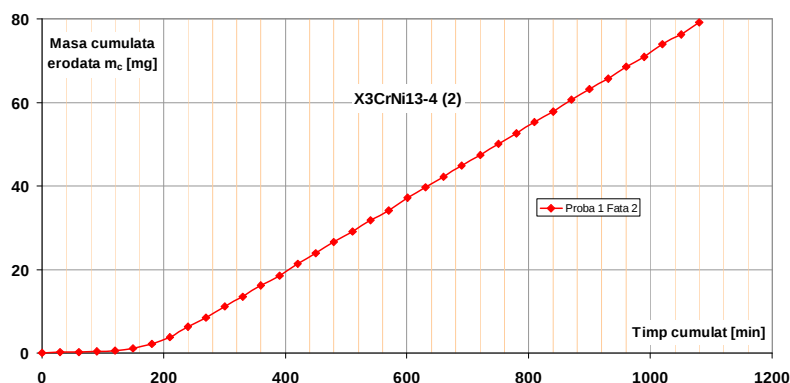


Fig. 5.161 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) la 1080 minute

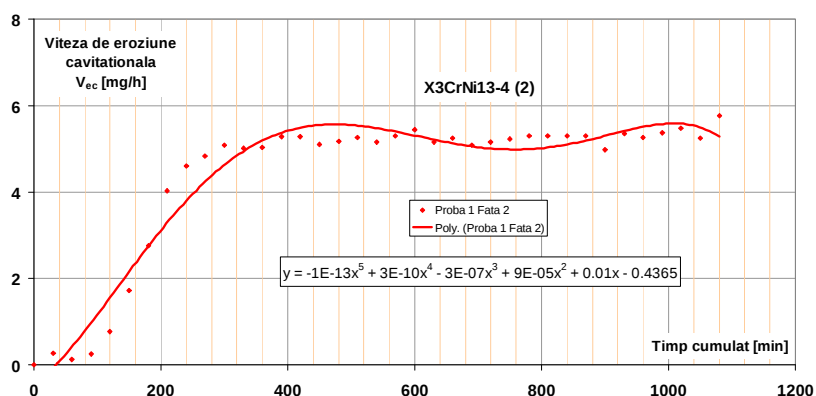


Fig. 5.162 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)

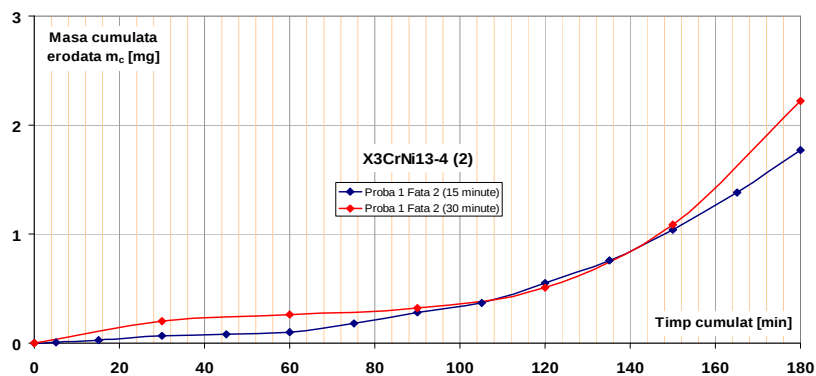


Fig. 5.163 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

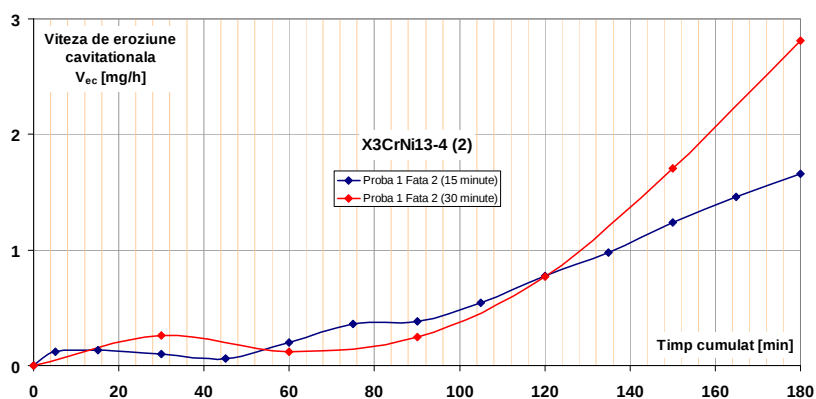


Fig. 5.164 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(2) (comparație curbe experimentale)

Pierderea totală de material erodat este de 79,06 mg. Curba din **figura 5.162** a fost interpolată polinomial de rezultând relația **5.39** (cu $R^2 = 0.9573$).

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-13} t^5 + 3 \cdot 10^{-10} t^4 - 3 \cdot 10^{-7} t^3 + 9 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,01t - 0,4365 \quad (5.39)$$

Din **figurile 5.163** și **5.164** se observă mici diferențe rezultate din compararea curbelor obținute pentru perioade de 30 minute și pentru perioade de 15 minute, deoarece suprafețele încercate la perioade de 30 de minute au fost lustruite complet.

5.4.7 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 3

Suprafața testată a materialului X3CrNi13-4 șarja 3 fost suprafața 2 a epruvetei 2. Rezultatele acestui oțel sunt evidențiate în **tabelul 5.103**.

În **figurile 5.165÷5.168** se prezintă graficele întocmite pentru pierderea masică și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și compararea acestora la 180 de minute pe perioade de 30 minute respectiv perioade de câte 15 minute.

Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proda 2 față 2) pe oțelul X3CrNi13-4(3) Tabel 5.103

Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumu- lat	Peri- oada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumu- lat						per perioada	cumu- lat		
t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	15154.5	0	0	0.0000	0.000	570	30	15133	1.92	21.5	0.0618	3.710
30	30	15154.48	0.02	0.02	0.0008	0.050	600	30	15131.21	1.79	23.29	0.0610	3.660
60	30	15154.45	0.03	0.05	0.0013	0.080	630	30	15129.34	1.87	25.16	0.0593	3.560
90	30	15154.4	0.05	0.1	0.0032	0.190	660	30	15127.65	1.69	26.85	0.0570	3.420
120	30	15154.26	0.14	0.24	0.0063	0.380	690	30	15125.92	1.73	28.58	0.0575	3.450
150	30	15154.02	0.24	0.48	0.0122	0.730	720	30	15124.2	1.72	30.3	0.0602	3.610
180	30	15153.53	0.49	0.97	0.0207	1.240	750	30	15122.31	1.89	32.19	0.0598	3.590
210	30	15152.78	0.75	1.72	0.0290	1.740	780	30	15120.61	1.7	33.89	0.0563	3.380
240	30	15151.79	0.99	2.71	0.0350	2.100	810	30	15118.93	1.68	35.57	0.0595	3.570
270	30	15150.68	1.11	3.82	0.0398	2.390	840	30	15117.04	1.89	37.46	0.0600	3.600
300	30	15149.4	1.28	5.1	0.0467	2.800	870	30	15115.33	1.71	39.17	0.0592	3.550
330	30	15147.88	1.52	6.62	0.0565	3.390	900	30	15113.49	1.84	41.01	0.0553	3.320
360	30	15146.01	1.87	8.49	0.0583	3.500	930	30	15112.01	1.48	42.49	0.0515	3.090
390	30	15144.38	1.63	10.12	0.0582	3.490	960	30	15110.4	1.61	44.1	0.0538	3.230
420	30	15142.52	1.86	11.98	0.0607	3.640	990	30	15108.78	1.62	45.72	0.0558	3.350
450	30	15140.74	1.78	13.76	0.0625	3.750	1020	30	15107.05	1.73	47.45	0.0563	3.380
480	30	15138.77	1.97	15.73	0.0632	3.790	1050	30	15105.4	1.65	49.1	0.0575	3.450
510	30	15136.95	1.82	17.55	0.0642	3.850	1080	30	15103.6	1.8	50.9	0.0625	3.750
540	30	15134.92	2.03	19.58	0.0658	3.950	-	-	-	-	-	-	-

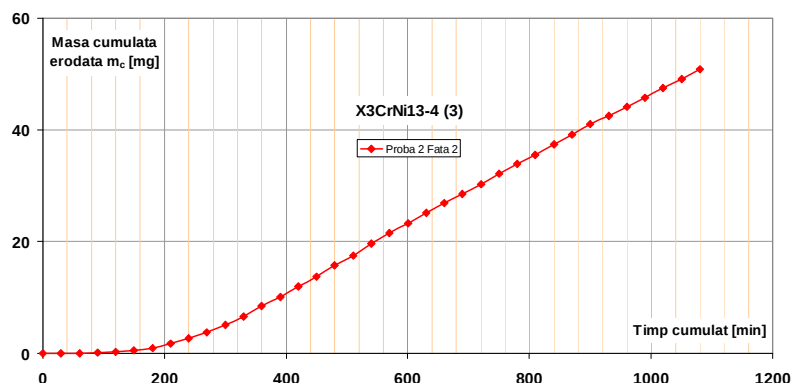


Fig. 5.165 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) la 1080 minute

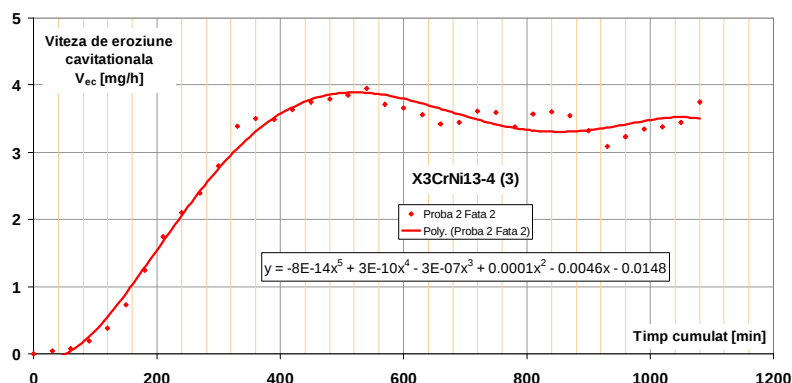


Fig. 5.166 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)

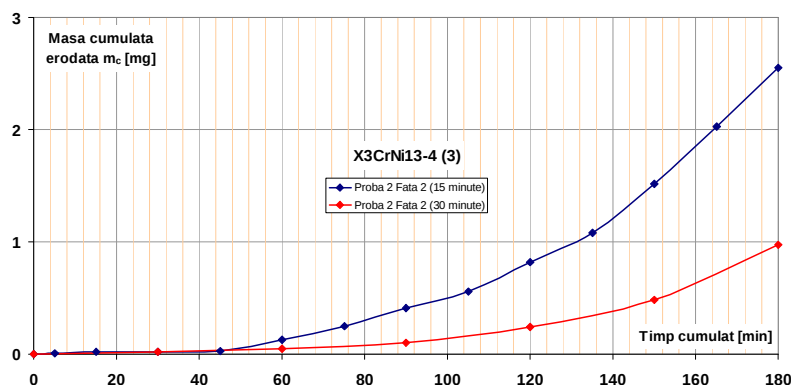


Fig. 5.167 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

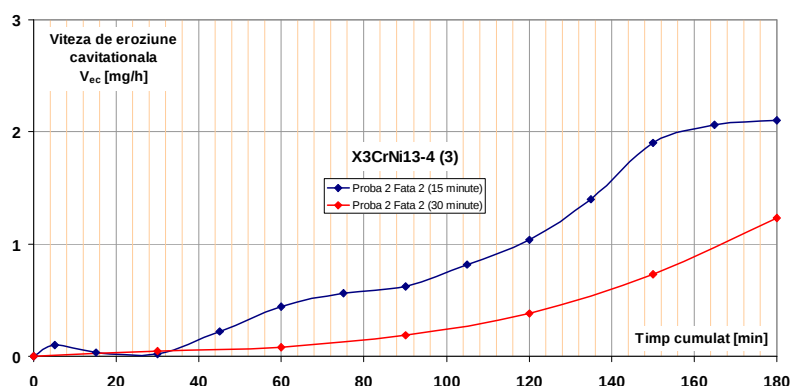


Fig. 5.168 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(3) (comparație curbe experimentale)

Pierdere totală de material erodat este de doar 50,9 mg. Curba din **figura 5. 166** a fost interpolată polinomial de rezultând **relația 5.40** (cu $R^2 = 0.9857$).

$$v_{ec} = -8 \cdot 10^{-14} t^5 + 3 \cdot 10^{-10} t^4 - 3 \cdot 10^{-7} t^3 + 0,0001 t^2 - 0,0046 t - 0,0148 \quad (5.40)$$

Din **figurile 5.167** și **5.168** se observă diferențe rezultate din compararea curbelor obținute pentru perioade de 30 minute și pentru perioade de 15 minute.

