

UNIVERSITATEA POLITEHNICĂ DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA ȘTIINȚA ȘI INGINERIA MATERIALELOR



Autor: Ing. Petrișor Ovidiu ODAGIU

REZUMAT LA
TEZA DE DOCTORAT

STUDII ȘI CERCETĂRI EXPERIMENTALE PRIVIND
COMPORTAREA MECANICĂ ȘI COMPORTAREA LA EROZIUNEA
CAVITAȚIONALĂ A UNUI ALIAJ DE ALUMINIU DIN SERIA 7075

Conducători de doctorat:
Prof. habil. dr. ing. Brândușa GHIBAN
Prof.dr.ing. Ilare BORDEAȘU

COMISIE DE DOCTORAT

Președinte	Prof.dr.ing. Cristian PREDESCU	de la	Universitatea Politehnica din București
Conducători de doctorat	Prof.habil.dr.ing. Brândușa GHIBAN	de la	Universitatea Politehnica din București
	Prof.dr.ing-. Ilare BORDEAȘU	de la	Universitatea Politehnica din Timișoara
Membru	Prof.dr.ing Costică BEJINARIU	de la	Universitatea Tehnica “Gheorghe Asachi” din Iași
Membru	Prof.dr.ing. Teodor MACHEDON PISU	de la	Universitatea transilvania Brașov
Membru	Prof.habil.dr.ing. Iulian Vasile ANTONIAC	de la	Universitatea Politehnica din București

București 2023

REZUMAT

Prezenta lucrare structurată în șapte capitole și își propune realizarea și îndeplinirea următoarelor obiective în domeniul aliajelor de aluminiu tip 7075: determinarea comportării mecanice a tablelor din aliaj de aluminiu tip 7075, pe diferite grosimi, în vederea identificării reproductibilității acestora în timpul procesării la ALRO SA; determinarea influenței diferitelor tratamente termice de îmbătrânire asupra comportării mecanice a aliajului de aluminiu tip 7075; determinarea comportării la eroziunea cavitațională a aliajului de aluminiu 7075 în diferite condiții de tratament termic pentru a putea identifica mecanismele de propagare a fenomenului cavitațional, la această clasă de materiale metalice; identificarea principalelor elemente structurale care conferă acestui aliaj de aluminiu proprietăți mecanice și de rezistență la eroziunea cavitațională deosebite; Realizarea unei corelații structură - comportare mecanică - comportare la eroziunea cavitațională la aliajul de aluminiu de tip 7075. Prin realizarea lucrării autorul aduce câteva contribuții originale, respectiv: realizarea unei analize structurale complete și complexe a epruvetelor experimentale din aliaj de aluminiu tip 7075, în diferite stări structurale, fie turnat, fie laminat, urmat de diferite tratamente termice de îmbătrânire, corelată cu evaluarea rezistenței la eroziunea cavitațională și realizarea unei analize complete statistice efectuată asupra valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075, aflate în stare de livrare (T651) și grosimi diferite, care a evidențiat faptul ca procesele tehnologice aplicate au condus la obținerea unor caracteristici mecanice corespunzătoare, fără abateri de la limitele de toleranță, cu mare reproductibilitate și stabilitate.

CUVINTE CHEIE: ALIAJ DE ALUMINIUM, TRATAMENT TERMIC, ALIAJ 7075, EROZIUNE CAVITAȚIONALĂ, ANALIZĂ FRACTOGRAFICĂ

ABSTRACT

This paper structured in seven chapters aims to achieve and achieve the following objectives in the field of aluminum alloys type 7075: determining the mechanical behavior of aluminum alloy sheets type 7075, on different thicknesses, in order to identify their reproducibility during processing at ALRO SA; determination of the influence of various aging heat treatments on the mechanical behavior of aluminum alloy type 7075; determination of the cavitation erosion behavior of aluminum alloy 7075 under different heat treatment conditions in order to identify the mechanisms of propagation of the cavitation phenomenon to this class of metallic materials; identification of the main structural elements that give this aluminum alloy outstanding mechanical and cavitation erosion resistance properties; Making a correlation structure - mechanical behavior - behavior to cavitation erosion to aluminum alloy type 7075. By carrying out the paper, the author brings some original contributions, namely: carrying out a complete and complex structural analysis of experimental specimens made of aluminum alloy type 7075, in different structural states, either cast or laminated, followed by different thermal aging treatments, correlated with the evaluation of resistance to cavitation erosion and the realization of a complete statistical analysis performed on the values of mechanical characteristics of alloy sheets 7075, in delivery state (T651) and different thicknesses, which highlighted the fact that the applied technological processes led to obtaining appropriate mechanical characteristics, without deviations from tolerance limits, with high reproducibility and stability.

KEYWORDS: ALUMINUM ALLOY, HEAT TREATMENT, ALLOY 7075, CAVITATIONAL EROSION, FRACTOGRAPHIC ANALYSIS

CUPRINS

INTRODUCERE

CAPITOLUL 1: STADIUL ACTUAL AL DEZVOLTĂRII ALIAJELOR DE ALUMINIU DIN SERIA 7xxx

1.1 Cercetări asupra elementelor de metalurgie fizică privind tratamentele termice de îmbătrânire aplicate aliajelor din seria 7xxx

Introducere

1.1.2. Mecanisme de durificare a aliajelor pe bază de aluminiu

1.1.3. Fenomenul de îmbătrânire în aliajele de aluminiu

1.1.4. Îmbătrânirea aliajelor din seria 7XXX

1.1.4.1. Considerații generale

1.1.4.2. Influența elementelor de aliere

1.1. 5. Tratamente de îmbătrânire aplicate aliajelor de aluminiu din seria 7xxx

1.1.5.1 Tratamente de îmbătrânire în una sau mai multe etape

1.1.5.2. Tratamente termice de retrogresie și reîmbătrânire

1.1.5.3 Proprietățile mecanice ale aliajelor de aluminiu tip 7075 după aplicarea diferitelor tratamente termice

1.2 Cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației a aliajelor de aluminiu

Generalități

CAPITOLUL 2: MATERIALUL ȘI METODICA DE CERCETARE

2.1 Materialul și aparatura utilizate în cadrul programului experimental

2.2 Programul experimental realizat în cadrul prezentei lucrări de doctorat

CAPITOLUL 3: ANALIZA STRUCTURALĂ A PROBELOR EXPERIMENTALE DIN ALIAJUL DE ALUMINIU TIP 7075

CAPITOLUL 4: COMPORTAREA MECANICĂ A ALIAJULUI DE ALUMINIU TIP 707

4.1 Evoluția statistică a caracteristicilor mecanice ale aliajului de aluminiu tip 7075, în stare turnat

4.2 Caracteristicile mecanice ale probelor din aliaje de aluminiu tip 7075 utilizate în cadrul experimentărilor din prezenta lucrare