5.4.8 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X3CrNi13-4 șarja 4

Suprafața testată a materialului X3CrNi13-4 șarja 4 fost suprafața 1 a epruvetei 2. Rezultatele acestui oțel sunt evidențiate în **tabelul 5.104**, unde se va observa că pierdere totală de material erodat va fi de 91.67 mg. În **figurile 5.169÷5.172** se prezintă graficele întocmite pentru pierdere masică și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp și compararea acestora la 180 de minute pe perioade de 30 minute respectiv perioade de câte 15 minute.

Rezultatele obținute pentru perioade de 30 minute (proda 2 față 1) pe oțelul X3CrNi13-4(4) Tabel 5.104

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodata		Viteza de eroziune cavitaționala	
			per perioada	cumulat						per perioada	cumulat		
t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}		t	Δt	m	Δm	mc	v_{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	14759.45	0	0	0.0000	0.000	570	30	14719.29	3.21	40.16	0.1027	6.160
30	30	14759.41	0.04	0.04	0.0018	0.110	600	30	14716.34	2.95	43.11	0.1002	6.010
60	30	14759.34	0.07	0.11	0.0027	0.160	630	30	14713.28	3.06	46.17	0.0977	5.860
90	30	14759.25	0.09	0.2	0.0082	0.490	660	30	14710.48	2.8	48.97	0.0987	5.920
120	30	14758.85	0.4	0.6	0.0202	1.210	690	30	14707.36	3.12	52.09	0.0998	5.990
150	30	14758.04	0.81	1.41	0.0413	2.480	720	30	14704.49	2.87	54.96	0.1017	6.100
180	30	14756.37	1.67	3.08	0.0623	3.740	750	30	14701.26	3.23	58.19	0.1033	6.200
210	30	14754.3	2.07	5.15	0.0790	4.740	780	30	14698.29	2.97	61.16	0.1035	6.210
240	30	14751.63	2.67	7.82	0.0895	5.370	810	30	14695.05	3.24	64.4	0.1045	6.270
270	30	14748.93	2.7	10.52	0.0958	5.750	840	30	14692.02	3.03	67.43	0.1030	6.180
300	30	14745.88	3.05	13.57	0.0963	5.780	870	30	14688.87	3.15	70.58	0.1007	6.040
330	30	14743.15	2.73	16.3	0.0950	5.700	900	30	14685.98	2.89	73.47	0.1012	6.070
360	30	14740.18	2.97	19.27	0.0965	5.790	930	30	14682.8	3.18	76.65	0.1008	6.050
390	30	14737.36	2.82	22.09	0.0995	5.970	960	30	14679.93	2.87	79.52	0.0987	5.920
420	30	14734.21	3.15	25.24	0.1007	6.040	990	30	14676.88	3.05	82.57	0.0983	5.900
450	30	14731.32	2.89	28.13	0.0980	5.880	1020	30	14674.03	2.85	85.42	0.1012	6.070
480	30	14728.33	2.99	31.12	0.0962	5.770	1050	30	14670.81	3.22	88.64	0.1042	6.250
510	30	14725.55	2.78	33.9	0.0972	5.830	1080	30	14667.78	3.03	91.67	0.0978	5.870
540	30	14722.5	3.05	36.95	0.1043	6.260	-	-	-	-	-	-	-

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

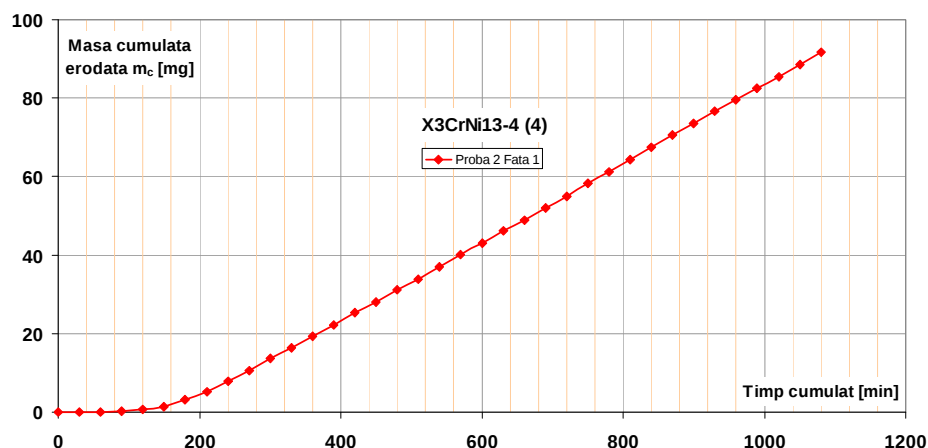


Fig. 5.169 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) la 1080 minute

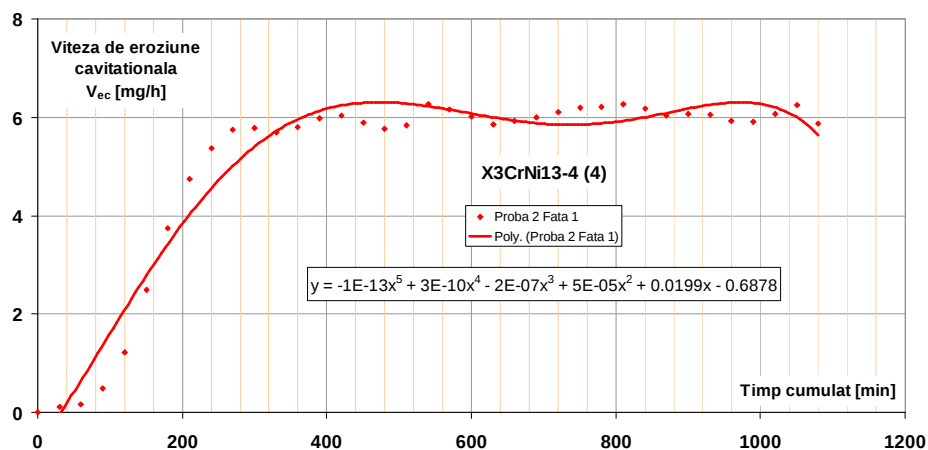


Fig. 5.170 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) la 1080 minute (curba analitică și experimentală)

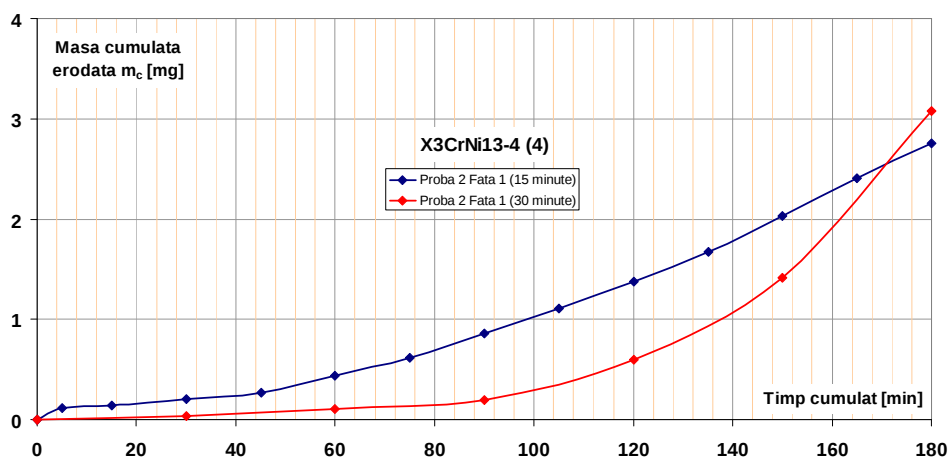


Fig. 5.171 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

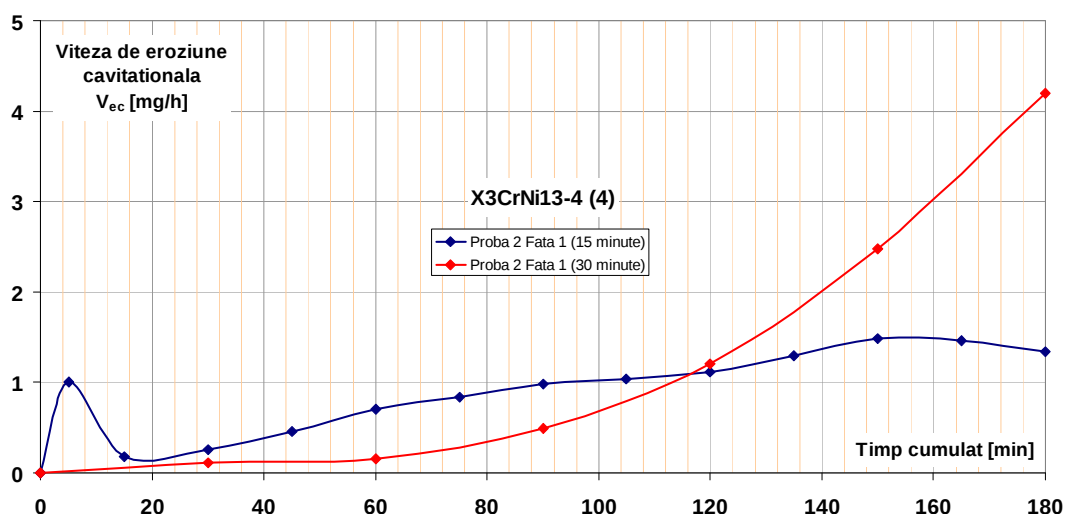


Fig. 5.172 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X3CrNi13-4(4) (comparație curbe experimentale)

Curba din figura 5. 170 a fost interpolată polinomial de rezultând relația 5.41 (cu $R^2 = 0.958$).

$$v_{ec} = -1 \cdot 10^{-13} t^5 + 3 \cdot 10^{-10} t^4 - 2 \cdot 10^{-7} t^3 + 5 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,0199t - 0,6878 \quad (5.41)$$

Din figurile 5.171 și 5.172 se observă diferențe rezultate din compararea curbelor obținute pentru perioade de 30 minute și pentru perioade de 15 minute, pentru un timp total de 180 de minute.

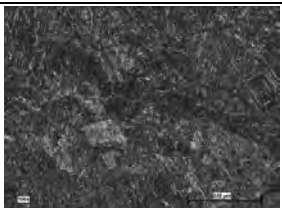
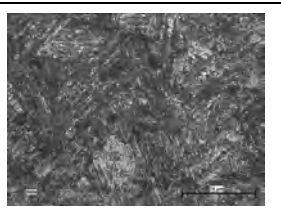
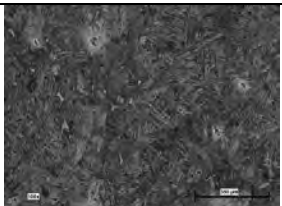
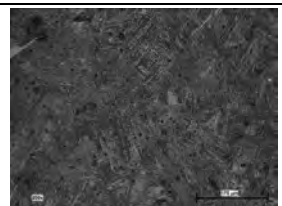
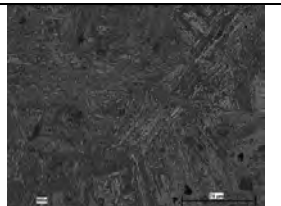
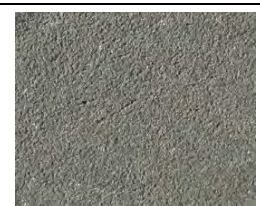
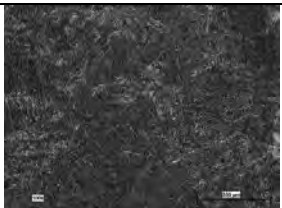
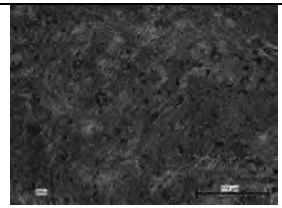
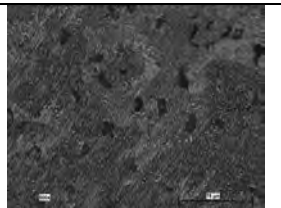
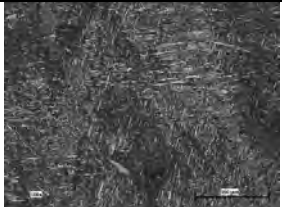
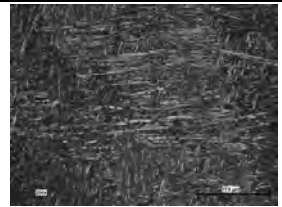
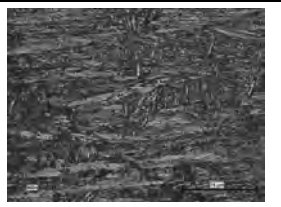
În tabelul 5.105 se prezintă o comparație între fotografiile obținute cu ajutorul microscopului optic metalografic cu sistem de achiziție de imagini din dotarea centrului CCHAPT și cu un aparat de fotografiat, imaginile după testul de cavitație a acestor 4 șarje a oțelului inoxidabil X3CrNi13-4.

Microstructura a fost obținută la 3 tipuri diferite de mărire și anume la 100x, 200x și 500x, din care se observă, la mărirea de 500x, mici adâncituri, care reprezintă distrugerile prin cavitație după încercarea de 180 de minute din subcapitolul 5.2.

*Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate
la fabricația componentelor de turbine hidraulice*

Comparație între cele 4 șarje ale oțelului inoxidabil X3CrNi13-4

Tabel 5.105

Nr. crt.	Tip șarjă	Microstructura celor 4 șarje ale oțelului X3CrNi13-4			Imagini după cavitație	
		Mărire 100x	Mărire 200x	Mărire 500x	Fotografie	Macrostructură
1	X3CrNi13-4 (1)					
2	X3CrNi13-4 (2)					
3	X3CrNi13-4 (3)					
4	X3CrNi13-4 (4)					

5.4.9 Cercetări pentru durate extinse pe materialul X5CrNi18-10

Acest oțel a fost supus la cavitație pe perioade de câte 60 minute pentru 1800 minute (30 ore). Suprafața de testare a fost suprafața 2, epruveta 1. Rezultatele aferente cercetării acestui oțel sunt evidențiate în **tabelul 5.106**.

Rezultatele obținute pentru perioade de 60 minute (proba 1 fața 2) pe oțelul X5CrNi18-10 **Tabel 5.106**

Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională		Timp cumulat	Perioada	Masa epruveta	Masa erodată		Viteza de eroziune cavitațională	
t	Δt	m	per perioada	cumulat	v _{ec}		t	Δt	m	per perioada	cumulat	v _{ec}	
min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h	min	min	mg	mg	mg	mg/min	mg/h
0	0	16308.17	0	0	0.0000	0.000	960	60	16288.5	2.06	19.67	0.0363	2.180
60	60	16307.77	0.4	0.4	0.0070	0.420	1020	60	16286.2	2.3	21.97	0.0386	2.315
120	60	16307.33	0.44	0.84	0.0083	0.500	1080	60	16283.87	2.33	24.3	0.0370	2.220
180	60	16306.77	0.56	1.4	0.0117	0.705	1140	60	16281.76	2.11	26.41	0.0348	2.085
240	60	16305.92	0.85	2.25	0.0128	0.770	1200	60	16279.7	2.06	28.47	0.0370	2.220
300	60	16305.23	0.69	2.94	0.0138	0.830	1260	60	16277.32	2.38	30.85	0.0390	2.340
360	60	16304.26	0.97	3.91	0.0181	1.085	1320	60	16275.02	2.3	33.15	0.0392	2.350
420	60	16303.06	1.2	5.11	0.0207	1.240	1380	60	16272.62	2.4	35.55	0.0402	2.410
480	60	16301.78	1.28	6.39	0.0221	1.325	1440	60	16270.2	2.42	37.97	0.0388	2.330
540	60	16300.41	1.37	7.76	0.0227	1.360	1500	60	16267.96	2.24	40.21	0.0415	2.490
600	60	16299.06	1.35	9.11	0.0232	1.395	1560	60	16265.22	2.74	42.95	0.0420	2.520
660	60	16297.62	1.44	10.55	0.0248	1.490	1620	60	16262.92	2.3	45.25	0.0379	2.275
720	60	16296.08	1.54	12.09	0.0270	1.620	1680	60	16260.67	2.25	47.5	0.0377	2.260
780	60	16294.38	1.7	13.79	0.0267	1.600	1740	60	16258.4	2.27	49.77	0.0374	2.245
840	60	16292.88	1.5	15.29	0.0318	1.910	1800	60	16256.18	2.22	51.99	0.0366	2.195
900	60	16290.56	2.32	17.61	0.0365	2.190	-	-	-	-	-	-	-

Pierdere totală de material erodat este de numai 51,99 mg, ceea ce înseamnă că acest oțel are o foarte bună rezistență la eroziune cavitațională.

În **figurile 5.173÷5.176** se prezintă graficele întocmite pentru pierdere masică și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp, precum și compararea acestora pentru 180 de minute pe perioade de 60 minute, adică doar 3 perioade, respectiv câte o perioadă de 5, 10 minute și 11 perioade de 15 minute, pe aceeași suprafață.

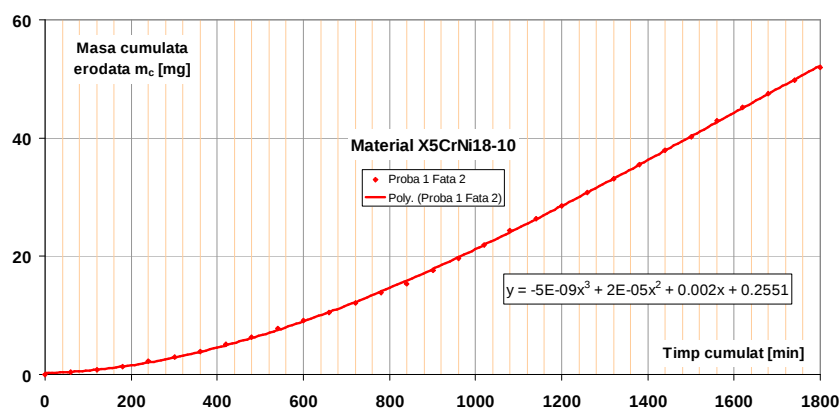


Fig. 5.173 Curba pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 la 1800 minute (curba analitică și experimentală)

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

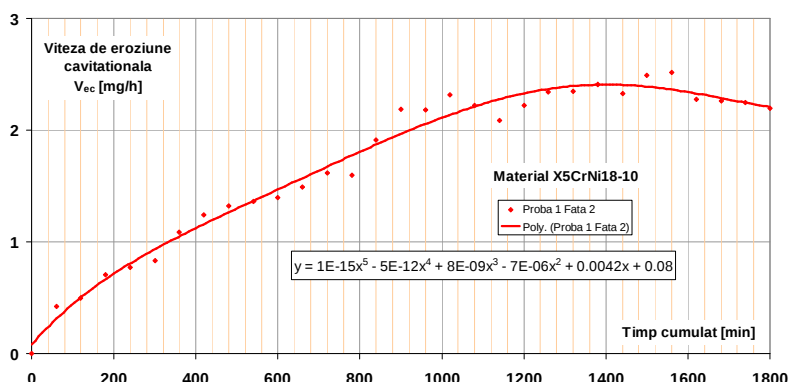


Fig. 5.174 Curba vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 la 1800 minute (curba analitică și experimentală)

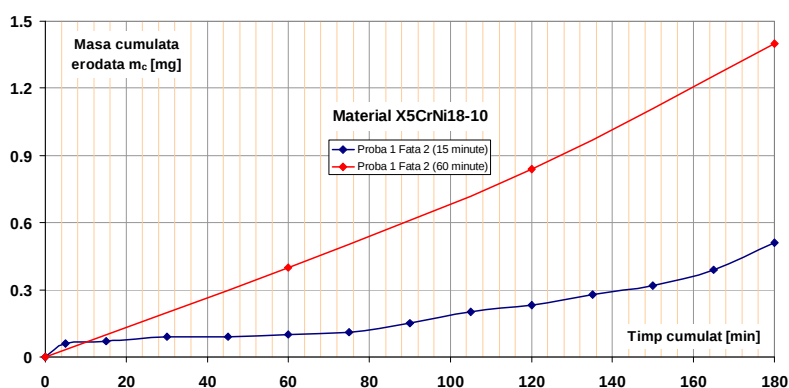


Fig. 5.175 Curbele pierderii de material funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (comparație la 180 minute pentru diferite perioade)

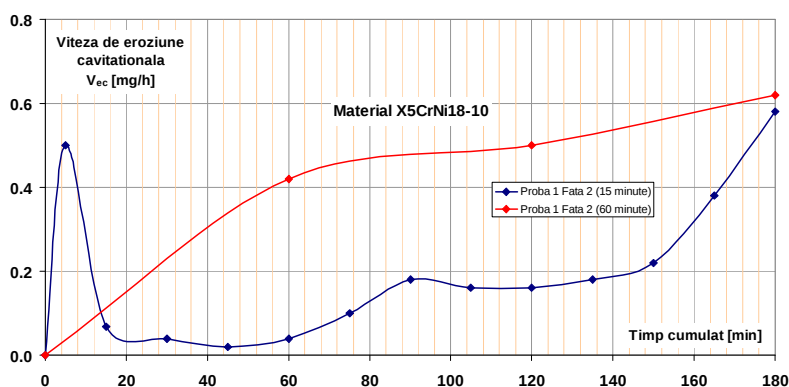


Fig. 5.176 Curbele vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp pentru oțelul X5CrNi18-10 (comparație curbe experimentale)

Curbele din figurile 5.173 și 5.174 au fost interpolate polinomial rezultând relația 5.42 (cu $R^2 = 0.9999$) respectiv 5.43 (cu $R^2 = 0.9816$).

$$M = -5 \cdot 10^{-9} t^3 + 2 \cdot 10^{-5} t^2 + 0,002t + 0,2551 \quad (5.42)$$

$$v_{ec} = 1 \cdot 10^{-15} t^5 - 5 \cdot 10^{-12} t^4 + 8 \cdot 10^{-9} t^3 - 7 \cdot 10^{-6} t^2 + 0,0042t + 0,08 \quad (5.43)$$

Din figurile 5.175 și 5.176 se observă diferențe în compararea curbelor obținute pentru perioade de 60 minute și pentru perioade de 15 minute.

În **figura 5.177** sunt prezentate imagini ale suprafeței erodate cât și macrostructura după un timp total de 1800 de minute.



a) după 1440 minute

b) după 1800 minute

Fig. 5.177 Imagini ale epruvetei erodate din oțelul X5CrNi18-10

5.5. Concluzii finale

5.5.1 Concluzii referitoare la suporturile de prindere a epruvetelor

Din testarea tuturor acestor materiale prin metoda indirectă de cavitație rezultă faptul că suporturile de prindere a epruvetelor prezintă anumite dezavantaje. Suportul de prindere pentru epruvetele cilindrice cu diametrul de 16 mm și înălțimea de 10 mm, se oxidează în timp și poate influența masa epruvetelor la cântărire și implicit rezultatele cercetărilor prin care se obțin curbele pierderii masice și ale vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp.

Pentru epruvetele de formă cilindrică $\Phi 16 \times 10$ mm și sub formă de cub cu latura de 16 mm suportul de prindere cu 4 șuruburi proiectat și realizat prezintă avantajul că epruvetele nu se oxidează fiind în contact cu un material nemetalic. Dezavantajul acestui suport de prindere îl constituie șuruburile de prindere care trebuie strânse bine (deoarece vibrațiile generate de aparatul vibrator pot destrânge piulițele și șuruburile) și pot zgâria epruveta de testat pe cele 4 suprafețe ale sale. Pentru acest suport o soluție ar fi ca epruveta să fie protejată de un material de nylon. Suportul cilindric trebuie realizat din oțel inoxidabil.