CAPITOLUL 5: ANALIZA COMPORTĂRII LA EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ A EPRUVETELOR EXPERIMENTALE DIN ALIAJUL DE ALUMINIU TIP 7075

5.1. Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare turnat

5.1.1 Curbele și parametrii specifici. Morfologia macro și microstructurală a epruvetelor în stare turnat (Martor) - fără tratament termic

5.1.2 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor în stare turnat și îmbătrânit artificial la 160 °C cu durată de menținere de o oră

5.1.3 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor în stare turnat și îmbătrânit artificial la 160°C cu durată de menținere de 12 ore

5.1.4 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare turnat și îmbătrânit artificial la 160°C cu durată de menținere de 24 ore

5.2 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat, stare T651 și diferite tratamente termice de îmbătrânire artificială

5.2.1 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat, stare T651 (proba martor)

5.2.2 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 140°C cu durată de o oră (proba MOP)

- 5.2.3 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 140°C cu durată de 12 ore (proba MOL)
- 5.2.4 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 140°C cu durată de 24 ore (proba MOI)
- 5.2.5 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 1200C cu durată de o oră (proba MoP)
- 5.2.6 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 120°C cu durată de 12 ore (proba MoL)
- 5.2.7 Comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat (stare T651) și îmbătrânit artificial la 120°C cu durată de 24 ore (proba MoI)
- 5.2.8 Interpretarea rezultatelor și discuții comparative

CAPITOLUL 6: ANALIZA FRACTOGRAFICĂ A SUPRAFETELOR SOLICITATE LA EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ A EPRUVETELOR EXPERIMENTALE DIN ALIAJ 7075

CAPITOLUL 7: CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII ȘI PRESPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE

6.1 Concluzii

6.1.1 Concluzii desprinse din cercetările documentare

6.2 Contribuții originale

6.1.2 Concluzii finale desprinse din cercetările experimentale proprii

6.3 Direcții și perspective ale cercetărilor viitoare

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

BIBLIOGRAFIE

Capitolul 1 este intitulat „Cercetări asupra elementelor de metalurgie fizică privind tratamentele termice de îmbătrânire aplicate aliajelor din seria 7xxx”. Este realizată o sinteză documentară privind: mecanismele de durificare a aliajelor pe bază de aluminiu, fenomenul de îmbătrânire în aliajele de aluminiu, evidențierea principalelor tratamente termice de îmbătrânire a aliajelor din seria 7XXX, influența elementelor de aliere, tratamente de îmbătrânire în una sau mai multe etape, tratamente termice de retrogresie și reîmbătrânire, proprietățile mecanice ale aliajelor de aluminiu tip 7075 după aplicarea diferitelor tratamente termice. Capitolul 1 se încheie cu elemente din literatură referitoare la cercetarea comportării și rezistenței la eroziunea cavitației a aliajelor de aluminiu.

Capitolul 2 este intitulat „Materialul și metodică de cercetare” și cuprinde două subcapitole: unul destinat explicitării tipurilor de materiale și aparaturii, precum și a procedurilor experimentale utilizate în cadrul experimentărilor, și al doilea referitor la descrierea programului de cercetare realizat în vederea îndeplinirii obiectivelor prezentei lucrări, fapt ilustrat în fig. 1.

Capitolul 3 este intitulat „Analiza structurală a probelor experimentale din aliajul de aluminiu tip 7075”. Capitolul cuprinde rezultatele analizei metalografice optice și analizei de difracții cu raze X efectuate pe materialele investigate, aflate în diferite stări de tratament termice. Analiza a evidențiat următoarele aspecte structurale.

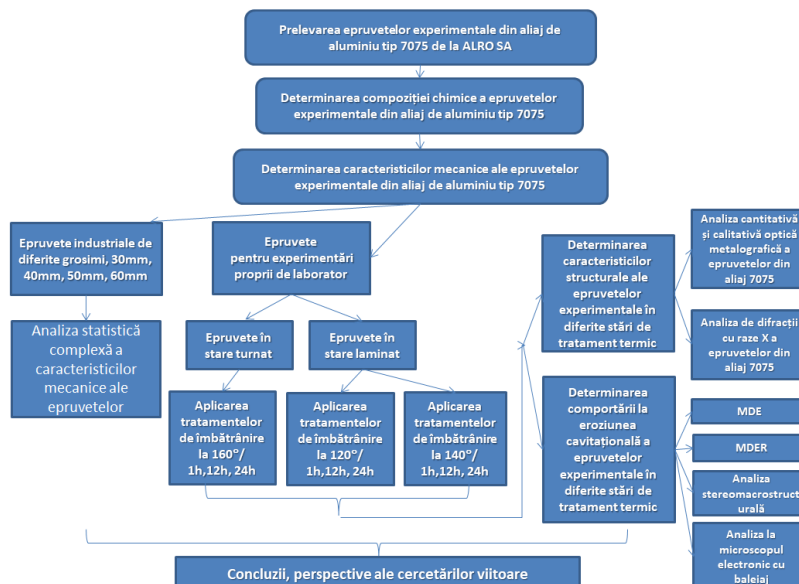


Fig. 1- Programul experimental al cercetărilor întreprinse în cadrul prezentei teze de doctorat

Structura epruvetelor din aliaj de aluminiu tip 7075, în stare turnat (**fig.2**) este alcătuită din soluție solidă α și eutectic interdendritic, precum și două tipuri de precipitate, respectiv precipitate interdendritice grosiere și precipitate fin distribuite în matrice și intradendritice. Structura dendritică este însoțită de precipitare interdendritică a eutecticului. Precipitatele interdendritice sunt de dimensiuni mari (3-5 μ m), de culoare gri, aproape cu precipitare continuă. Prin aplicarea unui tratament termic de îmbătrânire la 160°C, cu diferite durate de menținere are loc dizolvarea precipitatelor și a eutecticului și reprecipitarea fină, atât intergranular, cât și intragranular (**fig. 2b-fig.2d**). Prin creșterea duratei de menținere la 160°C, de la 1 ora, la 12 ore și 24 ore, are loc finisarea dimensiunii particulelor interdendritice și scăderea considerabilă a proiecției eutecticului, până la dispariția acestuia.