Există însă anumite limite pentru proiectarea și realizarea unor suporturi de prindere și anume: masa suportului de prindere trebuie să fie de minim 250 g și să se încadreze în interiorul serpentinei care menține apa din vas la temperatura dorită, care are diametrul interior de 100 mm. O altă soluție ar fi schimbarea formei serpentinei și a vasului de lichid, astfel ca suportul de prindere a epruvetelor să poate fi realizat și la dimensiuni mai mari.

5.5.2 Concluzii referitoare la evoluția sonotrodelor pe durata experimentărilor

Ambele sonotrode (din titan și oțel) au fost folosite pentru un număr de peste 400 de ore de cercetare (nu numai pe materialele descrise în prezentul capitol, ci și pe alte materiale) și sunt prezentate în **figura 5.183**, iar caracteristicile lor sunt prezentate în **tabelul 5.107**.

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

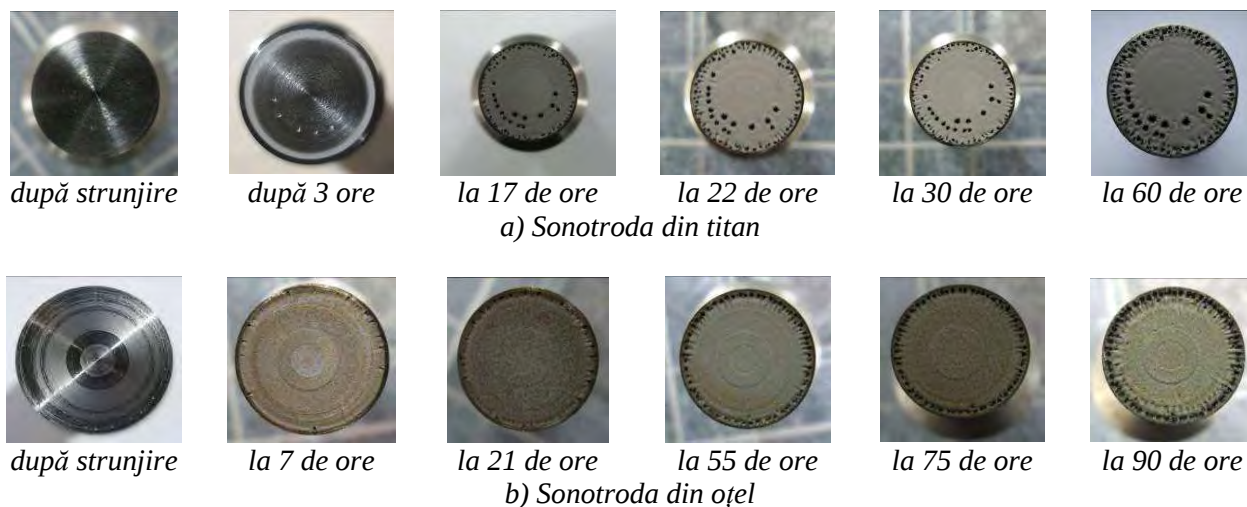


Fig. 5.178 Imagini ale celor 2 sonotrode utilizate

Caracteristici sonotrode utilizate

Tabel 5.107

Tip sonotrodă	Lungime [mm]		Δl [mm]	Frecvență [Hz]		Δf [Hz]	Timp total [ore]
	inițială	finală		inițială	finală		
Oțel	154.2	153.55	0.65	19775.4	19921.9	-146.5	~150
Titan	154.4	151.27	3.13	19659.4	20111.1	-451.7	~300

În tabelul prezentat anterior s-a notat lungimea inițială și finală a sonotrodelor, precum și frecvența inițială și finală după ultimele încercări, frecvență măsurată cu aparatul descris în **cap. 4**.

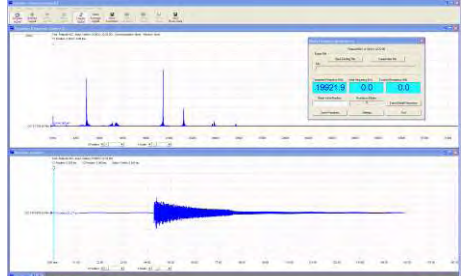
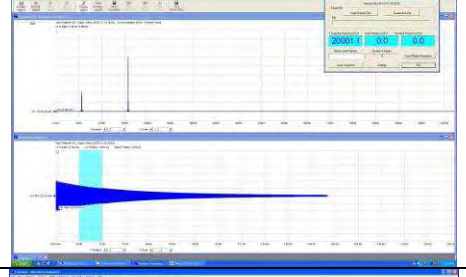
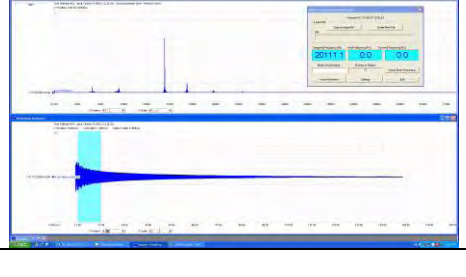
După o utilizare de ~100 de ore, sonotrodele trebuiau strunjite pentru a se obține din nou o suprafață netedă. Astfel sonotroda din oțelul aliat de îmbunătățire a fost prelucrată de 2 ori prin strunjire, iar sonotroda din titan de 3 ori.

Se observă faptul că sonotroda din oțelul 34CrNiMo6 este mai rezistentă decât cea fabricată din material de titan, însă prezintă dezavantajul că după numai 30 de minute de funcționare se încălzește foarte tare până la aproape 80 °C, iar busterul sau transformatorul mecanic și traductorul piezoelectric se încălzesc mai repede, în lipsa unui sistem de ventilație.

Trebuie menționat faptul că sonotroda din titan la frecvența de 20111.1 Hz nu a mai funcționat, deși frecvența se încadrează în domeniul de abatere al frecvenței de ± 500 Hz recomandat de producător, generatorul de ultrasunete indicând aceasta prin led-ul *Tuning Error* și prin blocarea funcționării aparatului. În tabelul **tabelul 5.108** se evidențiază prin imagini aceste afirmații.

Descrierea domeniului de frecvență a generatorului de ultrasunete

Tabel 5.108

Nr. crt.	Interpretare	Domeniul de frecvență al generatorului	Măsurarea frecvenței proprii
1	Funcționare generator cu sonotroda de oțel la 19921.9 Hz		
2	Măsurarea frecvenței sonotrodei din titan originală a aparatului la 20001.1 Hz		
3	Nefuncționarea generatorului de ultrasunete cu sonotroda din titan realizată la numai 20111.1 Hz		

5.5.3 Concluzii referitoare la rezultatele experimentărilor

Experimentările au fost efectuate pe 16 materiale, pentru obținerea caracteristicilor procesului de eroziune cavitațională. Cercetările au fost efectuate pe următoarele categorii de materiale: oțeluri inoxidabile, oțeluri de uz general și aliate, fonte, bronzuri și aliaje pe bază de aluminiu respectiv staniu.

Subcapitolul 5.1 s-a concentrat pe cercetări preliminare pe aluminiu prin cele două metode de cavitație vibratorie directă și indirectă, cu scopul de a urmări evoluția comparativă a procesului de distrugere cavitațională prin ambele metode. Alegerea aluminiului ca material de experimentare a fost determinată de faptul că, fiind un material slab rezistent la cavitație, procesul de eroziune cavitațională este mai rapid și astfel se pot pune în evidență mai eficient diferențele cantitative dintre cele două metode.

Subcapitolul 5.2 tratează problematica reproducerii curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională pe 11 materiale. Scopul cercetării pe aceste materiale a fost testarea

rezistenței la eroziune cavitațională a acestor materiale precum și verificarea reproducerii curbilor de pierdere de material funcție de timp și a curbei vitezei de eroziune cavitațională, prin efectuarea repetată a unui număr de 4 încercări pe același material, pe o durată de 180 minute. Geometria epruvetelor testate a fost următoarea:

- o formă de cub cu latura de 16 mm, 4 dintre fețele acestuia au fost supuse atacului cavitațional;
- o formă cilindrică, fețele superioară și inferioare a două epruvete au fost supuse atacului cavitațional.

Subcapitolul 5.3 abordează problematica încercărilor pe epruvete din același material numai pentru două suprafețe, urmărindu-se obținerea caracteristicilor cavitaționale pentru toate cele patru stadii cavitaționale: incubatie, accelerare, staționare și decelerare. Încercările au fost efectuate pe 9 materiale în două variante, diferite prin durata perioadelor de încercare, în scopul verificării reproductibilității aceleiași curbe ale vitezei de eroziune cavitațională la valori diferite ale perioadelor de timp.

Subcapitolul 5.4 prezintă rezultatele experimentale derulate, pe 9 materiale, pentru determinarea rezistenței la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate extinse ale atacului cavitațional. Cercetările au fost efectuate pe o singură suprafață a acelorași epruvete din & 5.2, suprafețele încercate fiind cele care au pierdut cel mai puțin din masa inițială. Durata maximă de încercare a fost pentru materialul X5CrNi18-10, care a totalizat 1800 minute de încercare.

Rezultatele experimentale din acest capitol au fost prezentate în tabele sub formă numerică, sub formă grafică (curbe primare și curbe comparative), sub forma imaginilor suprafeței erodate și a și macrostructurii respectiv sub forma relațiilor de interpolare polinomială a curbilor. Pentru fiecare material analizat s-au prezentat concluzii individuale rezultate din cercetările experimentale.

Cap. 6 CONCLUZII FINALE. CONTRIBUȚII PERSONALE.

DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE. DISEMINAREA REZULTATELOR

6.1 Concluzii generale

Teza de doctorat reprezintă o cercetare privind comportamentul la eroziune cavitațională a unor tipuri de materiale metalice feroase și neferoase prin cavitație vibratorie, utilizând metoda indirectă de cavitație.

Tipurile de materiale studiate pe parcursul întregii cercetări, au fost oțeluri inoxidabile, oțeluri aliate de îmbunătățire și oțeluri carbon de calitate, cât și alte materiale: fonte, bronzuri și aliaje pe bază de aluminiu, respectiv staniu, urmărindu-se:

- o cuantificarea evoluției distrugerii cavitaționale în timp prin schimbarea perioadelor sau fazelor de lucru (5 minute, 8 minute, 15 minute, 30 minute, 45 minute și 60 minute);
- o obținerea curbelor caracteristice de cavitație: masa pierdută și viteza de eroziune cavitațională funcție de timp pentru materialele studiate;
- o verificarea reproducerii curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională;
- o parcurgerea stadiilor cavitaționale: incubație, accelerare, staționare și decelerare, stadii definite pe curba vitezei de eroziune cavitațională;
- o compararea diferitelor materiale din punct de vedere al comportării la cavitație.

Încercările de eroziune cavitațională a materialelor au fost efectuate prin metoda indirectă de cavitație conform standardului G 32-10 pe ștandul de eroziune cavitațională furnizat de firma Telsonic, distanța între sonotrodă și epruvetă fiind de 0.6 mm pentru toate încercările efectuate.

La cercetările experimentale au fost utilizate mai multe sonotrode (din oțel și titan), o parte din cercetări fiind alocate pentru proiectarea și calibrarea teoretică și experimentală a acestora. Simularea numerică cu elemente finite a urmărit comportarea la oboseală a diferitelor variante de sonotrode și determinarea frecvenței proprii utilizând programul SolidWorks.

Pentru funcționarea generatorului de ultrasunete DG 2000-2, frecvența sonotrodelor trebuie să se încadreze în domeniul 20000 ± 500 Hz, astfel încât să nu se producă blocarea funcționării aparatului vibrator; pentru verificarea experimentală a frecvenței și calibrarea sonotrodelor s-a utilizat un echipament specializat pentru măsurarea frecvenței proprii și softul de analiză Fastview.

Pentru analiza chimică a 3 tipuri de material, s-a utilizat în cercetare un spectrometru, iar pentru punerea în evidență a structurii materialelor metalice înainte și după cavitație s-a utilizat microscopul electronic și stereomicroscopul.

Perioada de cercetare, a însemnat un număr de peste 400 de ore petrecute în laborator, iar prelucrarea datelor s-a concretizat în tabele și reprezentări grafice a curbelor, pentru fiecare material în parte.

6.2 Contribuții personale

Ca rezultat al studiului bibliografic, al cercetărilor teoretice și experimentale efectuate în cadrul tezei, se pot evidenția următoarele contribuții personale:

- ✓ realizarea unei sinteze a materialului bibliografic care a urmărit:
 - studiul fenomenului de cavitație și eroziunea cavitațională ca efect al cavitației;
 - inventarierea aparate de laborator utilizate pentru testarea rezistenței la eroziune cavitațională a materialelor;
 - parcurgerea rezultatelor cercetărilor actuale în domeniu și compararea acestora pe două tipuri de aparate (aparat vibrator, prin metoda directă și indirectă, respectiv aparat cu disc rotitor);
- ✓ execuția epruvetelor pentru cele 16 materiale studiate cu formă cubică și cilindrică;
- ✓ proiectarea și execuția unor suporturi de prindere a epruvetelor de formă cubică și cilindrică pentru cercetări prin metoda indirectă de cavitație;
- ✓ simularea numerică prin programul SolidWorks a rezistenței la oboseală a sonotrodelor din oțel, referitoare la analiza fisurării și ruperii acestora, rezultatul fiind propunerea a 2 geometrii de sonotrode cu filet interior M10x1 respectiv M8x1, utilizabile în cercetare prin metoda directă de cavitație;
- ✓ calcule de simulare a frecvenței proprii pentru 2 tipuri de sonotrode din materialul Ti6Al4V respectiv 34CrNiMo6, execuția și calibrarea acestora pentru utilizare prin metoda indirectă de cavitație;
- ✓ obținerea prin cercetări experimentale a unor rezultate originale în studiul eroziunii cavitaționale (care totalizează 651 puncte de măsură, colectate pe durata a 21281 minute $\cong$ 356 ore), concretizate prin date experimentale și curbe ale masei pierdute și vitezei de eroziune cavitațională funcție de timp, pentru 16 tipuri de materiale studiate, date care constituie o bază de date care poate fi utilizată în activitatea de cercetare și proiectare a mașinilor hidraulice în cadrul S.C. Hydro Engineering Reșița. Aceste cercetări au vizat:

Cercetări privind eroziunea cavitațională pe materiale utilizate la fabricația componentelor de turbine hidraulice

- reproducerea curbelor pierderii masice și a vitezei de eroziune cavitațională;
 - obținerea caracteristicilor cavitaționale pentru toate cele patru stadii cavitaționale: incubatie, accelerare, staționare și decelerare;
 - rezistența la eroziune cavitațională a unor oțeluri pentru durate extinse ale atacului cavitațional;
 - cercetări preliminare comparative pe aluminiu prin metoda directă și indirectă de cavitație.
- ✓ compararea materialelor studiate din punct de vedere al comportării cavitaționale; din cele 16 materiale studiate cu compoziție chimică diferită, materialele cu cea mai bună rezistență la cavitație au fost mărcile de oțel inoxidabil: X5CrNi18-8 și X3CrNi13-4 (șarjă 3), iar cele cu cea mai slabă rezistență au fost YSn83 și AlSi12.

6.3 Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile viitoare de cercetare vizate de către autor sunt următoarele:

- ✓ proiectarea și realizarea altor tipuri de sonotrode destinate cercetărilor experimentale prin metoda indirectă de cavitație, urmărindu-se funcționarea corectă a acestora la modificări parametrilor instalației experimentale (frecvență, amplitudine, distanță sonotrodă-epruvetă, etc.);
- ✓ cercetări suplimentare pe epruvete din materialele deja testate, prin modificarea parametrilor instalației experimentale și prin modificarea distanței dintre sonotrodă și epruvetă;
- ✓ cercetări privind remedierea geometriei sonotrodelor după un timp de funcționare care afectează geometria și modifică frecvența proprie;
- ✓ înlocuirea unor componente ale standului experimental: serpentina de răcire; suporturile de prinderea a epruvetelor;
- ✓ cercetarea de materiale suplimentare tratate termic sau/și criogenic, tratamente care îmbunătățesc proprietățile mecanice ale acestora;

6.4 Diseminarea rezultatelor

Pe parcursul perioadei de doctorat am participat la o serie de cursuri, seminarii, precum și la conferințe locale, naționale și internaționale, workshop-uri în domeniul ingineriei mecanice, diseminarea fiind realizată prin 12 lucrări publicate:

1. Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., *Numerical behavior reproduction of a truss structure and beam, subjected to concentrated load*, ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XVII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2010, (indexată B+).
2. Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloiu R. C., *The Aerodynamic Force Calculus for a Plate Immersed in a Uniform Air Stream Using SolidWorks Flow Simulation Module*; Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Finite Differences-Finite Elements-Finite Volumes-Boundary Elements (F-and-B '11), pag. 98÷103, ISBN 978-960-474-298-1, Paris, 28-30.04.2011, (indexată ISI).
3. Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloiu R. C., *The Hydrodynamic Characteristics Calculus for Isolated Profile Go428 using Solidworks Flow Simulation Module*; Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Finite Differences-Finite Elements-Finite Volumes-Boundary Elements (F-and-B '11), pag. 92÷97, ISBN 978-960-474-298-1, Paris, 28-30.04.2011, (indexată ISI).
4. Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloiu R. C., *Calculul forței aerodinamice și distribuției de presiuni pentru un coș vertical*; ȘTIINȚA ȘI TEHNICĂ, an XI, vol. 20, pag. 269÷276, ISSN 2067-7138, București, 2011 (indexată B)..
5. Nedelcu D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., *The Kinematic and Dynamic Analysis of the Crank Mechanism with SolidWorks Motion*; Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SIGNAL PROCESSING, COMPUTATIONAL GEOMETRY and ARTIFICIAL VISION (ISCGAV '11), pag. 245÷250, ISBN: 978-1-61804-027-5, Florence, 23-25.04.2011, (indexată ISI).
6. Nedelcu D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Florea D., *Studiul numeric al concentratorului de tip racordare pentru o placă de secțiune dreptunghiulară supusă solicitării de întindere*; ȘTIINȚA ȘI TEHNICĂ, an XII, vol. 21, pag. 613÷620, ISSN 2067-7138, București, 2012, (indexată B).
7. **Nedeloni M.D.**, *Calibration Tests of a Sonotrode and Cavitation Erosion Research through Indirect Cavitation Method For A Steel*; (în curs de publicare), ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012 (indexată B+).
8. **Nedeloni M.D.**, Cojocaru V., Ciubotariu R., Nedelcu D., *Cavitation Erosion Tests Performed by Indirect Vibratory Method on Stainless Steel Welded Samples with*

- Hardened Surface; (în curs de publicare), ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012, (indexată B+).*
9. **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., *Research through Direct and Indirect Cavitation Method for a Aluminum Specimen; (în curs de publicare), ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012, (indexată B+).*
 10. **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., *Variants of sonotrode for a vibratory apparatus for test cavitation erosion by the indirect method; Constanta Maritime University Annals, Vol.17, Year XIII, July 2012, (indexată B+).*
 11. **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., Ion I., Ciubotariu R., *Calibration of a sonotrode from a stand component for test cavitation erosion through direct method; Constanta Maritime University Annals, Vol.17, Year XIII, July 2012, (indexată B+).*
 12. Suciu L., Hatiegan C., Gillich G.R., Marta C., **Nedeloni M.**, *Research regarding vibration damping in systems with a degree of freedom; Scientific Bulletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transactions on Mathematics & Physics, vol. 57 (71), pag. 70÷76, Fascicola 1, ISSN 1224-6069, Timișoara, 2012, (indexată B+).*

BIBLIOGRAFIE

- [1] Alexescu D., Bordeasu I., Oanca O., Baci I., *Studiul rezistenței la cavitație a oțelului inoxidabil martensitic cu 12% crom destinat fabricării paletelor de mașini hidraulice*, ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ, an XI, vol. 20, pag. 415÷420, Editura AGIR, ISSN 2067-7138, București, 2011.
- [2] Amza Gh., Dănilă B., Florica C., *Sisteme ultraacustice*, Editura Tehnică, București, 1988.
- [3] Anton I., *Cavitația, vol. I*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1984.
- [4] Anton I., *Cavitația, vol. II*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1985.
- [5] Avellan F., *Introduction to cavitation in hydraulic machinery*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, Special issue - The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, pag. 11÷22, Timișoara, October 21-22, 2004.
- [6] Bălășoiu V., Razga C., Popoviciu M., Bordeasu I., *Cavitația în distribuitoare, coeficienți și curbe caracteristice de cavitație*, A patra conferință a hidroenergeticienilor din România, Dorin Pavel, 26-27 mai 2006.
- [7] Băran Gh., *Cavitație și eroziune cavitațională*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-2058-8, București, 2001.
- [8] Băraian M., Arghir G., Petean I., Jumate N., *Stransformări structurale ale oțelului ledeburitic X200Cr12 în urma aplicării unui tratament termin și criogenic*, ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ, an XI, vol. 20, pag. 389÷396, ISSN 2067-7138, București, 2011.
- [9] Bologa O., *Aspects of cavitation studied on the hydrodynamic cavitation tribomodels*, The Annals of University “Dunărea de Jos” of Galați, Fascicle VIII, Tribology, ISSN 1221-4590, pag. 38÷50, Galați, 2002.
- [10] Bologa O., *The parameter influence on the superficial layer in cavitation destruction*, The Annals of University “Dunărea de Jos” of Galați, Fascicle VIII, Tribology, ISSN 1221-4590, pag. 51÷57, Galați, 2002.
- [11] Bordeasu I., *Eroziunea cavitațională a materialelor*, Editura Politehnica, ISBN (10) 973-625-278-7, ISBN (13) 978-973-625-278-5, Timișoara, 2006.
- [12] Bordeasu I., Baci D. I., *Behaviour research on erosion cavity steels X12CrMoS17 and X22CrNi17 recorded*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 55 (69), pag. 90÷95, Iss. 2, Timișoara, 2010.
- [13] Bordeasu I., Bădăraș R., Oanca O., *Considerații privind criteriile de evaluare a rezistenței materialelor la eroziune cavitațională*, ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ, an XII, vol. 22, pag. 127÷134, ISSN 2067-7138, București, 2012.
- [14] Bordeasu I., Bădăraș R., Baci I. D., Oanca O., Bordeasu C., *Contribuții în corelarea parametrului eroziunii cavitaționale 1/MDPR cu parametrii funcționali ai aparatului de cercetare*, ȘTIINȚA ȘI TEHNICĂ, an XII, vol. 22, pag. 55÷62, ISSN 2067-7138, București, 2012.
- [15] Bordeasu I., Jurchela A. D., Karabenciov A., Birău N., Bordeasu D., Bodin F., *Nickel’s influence over cavitation erosion of stainless steels with constant chromium content*, Special Issue of the Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Mechanics - Proceedings of The International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments “HME 2008”, Timișoara, 16-17 Octombrie 2008, ISSN 1224-6077, pag. 421÷424, Timișoara, 2008.