Structurile epruvetelor în stare laminat T651, fie proba martor (**fig. 3a**), fie probele cu diferite tratamente termice de îmbătrânire (**fig.3b – fig3**) sunt similare. Astfel, la epruveta martor în stare laminat, **fig. 3a**, structura este formată din soluție solidă α și precipitate fin distribuite în matrice cu orientare în direcția de laminare. Structura este tipic fibroasă. Prin aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire la 120°C, **fig. 3b- fig. 3d**, structura rămâne fibroasă, cu precipitate fin distribuite în matrice de soluție solidă α orientate în direcția de laminare. La aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire la 140°C (**fig. 3e- fig. 3g**) se remarcă creșterea grosimii dimensiunii grăunților deformați, grosimea modificându-se de la 2-4 μ m (la o durată de menținere de 1 oră), la 4-6 μ m (la o durată de menținere de 12 ore), respectiv 10-12 μ m (la o durată de menținere de 24 ore). Structurile rămân fibroase, cu precipitate fin distribuite în soluția solidă α , orientate în direcția de deformare plastică.

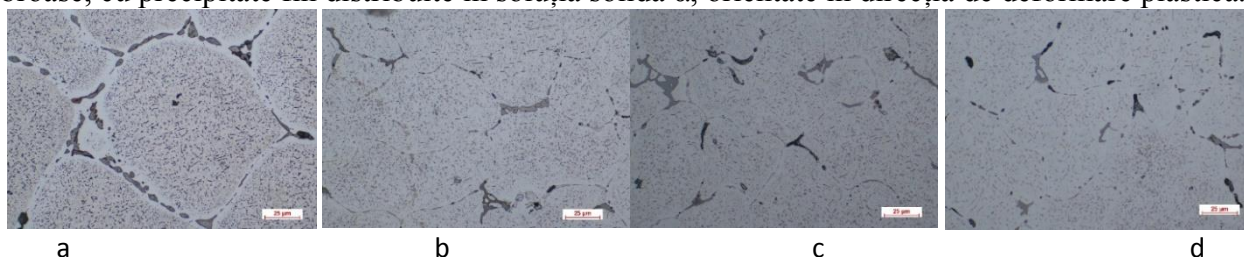


Fig. 2- Aspecte microstructurale ale epruvetelor din aliaj de aluminiu tip 7075, stare turnat (a) și diferite tratamente termice de îmbătrânire (b- 160°C/1h; c- 160°C/12h; d-160°C/24h)

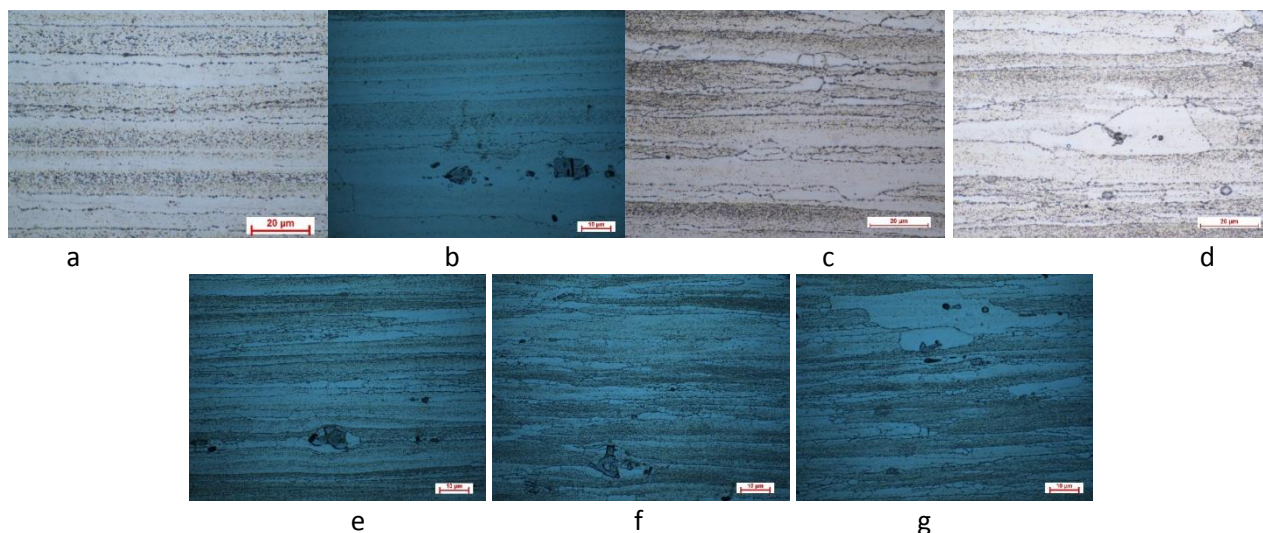


Fig. 3- Aspecte microstructurale ale epruvetelor din aliaj de aluminiu tip 7075, stare laminat (a) și tratament termic la 120 °C (b- 1h; c- 12h; d-24h) și la 140 °C (e- 1h; f- 12h; g-24h)

Analiza de difracții cu raze X vine să completeze informațiile despre natura fazică a epruvetelor experimentale din aliaj de aluminiu tip 7075, fie turnat, fie laminat T651 după aplicarea diferitelor tratamente termice. Rezultatele analizei de difracții cu raze X sunt redată în **fig. 3a**, **fig. 3b**.

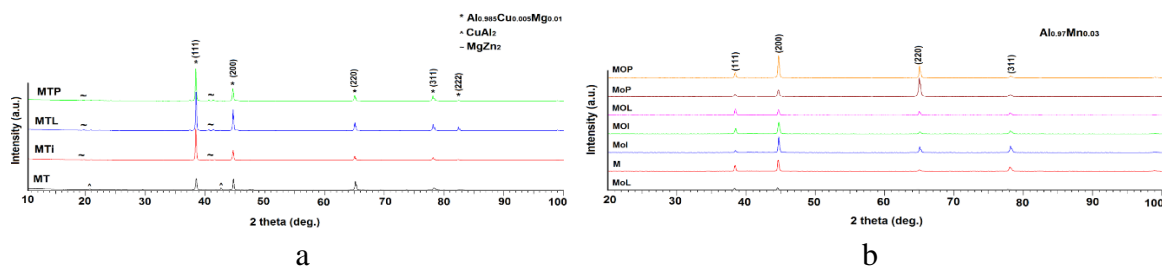


Fig.4- Analiza difractometrică a aliajului experimental în stare turnat și supus ulterior diferitelor tratamente de îmbătrânire (a) și stare laminat și tratat termic (b)

Capitolul 4 este intitulat „Analiza comportării mecanice a epruvetelor experimentale din aliajul de aluminiu tip 7075”. Capitolul cuprinde două subcapitole. În primul subcapitol, intitulat „Evoluția statistică a caracteristicilor mecanice ale aliajului de aluminiu tip 7075, în stare turnat” este realizată o analiză statistică completă asupra caracteristicilor mecanice ale unor loturi de aliaj de aluminiu tip 7075, pe parcursul unui an, determinându-se indicii de capacitate C_{PK} și de performanță P_{PK} . Rezultatele analizei statistice asupra caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075, aflate în starea T651 și diferite grosimi de table (30mm, 40mm, 50mm, respectiv 60mm) sunt prezentate comparativ în **fig. 5**, din care sunt remarcate următoarele aspecte:

- valorile rezistenței la rupere scad statistic pe măsura creșterii grosimii tablei. Astfel cea mai mare valoare a rezistenței mecanice a tablelor se înregistrează la o grosime de 30mm, respectiv 554 MPa, scade la 549MPa pentru o grosime de 40mm, scade la 545 MPa pentru o grosime de 50mm și ajunge la 539MPa pentru o grosime de 60mm. Scăderea totală a valorilor rezistenței mecanice este de 2,7%, evident încadrându-se în abaterile admisibile;
- valorile limitei de curgere scad, de asemenea, statistic pe măsura creșterii grosimei tablei. Astfel cea mai mare valoare a limitei de curgere a tablelor se înregistrează la o grosime de 30mm, respectiv 494 MPa, scade la 487MPa pentru o grosime de 40mm, scade la 482 MPa pentru o grosime de 50mm și ajunge la 475MPa pentru o grosime de 60mm. Scăderea totală a valorilor limitei de curgere este de 3,8%, evident încadrându-se în abaterile admisibile;

- valorile alungirilor A_{50} indiferent de grosimea tablelor sunt de circa 10% (respectiv 10,58% la o grosime de 30mm; 10,47% la o grosime de 40mm; 10,62% la o grosime de 50mm și de 10,38% la o grosime de 60mm. Scăderea totală a valorilor de alungire este de 2,25%;
- Valorile durtății Brinell scad sensibil cu creșterea grosimii tablelor, respectiv 167 HBW la o grosime de 30mm; 164 HBW la o grosime de 40mm; 164 HBW la o grosime de 50mm și 163 HBW la o grosime de 60mm. Scăderea totală a valorilor durtății Brinell este de 0,6%.

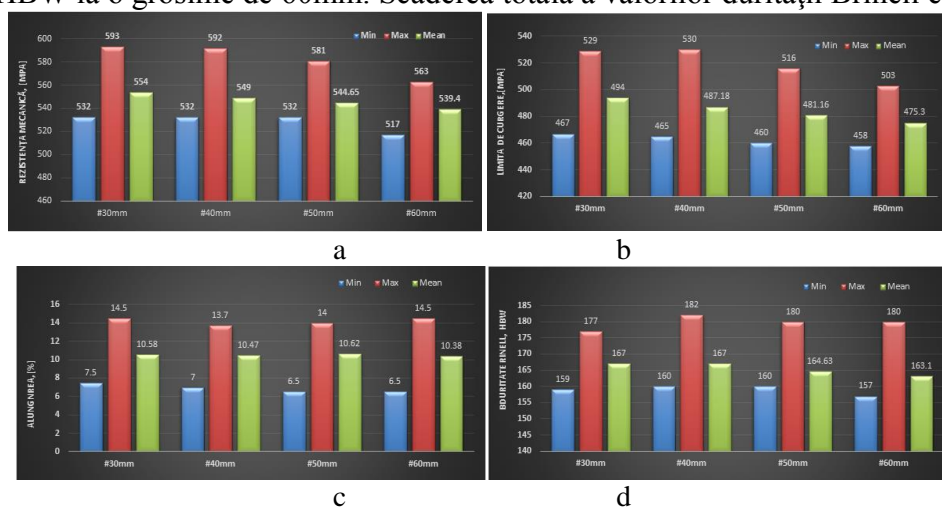


Fig.5 Valorile caracteristicilor mecanice ale produselor din 7075, după prelucrarea statistică (în starea T651 și și diferite grosimi de table): a- rezistența mecanică, b- limita de curgere, c- alungire, d- durtate HBW

Analiza detaliată a tuturor datelor referitoare la comportarea statistică a valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075 aflate în starea T651 și diferite grosimi de table (30mm, 40mm, 50mm, 60mm) arată faptul că procesele considerate sunt stabile (în control) în sensul că toate valorile X și R din fișele de control se află în interiorul limitelor de control și nu există tendințe specifice. Stabilitatea unui proces este deosebit de importantă, deoarece un proces stabil în prezent este foarte probabil să rămână stabil și pe viitor, dacă nu apar modificări majore în evoluția sa. Astfel dacă un proces este stabil, este foarte probabil ca și capacitatea sa să fie previzibilă pe baza performanței anterioare.

- Analizând datele din prisma valorilor indicelui de performanță C_{PK} , se remarcă faptul că pentru toate grosimile de table la valorile alungirilor acest indice este mai mare decât 1,33, ceea ce înseamnă că procesele sunt stabile cu o distribuție normală a valorilor. În ceea ce privește celelalte caracteristici mecanice, în puține situații acest indice este peste valoarea 1,33 (de exemplu numai valorile de limitei de curgere la table groase de 60mm au valoarea 1,38), în rest aceste valori sunt mai mici de 1,33;
- Valorile indicelui de capacitate P_{PK} sunt cu mult mai mici decât ale C_{PK} .
- Distribuția valorilor de alungire (la grosime 60mm)- cu valoarea indicelui de capacitate P_{PK} 1.88 și cu valoarea indicelui de capacitate P_{PK} 1,71 mm) indică faptul că această caracteristică se află în stare de control statistic (adică $P_{PK} \geq 1.67$ și $C_{pk} \geq 1.33$).
- Faptul că pentru celelalte caracteristici valoarea indicelui de capacitate $P_{PK} \leq 1.67$, și totuși procesul este stabil, înseamnă că trebuie să existe îmbunătățiri ale procesului prin diferite măsuri corective până la atingerea stabilității continue.