- [16] Bordeasu I., Oanca O., *Cercetarea eroziunii prin cavitație în laboratorul de mașini hidraulice din Timișoara*, ȘTIINTA ȘI TEHNICĂ, an XI, vol. 20, pag. 581÷588, ISSN 2067-7138, București, 2011.
- [17] Bordeasu I., Oanca O., *Considerations regarding the cavitation damage process on bronze and brass used in the marine screw manufacture*, MACHINE DESIGN, vol. 3, no. 4, pag. 277÷280, ISSN 1821-1259, Novi Sad, 2011.
- [18] Bordeasu I., Popoviciu M. O., *Considerations regarding the effects of microstructure and mechanical properties on steels with variable nickel content, subjected to cavitation erosion*, MACHINE DESIGN, pag. 373÷376, ISSN 1821-1259, Novi Sad, 2010.
- [19] Bordeasu I., Popoviciu M. O., Bălășoiu V., *Studiul eroziunii prin cavitație a unui oțel martensitic folosit în turnarea rotoarelor de turbină hidraulică*, A patra conferință a hidroenergeticienilor din România, Dorin Pavel, 26-27 mai 2006.
- [20] Bordeasu I., Popoviciu M. O., Bălășoiu V., Jurchela A. D., Karabenciov A., *Influence of the vibratory test facility type and parameters upon the cavitation erosion evolution*, Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – Vol. II, Editura Politehnica, Timișoara, 2010.
- [21] Bordeasu I., Popoviciu M. O., Mitelea I., Bălășoiu V., *Cavitation eroded zones analysis for G-X5 CrNi 13.4 stainless steel*, Special Issue of the Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Mechanics - Proceedings of The International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments “HME 2008”, Timișoara, 16-17 Octombrie 2008, ISSN 1224-6077, pag. 413÷420, Timișoara, 2008.
- [22] Bordeasu I., Șerban V. A., Vodă M., Codrean C., *Cavitation erosion for G-X5CrNi13-14 martensitic stainless steel with various heat treatments*, The 6th Internatinal Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, Special issue, pag. 259÷264, Timișoara, 2004.
- [23] Bosioc A. I., *Controlul curgerii cu rotație în conul tubului de aspirație al turbinelor hidraulice*, Teză de doctorat, Timișoara, ISSN 1842-4937, ISBN 978-606-554-252-5, 2011.
- [24] Câmpian V. C., *Curs general de turbopompe*, Editura Eftimie Murgu, ISBN 973-99416-8-0, Reșița, 2000.
- [25] Câmpian V. C., *Turbine hidraulice de mică putere și microturbine. Principii de funcționare. Soluții constructive*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 973-638-036-X, Timișoara, 2003.
- [26] Chen H., Li J., Liu S., Chen D., Wang J., *Affected zone generated around the erosion pit on carbon steel surface at the incipient stage of vibration cavitation*, Chinese Science Bulletin, vo. 53, no. 6, pag. 943÷947, March 2008.
- [27] Ciubotariu R., Șerban V. A., Frunzăverde D. Mărginean G., Câmpian V., *Comparative study regarding the repair techniques for protection against cavitation*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 55 (69), pag. 11÷14, Spec. Iss. S1, Timișoara, 2010.
- [28] Cojocar V., Balint D., Câmpian C.V., Nedelcu D., Jianu C., *Numerical Investigations of Flow on the Kaplan Turbine Runner Blade Anticavitation Lip with Modified Cross Section*, „Recent Researches in Mechanics”, Proceedings of the 2nd International Conference on Theoretical and Applied Mechanics 2011 (TAM '11), ISBN 978-1-61804-020-6, pag. 215÷218, Corfu Island, Greece, 2011.
- [29] Cojocar V., Câmpian V. C., Balint D., *Numerical Analysis of Flow in Kaplan Turbine Runner Blades Anticavitation Lip with Modified Hydrodynamic Profile*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XVIII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pag. 229÷234, Reșița, 2011.

- [30] Cojocaru V., Câmpian C.V., Frunzaverde D., Ion I., Cuzmos A., Dumbrava C., *Laboratory tests concerning the influence of surface hardening on the cavitation erosion resistance*, Proceedings of 3rd WSEAS International Conference On Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '10), ISSN 1792-4294, ISBN 978-960-474-203-5, pag. 210÷213, Corfu, 2010.
- [31] Cojocaru V., Câmpian C.V., Frunzăverde D., Micloșină C.O., *Residual Stresses Analysis of Weld Overlays Coatings Used for the Repairs at Kaplan Turbine Runner Blades Areas Damaged by Cavitation Erosion*, „Recent Researches in Environment, Energy Planning and Pollution”, Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Renewable Energy Sources (RES '11), ISBN 978-1-61804-012-1, pag. 225÷228, Iași, 2011.
- [32] Cojocaru V., Câmpian V. C., Micloșină C. O., *Experimental Analysis of Residual Stresses in Samples of Austenitic Stainless Steel Welded on Martensitic Stainless Steel Used for Kaplan Blades Repairs*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XVIII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pag. 161÷166, Reșița, 2011.
- [33] Cojocaru V., Frunzaverde D., Câmpian C.V., Marginean G., Ciubotariu R., Pittner A.M., *Cavitation erosion investigations on thermal spray coatings*, Proceedings of 3rd WSEAS International Conference On Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG '10), ISSN 1792-4294, ISBN 978-960-474-203-5, pag. 177÷180, Corfu, 2010.
- [34] Cosma C., Cioancă C., Stan D., *Improvement of the quality for plastic parts. Reverse engineering applications*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 56 (70), pag. 18÷22, Iss. 2, Timișoara, 2011.
- [35] Cziple A. F., *Coroziune și protecție anticorozivă*, Editura Eftimie Murgu, ISBN 978-973-1906-08-9, Reșița, 2009.
- [36] Dimian M. E., Mitelea I., Bordeasu, I., *Opportunities to increase the cavitation resistance of titanium alloys*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 55 (69), pag. 25÷32, Spec. Iss. S1, Timișoara, 2010.
- [37] Dimian M. E., Mitelea I., Bordeasu, I., *Phenomenological aspects of cavitation Ti-6Al-4V alloy*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 56 (70), pag. 10÷12, Iss. 2, Timișoara, 2011.
- [38] Dojčinović M., Erić O., Rajnović D., Sidjanin L., Baloš S., *The morphology of ductile cast iron surface damaged by cavitation*, Metall. Mater. Eng., vol. 18 (3), pag. 165÷176, 2012.
- [39] Domșa Ș., *Selecția și proiectarea materialelor*, Editura U.T.PRES, ISBN 973-662-213-4, Cluj-Napoca, 2006.
- [40] Drăgan O., Iancu C., Amza Gh., Drimer D., Isarie V., *Ultrasunete de mari energii*, Editura Academiei Republicii Socialiste România, București, 1983.
- [41] Farzam M., *Cavitation Process and the Performance of Some Ferrous and Non-Ferrous Alloys*, Iranian Journal of Chemical Engineering (IACHE), vol. 5, no. 1 (Winter), pag. 34÷50, 2008.
- [42] Fu W.T., Yang Y.B., Jing T.F., Zheng Y.Z., Yao M., *The Resistance to Cavitation Erosion of CrMnN Stainless Steels*, Journal of Materials Engineering and Performance volume 7(6), pag. 801-804, december 1998.
- [43] Frunzăverde D., *Tratamente termice. Curs pentru studenți*, Editura Intergraf, ISBN 973-97258-3-27, Reșița, 2002.
- [44] Frunzăverde D., Brandl W., *Metalografie practică*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 978-973-638-321-2, Timișoara, 2007.
- [45] Frunzăverde D., Câmpian C.V., Cojocaru V., Mărginean G., Băran M., Ciubotariu R., *Influence of welded layers thickness on the cavitation erosion resistance*, Proceedings of 6th WSEAS International Conference on Energy, Environment, Ecosystems and Sustainable

Development (EEESD '10), ISSN 1792-5924 / ISSN 1792-5940, ISBN 978-960-474-237-0, pag. 316÷320, Timișoara, 2010.

[46] Ghiban B., Mânzână M. E., Bordeasu I., Ghiban N., Marin M., *Structural analysis for brase and bronze through cavitation*, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Transactions on Mechanics, vol. 55 (69), pag. 63÷66, Spec. Iss. S1, Timișoara, 2010.

[47] Ghiban B., Mânzână M. E., Bordeasu I., Ghiban N., Marin M., Miculescu M., *Cavitation behaviour of martensitic stainless steel*, Scientific Bulletin of the "Politehnica" University of Timisoara, Transactions on Mechanics, vol. 55 (69), pag. 59÷62, Spec. Iss. S1, Timișoara, 2010.

[48] Giren B. G., Steller J., *Random multistage input and energy partition approach to the description of cavitation erosion process*, Stoch Environ Res Risk Assess 23, pag. 263÷273, 2009.

[49] Hattori S., Hirose T., Sugiyama K., *Prediction Method for Cavitation Erosion Based on Measurement of Bubble Collapse Impact Loads*, The 6th International Symposium on Measurement Techniques for Multiphase Flows – Journal of Physics: Conference Series 147, 2009.

[50] 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, pag. 443÷448, 2010.

[51] Isbășoiu E. C. Gh., Georgescu S. C., *Mecanica fluidelor*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-0841-3, București, 1995.

[52] Isbășoiu E. C. Gh., Stănescu P., *Asupra cauzelor care au produs ruperea palelor rotorice ale pompelor, care echipează CET Ișalnița*, A patra conferință a hidroenergeticienilor din România, Dorin Pavel, 26-27 mai 2006.

[53] Jurchela A. D., Bordeasu I., Mitelea I., Karabenciov A., *Considerations on the effects of carbon content on the cavitation erosion resistance of stainless steel with controlled content of chromium and carbon*, METAL 2012 - 21st International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 23 – 25.05.2012.

[54] Karabenciov A., Bordeasu I., Mitelea I., Jurchela A. D., *Considerations on the cavitation erosion behavior on two stainless steels with similar rations of structural constituents*, METAL 2012 - 21st International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 23 – 25.05.2012.

[55] Kass M. D., Whealton J. H., Clapp N. E. Jr., DiStefano J. R., DeVan J.H., Haines J.R., Akerman M.A., Gabriel T.A., *Nonlinear cavitation erosion of stainless steel in mercury versus applied power*, Tribology Letters 5, pag. 231–234, 1998.

[56] Kondoh K., Umeda J., Watanabe R., *Cavitation erosion of aluminum matrix sintered composite with AlN dispersoids*, WEAR, volume 267, pag. 1511÷1515, 2009.

[57] Kondoh K., Umeda J., Watanabe R., *Cavitation resistance of powder metallurgy aluminum matrix composite with AlN dispersoids*, Materials Science and Engineering A 499, pag. 440÷444, 2009.

[58] Lee D. I., Lim H. C., *Erosion-corrosion damages of water-pump impeller*, International Journal of Automotive Technology, vol. 10, no. 5, pag. 629÷634, 2009.

[59] Li X.Y., Yan Y.G., Ma L., Xu Z.M., Li J.G., *Cavitation erosion and corrosion behavior of copper–manganese–aluminum alloy weldment*, Materials Science and Engineering A 382, pag. 82÷89, 2004.

[60] Liu X.W., Söderberg O., Koho K., Lanska N., Ge Y., Sozinov A., Lindroos V.K., *Vibration cavitation behaviour of selected Ni–Mn–Ga alloys*, WEAR, volume 258, pag. 1364÷1371, 2005.

[61] Long N., Zhu J., *Formation of nanocrystallized and amorphous structures in the cavitation-eroded surface for Ti3Al–Nb alloy*, Materials Science and Engineering A 420, pag. 276÷278, 2006.

- [62] Lu J., Zum Gahr K. H., Schneider J., *Microstructural effects on the resistance to cavitation erosion of ZrO₂ ceramics in water*, WEAR, volume 265, pag. 1680÷1686, 2008.
- [63] Luo S., Zheng Y., Liu W., Jing H., Yao Z., Ke W., *Cavitation Erosion Behavior of CrMnN Duplex Stainless Steel in Distilled Water and 3% NaCl Solution*, J. Mater. Sci. Technol., vol. 19, no. 4, pag. 346÷350, 2003.
- [64] Lupinca C. I., *Bazele elaborării aliajelor neferoase*, Curs universitar, Editura Eftimie Murgu, Reșița, 2004.
- [65] Lupinca C. I., *Procesarea materialelor nemetalice*, Colecția ORIZONTURI TEHNICE, Editura Eftimie Murgu, ISBN 978-606-631-002-4, Reșița, 2011.
- [66] Mann B.S., Arya V., Pankaj J., *Advanced High-Velocity Oxygen-Fuel Coating and Candidate Materials for Protecting LP Steam Turbine Blades Against Droplet Erosion*, Journal of Materials Engineering and Performance, volume 14 (4), pag. 487÷494, August 2005.
- [67] Mănescu T. Ș., Jiga G. G., Zaharia N. L., Bîtea C. V., *Noțiuni fundamentale de rezistența materialelor*, Editura Eftimie Murgu, ISBN 978-973-1906-04-1, Reșița, 2008.
- [68] Mănescu T. Ș., Nedelcu D., *Analiza structurală prin metoda elementului finit*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 973-638-217-6, Timișoara, 2005.
- [69] Mănescu T. Ș., Stroia M. D., Crăciun C. A., Mănescu T. Jr., *Aplicații practice de rezistența materialelor*, Editura Eftimie Murgu, ISBN 978-973-1906-19-5, Reșița, 2009.
- [70] Mânzână M. E., Ghiban B., Ghiban N., Bordeasu I., Miculescu F., Marin M., *Different Aspects of Cavitation Damages in Some Stainless Steels*, ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XVIII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pag. 93÷99, Reșița, 2011.
- [71] Mânzână M. E., Ghiban B., Ghiban N., Bordeasu I., Miculescu F., Mitrea S., Marin M., *Structural Analysis of Cavitation for Different Stainless Steels*, ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XVIII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pag. 100÷106, Reșița, 2011.
- [72] Necker J., Aschenbrenner T., *Model Test and CFD calculation of a cavitating bulb turbine*, Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – Vol. II, pag. 507÷514, Editura Politehnica, Timișoara, 2010.
- [73] Nedelcu D., *Aplicații 2D/3D de proiectare asistată de calculator*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 973-638-037-8, Timișoara, 2003.
- [74] Nedelcu D., *Microsoft Excel. Concepte teoretice și aplicații*, Editura Orizonturi Universitare, ISBN 973-638-008-4, Timișoara, 2003.
- [75] Nedelcu D., *Proiectarea asistată de calculator prin MICROSTATION*, Editura Eurostampa, ISBN 973-8244-03-X, Timișoara, 2001.
- [76] Nedelcu D., *Proiectare și simulare numerică cu SOLIDWORKS*, Editura Eurostampa, ISBN 978-606-569-276-3, Timișoara, Septembrie 2011.
- [77] Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., *Numerical behavior reproduction of a truss structure and beam, subjected to concentrated load*, ANALELE UNIVERSITĂȚII "EFTIMIE MURGU", ANUL XVII, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2010.
- [78] Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloaie R. C., *The Aerodynamic Force Calculus for a Plate Immersed in a Uniform Air Stream Using SolidWorks Flow Simulation Module*, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Finite Differences-Finite Elements-Finite Volumes-Boundary Elements (F-and-B '11), pag. 98÷103, ISBN 978-960-474-298-1, Paris, 28-30.04.2011.
- [79] Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloaie R. C., *The Hydrodynamic Characteristics Calculus for Isolated Profile Go428 using Solidworks Flow Simulation Module*, Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Finite Differences-Finite Elements-Finite Volumes-Boundary Elements (F-and-B '11), pag. 92÷97, ISBN 978-960-474-298-1, Paris, 28-30.04.2011.