Analiza completă statistică efectuată asupra valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075, aflate în stare de livrare (T651) și grosimi diferite a evidențiat faptul că procesele tehnologice aplicate au condus la obținerea unor caracteristici mecanice corespunzătoare, fără abateri de la limitele de toleranță, cu mare reproductibilitate și stabilitate.

Totodată folosirea suplimentară a indicilor de capacitate C_{PK} și de performanță P_{PK} (fig.6) a permis o evaluare completă și sigură a caracterizării mecanice a performanțelor produselor din aliaj 7075, din producția ALRO Slatina.

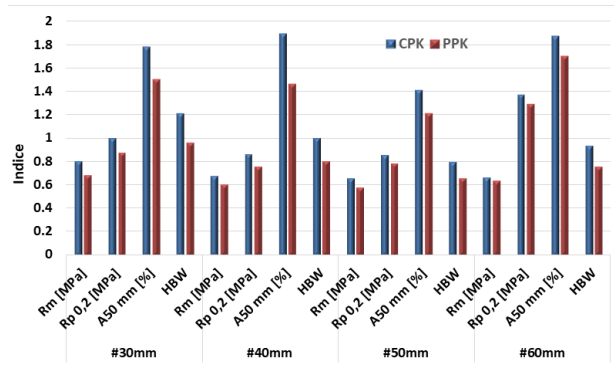


Fig. 6- Valorile indicilor de capabilitate și de performanță pentru caracteristicilor mecanice ale produselor din 7075, după prelucrarea statistică (în starea T651 și diferite grosimi ale tablelor)

În al doilea subcapitol, intitulat „Caracteristicile mecanice ale probelor din aliaje de aluminiu tip 7075 utilizate în cadrul experimentărilor din prezenta lucrare”, au fost prezentate rezultatele experimentale asupra caracteristicilor mecanice ale epruvetelor aflate în diferite stări structurale de tratament termice, așa cum este ilustrat în **fig. 7**.

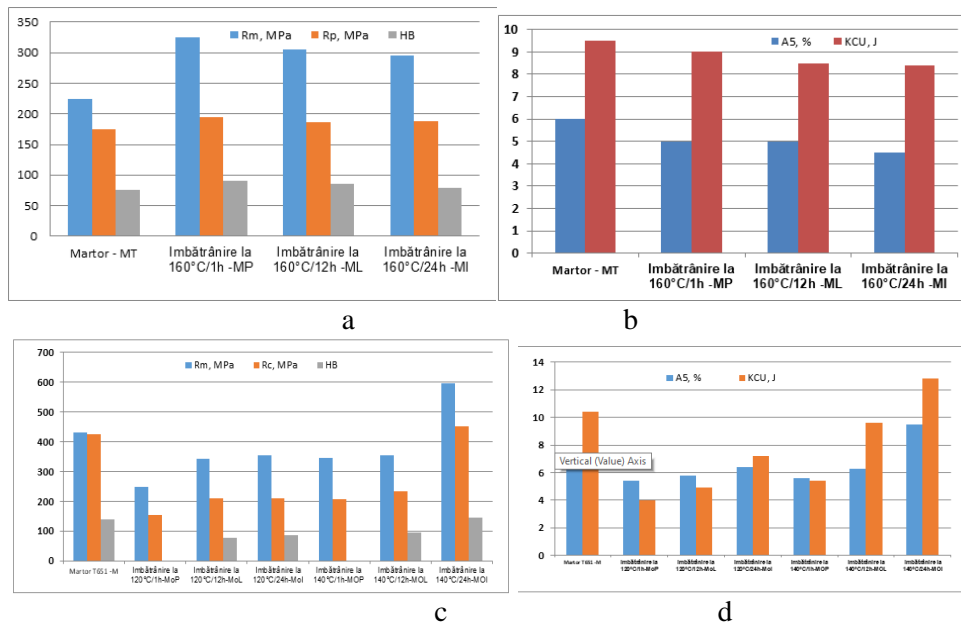


Fig.7- Histograme ale caracteristicilor mecanice ale epruvetelor experimentale din aliaj 7075, a- rezistența mecanică, limita de curgere și duritate în stare turnat și îmbătrânit la 160 °C, diferite durate de menținere; b-alungire și reziliența în stare turnat și îmbătrânit la 160 °C, diferite durate de menținere; c- rezistența mecanică, limita de curgere și duritate în stare laminat T651 și îmbătrânit la 120 °C și 140 °C, diferite durate de menținere; d- alungire și reziliența în stare laminat T651 și îmbătrânit la 120 °C și 140 °C, diferite durate de menținere

Capitolul 5 este intitulat „Analiza comportării la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliajul de aluminiu tip 7075”. Capitolul prezintă separat, pentru fiecare stare structurală comportarea la eroziunea cavitațională, descrisă cu ajutorul diagramelor de variație a adâncimii medii cumulate -MDE(t)- și a vitezei de eroziune aferente – MDER (t). Rezultatele sunt completate de analiza la stereomicroscop, prin măsurarea suprafețelor afectate de cavitație și a suprafețelor celor mai afectate de cavitație. În finalul capitolului sunt realizate comparații ale rezultatelor experimentale, fie pe tipuri de temperaturi, fie pe diferitele durate de menținere la îmbătrânirile artificiale. Astfel

Considerând comportarea la îmbătrânire artificială la 120°C, cu diferite durate de menținere, a fost realizată histograma din **fig. 8**, din care se remarcă faptul că acest tratament nu determină

creșterea rezistenței la eroziunea cavitațională. Histograma comparării din **fig.8**, indiferent de parametru, arată că cea mai bună rezistență o are structura stării de livrare (de semifabricat laminat). Cum interes prezintă rezistența structurilor conferite de stările obținute prin tratament termic volumic, constatăm:

- cea mai slabă rezistență se obține prin regimul de tratament cu durată de o oră (starea MoP) iar cea mai bună pentru tratamentul cu durată de 12 ore (starea MoL);
- rezistențele structurilor obținute pentru duratele de o oră (MoP) și 24 ore (MoI) nu diferă substanțial (circa 9 % după MDE_{max} și de circa 8 % după $MDER_s$), practic fiind în aceeași categorie (cu rezistență mediocră la solciturile ciclice ale cavitației);

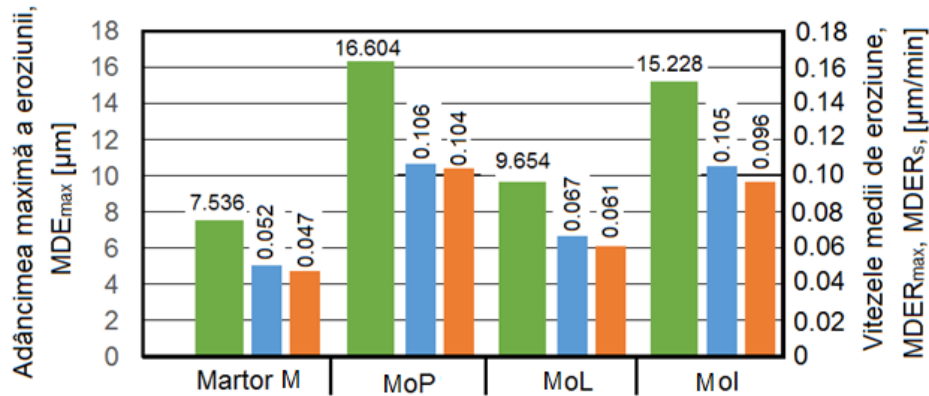


Fig. 8- Histograma comparării rezultatelor privind comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075, laminat și tratament termic la 120 °C, diferite durate de menținere

Diferența de rezistență a structurii probei MoL față de celelalte două se vede în diferențele dintre parametrii de referință MDE_{max} și $MDER_s$, astfel:

- adâncimea medii cumulata MDE_{max} față de MoP este mai mare cu circa 72 %, iar față de MoI este de circa 57 %, ne semnificativă
- raportat la valorile vitezelor de pătrundere a eroziunii $MDER_s$, față de MoP scăderea este de peste 70 %, iar față de MoI este de peste 57 %.

Considerând parametrul referitor la cea mai afectată suprafață de atacul cavitațional, se poate face remarcă diferențelor semnificative ale probei martor, cu cea mai mică suprafață afectată, respectiv circa 70%, față de epruvetele îmbătrânite la 120°C/1 oră, cu o suprafață de 82,3%, epruvetele îmbătrânite la 120°C/12 ore, cu o suprafață de 81,8%, sau epruvetele îmbătrânite la 120°C/24 ore, cu o suprafață de 82,1%.

Histograma din **fig.9**, arată diferențele dintre valorile celor trei parametrii recomandați de normele ASTM G32 și folosiți în cutuma laboratorului de Cercetare a Rezistenței la Eroziunea prin Cavitație, de la U.P. Timișoara. Se pot face următoarele constatări:

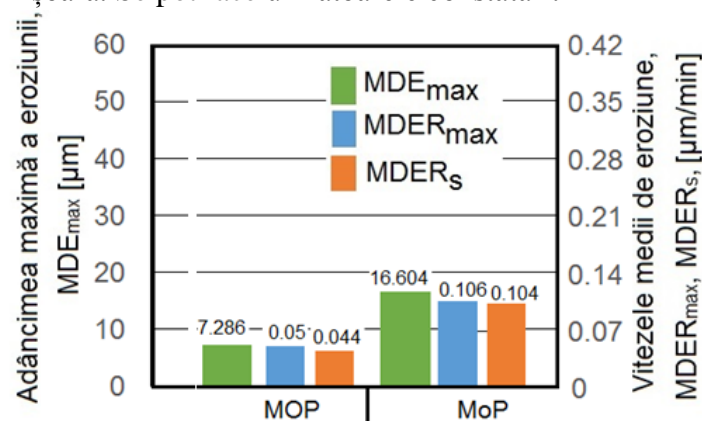


Fig. 9. Histograma comparării rezultatelor privind comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075, laminat și tratament termic la 120 °C și 140 °C, cu menținere o oră

- cea mai slabă rezistență se obține prin regimul de tratament termic cu temperatura de 120 °C (proba MOP);
- comparativ, adâncimea medie cumulată MDE_{max} înregistrată pentru structura probei MOP, față de a probei MoP, este de peste 2.2 ori mai mică;
- raportat la valorile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii $MDER_s$ (al căror invers, $R_{cav} = 1/MDER_s$, reprezintă rezistența suprafeței la eroziunea cavitației) rezistența structurii probei MOP este de peste 2.3 ori mai mare față de a probei MoP.

Constatările de mai sus arată că pentru obținerea unei structuri cu proprietăți care să confere rezistență ridicată la eroziunea cavitației, prin tratament termic de îmbătrânire artificială cu durată de menținere de o oră, este recomandată temperatura de 140°C.

Dacă se dorește compararea rezultatelor privind rezistența la eroziunea cavitațională la menținere de 12 ore, fie la 120°C fie la 140°C, se poate realiza histograma din fig. 10.

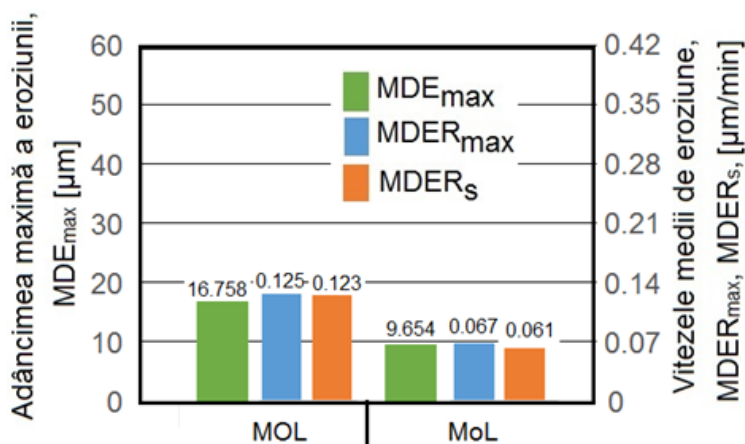


Fig. 10-Histograma comparării rezultatelor privind comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075, laminat și tratament termic la 120 °C și 140 °C, cu menținere 12 ore

Datele din histograma, prezentată în **fig.10** duc la următoarele constatări:

- rezistența mai mare, la eroziunea cavitației este conferită de tratamentul termic la 120 °C;
- comparativ, adâncimea medie cumulată MDE_{max} înregistrată pentru structura probei MOL este de aproape 1.7 ori mai mare, iar viteza $MDER_{max}$ este cu circa 86 % mai mare;
- raportat la valorile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii $MDER_s$ (al căror invers, $R_{cav} = 1/MDER_s$, reprezintă rezistența suprafeței la eroziunea cavitației) constatăm că rezistența structurii probei MoL este de de circa 2 ori mai mare față de a probei MOL.