- [80] Nedelcu D., Ianici D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Pop F. M., Avasiloaie R. C., *Calculul forței aerodinamice și distribuției de presiuni pentru un coș vertical*, ȘTIINȚA ȘI TEHNICĂ, an XI, vol. 20, pag. 269÷276, ISSN 2067-7138, București, 2011.
- [81] Nedelcu D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., *The Kinematic and Dynamic Analysis of the Crank Mechanism with SolidWorks Motion*, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on SIGNAL PROCESSING, COMPUTATIONAL GEOMETRY and ARTIFICIAL VISION (ISCGAV '11), pag. 245÷250, ISBN: 978-1-61804-027-5, Florence, 23-25.04.2011.
- [82] Nedelcu D., **Nedeloni M. D.**, Daia D., Florea D., *Studiul numeric al concentratorului de tip racordare pentru o placă de secțiune dreptunghiulară supusă solicitării de întindere*, ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ, an XII, vol. 21, pag. 613÷620, ISSN 2067-7138, București, 2012.
- [83] Nedelcu D., Pop F. M., Cojocaru V., Hopota A., *Prototiparea rapidă a unui rotor Pelton*, ȘTIINȚĂ ȘI TEHNICĂ, an XII, vol. 22, pag. 335÷342, ISSN 2067-7138, București, 2012.
- [84] **Nedeloni M.D.**, *Calibration Tests of a Sonotrode and Cavitation Erosion Research through Indirect Cavitation Method For A Steel*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012.
- [85] **Nedeloni M.D.**, Cojocaru V., Ciubotariu R., Nedelcu D., *Cavitation Erosion Tests Performed by Indirect Vibratory Method on Stainless Steel Welded Samples with Hardened Surface*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012.
- [86] **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., *Research through Direct and Indirect Cavitation Method for a Aluminum Specimen*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XIX, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, Reșița, 2012.
- [87] **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., *Variants of sonotrode for a vibratory apparatus for test cavitation erosion by the indirect method*, Constanta Maritime University Annals, Vol.17, Year XIII, July 2012.
- [88] **Nedeloni M.D.**, Nedelcu D., Ion I., Ciubotariu R., *Calibration of a sonotrode from a stand component for test cavitation erosion through direct method*, Constanta Maritime University Annals, Vol.17, Year XIII, July 2012.
- [89] Niebuhr D., *Cavitation erosion behavior of ceramics in aqueous solutions*, WEAR, volume 263, pag. 295÷300, 2007.
- [90] Nikitenko G. I., *Studies to reduce cavitation erosion of the impellers in the hydro turbines at the sayano-shushenskoe hydroelectric plant*, Hydrotechnical Construction, vol. 32, no. 9, pag. 570÷573, 1998.
- [91] Oancă O., Pasca N., Bordeasu I., Mitelea I., *Horn failure analysis from titan alloys used in ultrasonic cavitation process*, METAL 2012 - 21st International Conference on Metallurgy and Materials, Brno, Czech Republic, 23 – 25.05.2012.
- [92] Oprea T., Naianu B., Ionescu M., Popescu E., Lacatusu T., *Creșterea performanțelor energetice ale CHE Porțile de Fier I prin retehnologizarea și monitorizarea echipamentelor*, Forumul Regional al Energiei – FOREN 2008, Neptun, 15 – 19.06.2008.
- [93] Pădurean I., *Cercetări asupra măririi rezistenței la eroziune cavitațională a rotoarelor de turbină turnate din oțeluri inoxidabile*, Teză de doctorat, Timișoara, 2005.
- [94] Pădurean I., *Influence of structural state on cavitation erosion of austenitic stainless steel solution treatment and nitriding*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transactions on Mechanics, vol. 52 (66), pag. 1÷4, Fasc. 1, Timișoara, 2007.
- [95] Pădurean I., *Experimental researches upon cavitation erosion resistance of the austenitic stainless steel heat treating by solution treatment and nitriding*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transactions on Mechanics, vol. 52 (66), pag. 1÷6, Fasc. 1, Timișoara, 2007.

- [96] Pădurean I., *The influence of various regimes of heat processing on the erosion resistance of the austenitic stainless steel*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 56 (70), pag. 5÷8, Iss. 2, Timișoara, 2011.
- [97] Pădurean I., Bordeasu I., Velescu C., Oancă O., *Researches regarding the cavitation erosion resistance of the austenitic stainless steel GX5CrNi 19-10 from zones reconditioned by welding*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Méc. Appl., Tome 52, No. 1, pag. 15÷26, Bucurest, 2007.
- [98] Pădurean I., Nedelcu D., Câmpian V., Bordeasu I., Oancă O., *Influence of structural state upon the cavitation erosion of GX5CrNi19-10 austenitic stainless steel subjected to solution treatment*, Rev. Roum. Sci. Techn. – Méc. Appl., Tome 53, No. 1, pag. 3÷7, Bucurest, 2008.
- [99] Pădurean I., Nedelcu D., Fay A., Micloșină C., *Influence of the heat treatment to the cavitation erosion resistance of austenitic stainless steel*, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transactions on Mechanics, vol. 53 (67), pag. 20÷25, Fasc. 4, Timișoara, 2008.
- [100] Pădurean I., Trușculescu M., Nedelcu D., Megheleş O., Popoviciu M., Hoța I., *About Influences of the Structural State in Cavitation Erosion Resistance of Thermally Treated Austenitic Stainless Steels*, Special Issue of the Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Mechanics - Proceedings of The International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments “HME 2008”, Timișoara, 16-17 Octombrie 2008, ISSN 1224-6077, pag. 437÷440, Timișoara, 2008.
- [101] Pădurean I., Trușculescu M., Nedelcu D., Megheleş O., Popoviciu M., Pădurean E., *Research upon Cavitation Erosion Resistance of Heat Treated Martensitic Stainless Steels*, Special Issue of the Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Mechanics - Proceedings of The International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments “HME 2008”, Timișoara, 16-17 Octombrie 2008, ISSN 1224-6077, pag. 429÷436, Timișoara, 2008.
- [102] Piroi I., Cziple F., Pomoja F., *Conversia energiei regenerabile a apei, pământului și a deșeurilor organice*, Colecția ORIZONTURI TEHNICE, Editura Eftimie Murgu, Reșița, 2010.
- [103] Pochylý F., Fialová S., Kozubková M., Zavadil L., *Assessment of cavitation creation depending on the surface wettability*, Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – Vol. II, pag. 839÷846, Editura Politehnica, Timișoara, 2010.
- [104] Popovici Gh., *Tehnologia construcțiilor de mașini – Proiectarea tehnologică*, Editura Didactică și Pedagogică, ISBN 978-973-30-2897-0, București, 2010.
- [105] Popoviciu M. O., Bordeasu I., *Cavitation erosion qualities of 40Cr10 steel*, Special Issue of the Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara, Transaction on Mechanics - Proceedings of The International Conference on Hydraulic Machinery and Equipments “HME 2008”, Timișoara, 16-17 Octombrie 2008, ISSN 1224-6077, pag. 445÷452, Timișoara, 2008.
- [106] Popoviciu M. O., Bordeasu I., *Necesitatea valorificării micropotențialului hydraulic în România*, Buletinul AGIR – Energii alternative, nr.3, ISSN-L 1224-7928, pag. 62÷68, iulie-septembrie, 2007.
- [107] Potoceanu N., *Elemente de proiectare a tratamentelor termice și termochimice*, Editura „Eftimie Murgu”, ISBN 973-8286-27-1, Reșița, 2002.
- [108] Rădulea R., *The Influence of Metallic and Non-Metallic Inclusions on the Characteristics of Non-Ferrous Alloys Al-Si*, ANALELE UNIVERSITĂȚII “EFTIMIE MURGU”, ANUL XIV, NR. 1, ISSN 1453 - 7397, pag. 157÷164, Reșița, 2007.
- [109] Rigou I. V., *Cercetări asupra covoarelor de protecție supuse la solicitări mecanice variabile și probe de duranță pentru folosirea lor în sistemele de protecție și avertizare ale agregatelor energetice de mare putere*, Teză de doctorat, Reșița, 2012.
- [110] Scheffel M., Știucă P. Gr., *Dispozitive ultraacustice și optice, vol. I*, Editura Tehnică, ISBN 973-31-0795-6, ISBN 973-31-0795-4, București, 1996.

- [111] Shi Q., *Hydraulic design of Three Gorges right bank powerhouse turbine for improvement of hydraulic stability*, Proceedings of the 25th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems – Vol. II, Editura Politehnica, Timișoara, 2010.
- [112] Șerban V. A., Răduță A., *Știința și ingineria materialelor*, Editura Politehnica, ISBN (10) 973-625-322-8, ISBN (13) 978-973-625-322-5, Timișoara, 2006.
- [113] Soyama H., Futakawab M., *Estimation of incubation time of cavitation erosion for various cavitating conditions*, Tribology Letters, vol. 17, no. 1, pag. 27÷30, july 2004.
- [114] Tang C. H., Cheng F. T., Man H. C., *Effect of laser surface melting on the corrosion and cavitation erosion behaviors of a manganese-nickel-aluminium bronze*, Materials Science and Engineering A, no. 373, pag. 195÷203, 2004.
- [115] Tang C. H., Cheng F. T., Man H. C., *Improvement in cavitation erosion resistance of a copper-based propeller alloy by laser surface melting*, Surface and Coatings Technology, no. 182, pag. 300÷307, 2004.
- [116] Trușculescu M., Vârtosu A., Pascu R., *Materialotehnica Vol. III – Materiale folosite în construcția de mașini, instalații și scule*, Editura Politehnica, ISBN 978-973-625-575-5 (vol. III), Timișoara, 2008.
- [117] Trușculescu M., Huțiu Gh., *Materialotehnica Vol. IV – Metale și aliaje neferoase*, Editura Politehnica, ISBN 978-973-625-852-7 (vol. IV), Timișoara, 2009.
- [118] Trușculescu M., Pădurean I., Demian G., *Influence of structural state on cavitation erosion of GX4CrNi13-4 stainless steel*, Xth Edition Timisoara Academic Days International Symposium Engineering Materials New Horizons And Processing Techniques, Scientific Bulletin of the “Politehnica” University of Timisoara Transactions on Mechanics, vol. 52 (66), pag. 1÷6, Fasc. 2, Timișoara, 2007.
- [119] Vasiliu N., Vasiliu D., Seteanu I., Rădulescu V., *Mecanica fluidelor și sisteme hidraulice. Fundamente și aplicații - Vol.II*, Editura Tehnică Universitaria, ISBN 973-31-1316-6, București, 1999.
- [120] Xia Z., Zhang X., Song J., *Erosion-Resistance of Plasma Sprayed Coatings*, Journal of Materials Engineering and Performance, volume 8(6), pag. 716÷718, december 1999.
- [121] Yang L. M., Tieu A.K., Dunne D.P., Huang S.W., Li H.J., Wexler D., Jiang Z.Y., *Cavitation erosion resistance of NiTi thin films produced by Filtered Arc Deposition*, WEAR, volume 267, pag. 233÷243, 2009.
- [122] *** AMPTIAC Document Number: AM026041, *Corrosion-Resistant Seawater Valves*, Tri-Service Corrosion Conference, 1999.
- [123] *** ASTM Standard G32-92 (1992), *Standard Method of Vibratory Cavitation Erosion Test*. Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03. 02, ASTM, Philadelphia, 1992.
- [124] *** ASTM G32 – 10, *Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus*, Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States, 2010.
- [125] *** SolidWorks® Bible, Published by Wiley Publishing, Inc. 10475 Crosspoint Boulevard Indianapolis, IN 46256, Copyright © 2009 by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana, Published by Wiley Publishing, Inc., Indianapolis, Indiana Published simultaneously in Canada, ISBN: 978-0-470-25825-5, www.wiley.com, 2009.
- [126] *** TELSONIC, *Operating Instructions Cavitations Test Equipment DG 2000*, www.telsonic.com, 2007.
- [127] <http://www.cchapt.ro/>