Constatările de mai sus arată că pentru obținerea unei structuri cu proprietăți care să confere rezistență ridicată la eroziunea cavitației, prin tratament termic de îmbătrânire artificială cu durată de menținere de 12 ore, este recomandată temperatura de 120 °C.

Dacă se dorește compararea rezultatelor privind rezistența la eroziunea cavitațională la menținere de 24 ore, fie la 120°C fie la 140°C, se poate realiza histograma din **fig. 11**.

Datele din histograma, prezentată în **fig.11** duc la următoarele constatări:

- dintre cele două regimuri temperatura de 140°C ore conferă rezistența mai mare;
- raportat la valorile vitezelor medii de pătrundere a eroziunii $MDER_s$ (al căror invers, $R_{cav} = 1/MDER_s$, reprezintă rezistența suprafeței la eroziunea cavitației) constatăm că rezistența structurii probei MOI este de de peste 3 ori mai mare față de a probei MoI;

- după valoarea parametrului MDE_{max} rezistența probei MOI este de circa 2,5 ori mai mare, iar după valoarea parametrului $MDER_{max}$ este de circa 2.9 ori.

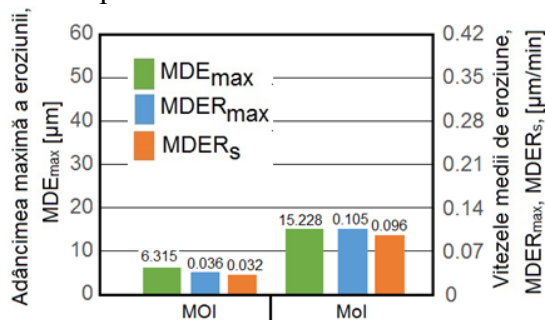


Fig. 11 Histograma comparării rezultatelor privind comportarea la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075, laminat și tratament termic la 120 °C și 140 °C, cu menținere 24 ore

Capitolul 6 este intitulat „Analiza fractografică a suprafețelor solicitate la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj de aluminiu tip 7075”. Este realizată o analiză completă la microscopul electronic cu baleiaj a suprafețelor erodate cavitațional, evidențiindu-se aspectele cele mai semnificative care au putut indica mecanismul de propagare a ruperii prin eroziunea cavitațională. Analiza fractografică la microscopul electronic cu baleiaj a epruvetelor experimentale din aliajul de aluminiu tip 7075, în diferite stări structurale solicitate la cavitație după 165 ore de imersie a evidențiat modul de erodare a suprafețelor și este redată comparativ în fig. și fig.

- La putere de mărire mici la SEM, adică la observarea macrostructurală suprafețele rugoase, acoperite cu numeroase cavitații, indiferent de starea superaliajului. Se pot face diferențieri, între starea turnat, la care se remarcă smulgeri de material, semn al unei comportări extrem de nerezistente a materialului metalic la atacul cavitațional și starea laminat, la care suprafețele apar doar rugoase. Se observă totuși o ușoară intensificare a atacului cavitațional, în limite rezonabile pe măsura creșterii duratelor de menținere la tratamentele de îmbătrânire artificială;
- La puteri de mărire mai mari la SEM, adică la observarea microstructurală (**fig.12** și **fig.13**) atacul cavitațional apare similar la toate epruvetele din aliaj de aluminiu tip 7075, în sensul formării unor cavitații numeroase, cu geometrii complexe, semn al unei comportări fragile și slab rezistente la eroziunea cavitațională. Pe măsura creșterii duratei de menținere la diferitele tratamente termice de îmbătrânire artificială se constată o creștere numerică a cavitațiilor, care tind să se dispună uniform în întreaga masă metalică. Există totuși diferențieri ale fractografiilor funcție de cele două stări structurale, respectiv turnat și laminat. Astfel:
 - La epruvetele în stare turnat apar smulgeri masive de material, generând cavitații extinse până la 1-3mm diametru; La epruvetele turnat și îmbătrânit atacul eroziv este mai intens decât la epruveta netratată, dar se încadrează tot în categoria unui material complet nerezistent la eroziunea cavitațională;
 - La epruvetele în stare laminat și îmbătrânit aspectul fractografic este mai puțin agresiv decât la cele turnate. Aspectele fractografice sunt similare, cu numeroase cavitații fațetate fine și prezența compușilor intermetalici în matrice.

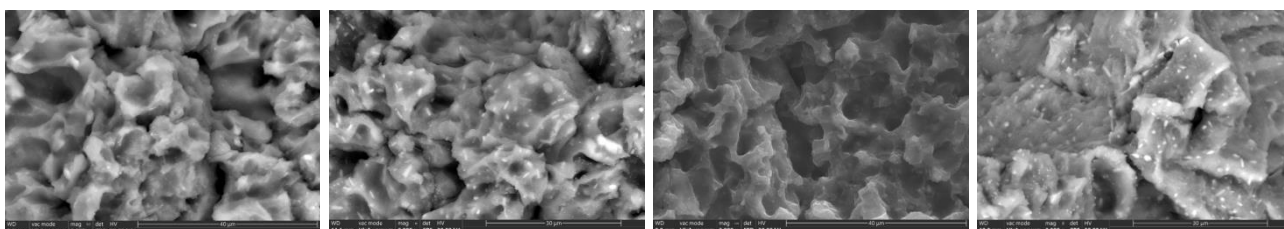


Fig.12- Analiza SEM a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare turnat (a) și tratat termic la 160°C și diferite durate de menținere: 1h (b); 12h (c), 24h (d)