Curriculum vitae Europass



Informații personale

Nume / Prenume **Nedeloni, Marian-Dumitru**
 Adresă(e) Alea Narcisei, nr. 6, sc. 3, et. 2, ap. 10, Reșița, cod poștal 320145, România
 Telefon(oane) Mobil: 0735. 689. 483
 E-mail(uri) m.nedeloni@uem.ro cs88rai@yahoo.com
 Naționalitate(-tăți) Română
 Data nașterii 15. 08. 1985
 Sex Masculin

Locul de muncă vizat / Domeniul ocupațional

Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița

Experiența profesională

Perioada **Octombrie 2011 - prezent**

Funcția sau postul ocupat Asistent universitar

Activități și responsabilități principale

- o Predare activități de seminar la disciplinele: Managementul cercetării și dezvoltării produselor, Ecologie și protecția mediului (2011 - 2012), Comunicare managerială (2011 - 2012), Management financiar (2011 - 2012), Bazele economiei (octombrie 2012 - prezent), Marketing (octombrie 2012 - prezent), Practică pedagogică I (octombrie 2012 - prezent);
- o Predare activități de laborator la disciplinele: Ingineria sistemelor mecanice, Organe de mașini, Prelucrarea datelor și sisteme informatice în domeniul economic (octombrie 2012 - prezent);
- o Predare activități de proiect la disciplina: Organe de mașini.

Numele și adresa angajatorului Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, Facultatea de Inginerie și Management

Tipul activității sau sectorul de activitate Învățământ

Perioada **Octombrie 2009 – septembrie 2011**

Funcția sau postul ocupat Cadru didactic asociat – preparator universitar

Activități și responsabilități principale Predare la următoarele discipline: Managementul cercetării și dezvoltării produselor (activitate de seminar și proiect), Managementul mediului (activitate de seminar), Ecologie și protecția mediului (activitate de seminar – perioada 2010-2011)

Numele și adresa angajatorului Universității „Eftimie Murgu” din Reșița, Facultatea de Inginerie

Tipul activității sau sectorul de activitate Învățământ

Perioada **Mai – Iulie 2008**

Funcția sau postul ocupat Operator calculator date

Activități și responsabilități principale Operare calculator

Numele și adresa angajatorului Agenția de Plăți și Intervenție în Agricultură (A.P.I.A.)

Tipul activității sau sectorul de activitate Agricultură, Silvicultură și Pescuit

Educație și formare

Perioada **2009 - prezent**

Calificarea / diploma obținută Doctorand în domeniul Inginerie Mecanică, Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, Facultatea de Mecanică și Ingineria Materialelor

Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite Tehnici de proiectare asistată în ingineria mecanică, Teoria Elasticității și Plasticității, Managementul Proiectelor de Cercetare

Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, Facultatea de Mecanică și Ingineria Materialelor

Perioada **2004 - 2009**
 Calificarea / diploma obținută Diplomă de Inginer – Profilul Inginerie și Management, specializarea: Inginerie Economică în Domeniul Mecanic
 Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite Tehnologia și studiul materialelor, Organe de mașini, Mecanica fluidelor, Desen tehnic și grafică industrială, Economie generală, Organizarea producției, Robotică
 Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, Facultatea de Inginerie

Perioada **2000 - 2004**
 Calificarea / diploma obținută Diplomă de bacalaureat și certificat de competențe profesionale – Profilul „Turism și Alimentație publică”
 Disciplinele principale studiate / competențe profesionale dobândite Matematică, Economia întreprinderii, Limba germană
 Numele și tipul instituției de învățământ / furnizorului de formare Colegiul Economic al Banatului Montan Reșița

Aptitudini și competențe personale

Limba(i) maternă(e) Română

Limba(i) străină(e) cunoscută(e)

Autoevaluare

Nivel european (*)

Limba germană

Limba engleză

1. Lb. Germană; 2. Lb. Engleză.												
		Înțelegere				Vorbire				Scriere		
		Ascultare		Citire		Conversație		Discurs oral				
	B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent	
	B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent		B1	Utilizator independent	

Competențe și abilități sociale Seriozitate, spirit de echipă, capacitate de a lucra sub stres

Competențe și aptitudini tehnice Cunoștințe PC

Competențe și aptitudini de utilizare a calculatorului Cunoștințe Microsoft Office (Word, PowerPoint și Excel), cunoștințe CAD: Autodesk Inventor, AutoCad, Solid Edge și Solid Works

Alte competențe și aptitudini Hobby: Sportul

Permis(e) de conducere Categoria B (4 ani)

Informații suplimentare

- Participare în calitate de organizator la „Simpozionului studențesc internațional Creativitatea tinerilor – Tradiție a Banatului Montan”, ediția a XI-a, Reșița, 15.04.2011;
- Coautor la 12 lucrări științifice elaborate în cadrul conferințe naționale și internaționale;
- Membru în organizații științifice sau profesionale naționale: Asociația Română de Tensometrie (ARTENS); Societatea de Robotică din România, Filiala REȘIȚA (SRR); Societatea pentru Tehnologii Computaționale (Society for Computing Technologies); Asociația Generală a Inginerilor din România, Filiala CS (AGIR);
- Certificat de absolvire – Studii psihopedagogice în regim postuniversitar, nivel I și nivel II;
- Certificat de absolvire – „Specialist în domeniul proiectării asistate de calculator”;
- Certificat de participare „Consultanță în vederea începerii unei afaceri”, derulat în cadrul proiectului „Calificare și competență – premise pentru succes și dezvoltare”;
- Certificat de participare la programul de instruire „Bazele Limbii Germane”;
- Certificat „Youthpass” for Training Courses; participated in an activity funded by the EU „Youth in Action” Programme;
- Certificat de participare în cadrul proiectului „Centre for increasing competitiveness of SME in border region”;
- Diplomă de participare – „Linux Administration: Implementation”;
- Bursă SOCRATES-ERASMUS – în vederea realizării lucrării de licență, perioada Martie - August 2009, Gelsenkirchen, GERMANIA.

Anexe



Europass Curriculum Vitae



Personal information

First name(s) / Surname(s) **Nedeloni, Marian-Dumitru**
Address(es) Narcisei Alley, no. 6 / 2 / 10, Resita, postal code 320145, Romania
Telephone(s) Mobile: 0735. 689. 483
E-mail m.nedeloni@uem.ro cs88rai@yahoo.com
Nationality Romanian
Date of birth 15 august 1985
Gender Male

Desired employment / Occupational field

University "Eftimie Murgu" of Resita

Work experience

Dates October 2011 - present

Occupation or position held Assistant Professor
Main activities and responsibilities

- o Teaching seminar activities in the following disciplines: Research and product development management, Ecology and Environment (2011 – 2012), Managerial Communication (2011 – 2012), Financial Management (2011 – 2012), economic foundations (October 2012 – present), Marketing (October 2012 – present), teaching practice I (October 2012 – present);
- o Teaching laboratory activities in the following disciplines: Mechanical Systems Engineering, Machine, Data processing and information systems in business (October 2012 – present);
- o Teaching project activities in: Machine.

Name and address of employer University "Eftimie Murgu" of Resita, Faculty of Engineering and Management
Type of business or sector Education

Dates October 2009 - September 2011

Occupation or position held Associate Professor
Main activities and responsibilities Teaching the following disciplines: Management research and product development (seminar and project work), Environmental Management (seminar participation), Ecology and the Environment (seminar work for 2010-2011)

Name and address of employer University "Eftimie Murgu" of Resita, Faculty of Engineering
Type of business or sector Education

Dates May-July 2008

Occupation or position held Computer operator data
Main activities and responsibilities Computer operating
Name and address of employer Agency for Payments and Intervention in Agriculture (APIA)
Type of business or sector Agriculture, Forestry and Fisheries

Education and training

Dates 2009 - present

Title of qualification awarded PhD student in Mechanical Engineering, University "Eftimie Murgu" of Resita, Department of Mechanical and Materials Engineering
Principal subjects/occupational skills covered Aided design techniques in mechanics engineering, Elasticity and plasticity theory, Project Management Research
Name and type of organisation providing education and training University "Eftimie Murgu" of Resita, Department of Mechanical and Materials Engineering

Dates 2004 - 2009

Title of qualification awarded Diploma Engineer - Profile of Engineering and Management, specialization: Economic Engineering in Mechanical Field

Principal subjects/occupational skills covered Technology and research materials, Machine, Fluid Mechanics, Technical Drawing and industrial graphics, Economics, Organization of production, Robotics

Name and type of organisation providing education and training University "Eftimie Murgu" of Resita, Faculty of Engineering

Dates 2000 - 2004

Title of qualification awarded Baccalaureate degree and certificate of professional competence - Profile "Tourism and catering"

Principal subjects/occupational skills covered Mathematics, Enterprise economy, German

Name and type of organisation providing education and training Mountainous Banat Economic College of Resita

Personal skills and competences

Mother tongue(s) Romanian

Other language(s)

1. German; Lb. English.

Self-assessment

European level (*)

Language

Language

1. German; Lb. English.										
	Understanding				Speaking				Writing	
	Listening		Reading		Spoken interaction		Spoken production			
	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user
	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user	B1	Independent user

Social skills and competences Seriousness, team spirit, ability to work under stress

Technical skills and competences PC knowledge

Computer skills and competences Knowledge of Microsoft Office (Word, PowerPoint and Excel), knowledge of CAD: Autodesk Inventor, AutoCAD, Solid Edge and Solid Works

Other skills and competences Interests: Sport

Driving licence Category B (for 4 years)

Additional information

- I participated as an organizer in the "International Symposium Creativity young student - Tradition of Mountainous Banat", Eleventh Edition, Resita, 15.04.2011;
- Co-author of scientific papers developed within national and international conferences;
- Member of the scientific or national professional organizations: Romanian Association of Tensometry; Robotics Society of Romania, Branch Resita; Society for Computational Technologies; General Association of Engineers in Romania, Branch Caras Severin County;
- Graduation Certificate - pedagogical studies under graduate level I and level II;
- Certificate of graduation - "Specialist in computer aided design";
- Certificate of Participation "To start a business consulting", developed within the project "Qualification and competence - prerequisites for success and development";
- Certificate of participation in the training program "Fundamentals of German";
- Certificate "Youthpass" for Training Courses, participated in year Funded by the EU activity "Youth in Action" Programme;
- Certificate of participation in the project "Centre for Increasing Competitiveness of SME in the border region";
- Certificate of participation - "Linux Administration: Implementation";
- SOCRATES-ERASMUS scholarship - to achieve the diploma, from March to August 2009, Gelsenkirchen, Germany.

Annexes

Resita, December 2012

PhD Student Eng. Marian-Dumitru Nedeloni