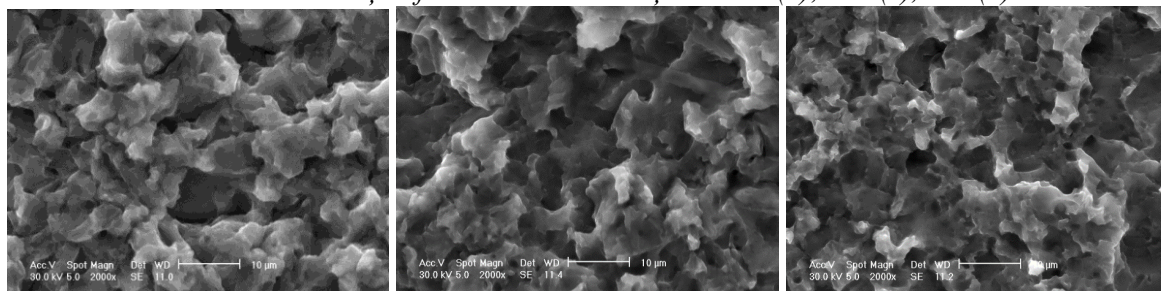


Fig. 13- Analiza SEM a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 în stare laminat T651 (a) și tratat termic la 120°C/1h (b); și 140°C 1h (c)

CAPITOLUL 7 este intitulat „CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE”. Concluziile referitoare la cercetările documentare oferă o imagine de ansamblu cuprinzătoare asupra posibilităților de durificare prin precipitare a aliajelor Al-Zn-Mg-Cu și a efectelor sale potențiale asupra performanței mecanice și a rezistenței la coroziune a acestor materiale metalice. În consecință, faza $MgZn_2$ este principala fază de precipitare care durifică aliajele de aluminiu din seria 7xxx a căror formare, distribuție și specificații geometrice sunt foarte sensibile la parametrii de tratament termic de îmbătrânire și la modul în care acesta se desfășoară. Concluziile referitoare la cercetările experimentale proprii au fost grupate pe tipuri de experimentări.

Concluzii asupra analizei structurale a probelor experimentale din aliajul de aluminiu tip 7075 au evidențiat faptul că structura epruvetelor din aliaj de aluminiu tip 7075, în stare turnat este alcătuită din soluție solidă α și eutectic interdendritic, precum și două tipuri de precipitate, respectiv precipitate interdendritice grosiere și precipitate fin distribuite în matrice și intradendritice. Structura dendritică este însoțită de precipitare interdendritică a eutecticului. Precipitatele interdendritice sunt de dimensiuni mari (3-5 μ m), de culoare gri, aproape cu precipitare continuă. Analiza calitativă de fază prin difracție de raze X a evidențiat natura policristalină a eșantioanelor analizate. Fazele cristalografice au fost identificate conform bazei de date ICDD Release 2015: la epruvetele în stare turnat se găsește faza $CuAl_2$ în matricea metalică de soluție solidă α . Faza $CuAl_2$ nu durifică semnificativ matricea metalică, deoarece are un parametru de rețea asemănător, respectiv 84,2 nm, față de 87,7 nm al soluției solide. În stare turnat are loc dizolvarea fazei $CuAl_2$ și precipitarea fazei metastabile η' (respectiv $MgZn_2$) fază al cărui diamteru este mult mai mic în comparație cu al rețelei cristaline (cu circa 40% mai mic). Se remarcă totuși faptul că acest parametru scade pe măsura creșterii duratei de îmbătrânire, respectiv 42.7 nm (la 1h), până la 37,1 nm (la 24h). La epruvetele în stare laminat matricea metalică de soluție solidă α are un parametru de rețea de 74.5 nm, mult mai mic decât cel din stare turnat, respective 87,4. Faza metastabilă η' (respectiv $MgZn_2$) nu a putut fi identificată, fiind în proporție foarte mică. Se remarcă totuși faptul că parametrul de rețea se modifică semnificativ prin aplicarea diferitelor tratamente de îmbătrânire, fiind situat în domeniul 55.5 - 75.5nm.

Concluzii asupra analizei statistice privind evoluția caracteristicilor mecanice ale tablelor din 7075 au arătat că valorilor indicelui de performanță C_{PK} , pentru toate grosimile de table la valorile alungirilor acest indice este mai mare decât 1,33 ceea ce înseamnă că procesele sunt stabile cu o distribuție normală a valorilor. În ceea ce privește celelalte caracteristici mecanice, în puține situații acest indice este peste valoarea 1,33 (de exemplu numai valorile de limitei de curgere la table grose de 60mm au valoarea 1,38), în rest aceste valori sunt mai mici de 1,33. Totodată analiza completă statistică efectuată asupra valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075, aflate în stare de livrare (T651) și grosimi diferite a evidențiat faptul că procesele tehnologice aplicate au condus la obținerea unor caracteristici mecanice corespunzătoare, fără abateri de la limitele de toleranță, cu mare reproductibilitate și stabilitate. Folosirea suplimentară a indicilor de capabilitate

C_{PK} și de performanță P_{PK} a permis o evaluare completă și sigură a caracterizării mecanice a performanțelor produselor din aliaj 7075, din producția ALRO Slatina.

Concluzii desprinse din analiza comportării la eroziunea cavitațională a epruvetelor din 7075 au evidențiat faptul că indiferent de parametrii regimului de tratament termic, structurile probelor prelevate din semifabricatul turnat au rezistența la eroziunea cavitației vibratoare net inferioară structurilor obținute pentru probele din semifabricat laminat, de circa 5 ori după valorile parametrului MDE_{max} și de circa 5.9 ori după valorile parametrilor $MDER_s$; la toate probele, indiferent dacă este martor sau tratată termic, în primele 15 (30) minute de cavitație vibratoare se respectă mecanismul eroziv specific acesteia, prin care, în suprafața atacată, se produc mai mult deformații elasto-plastice și rețele de fisuri și se elimină vârfurile rugozităților și praful abraziv. Expulzările de material, cu crearea de pitting-uri sunt semnificativ reduse în valorile maselor înregistrate prin cântărire. Din acest motiv aspectul suprafeței arată ca unul șlefuit/mățuit; la toate probele, începând cu minutul 105 (120) și până la finalizarea testului pierderile sunt de ordin apropiat, motiv pentru care curba $MDE(t)$ se liniarizează, diferențele dintre valorile experimentale ale vitezelor sunt mici și curba $MDER(t)$ scade asimptotic spre valoarea de stabilizare $MDER_s$; la toate probele evoluțiile curbelor de mediere $MDER(t)$ au tendința asimptotică spre stabilizare la valoarea maximă ($MDER_s$). Se poate concluziona că acest mod de evoluție este efectul proprietăților mecanice, al durificării în timp, a stratului solicitat și al diminuării forței de solicitare/impact, ca urmare a efectului amortizant al aerului pătruns în cavernele formate; raportat la rezistența structurii semifabricatului (proba martor), funcție de temperatură și durata de menținere a tratamentului termic de îmbătrânire artificială, structura creată poate avea rezistență la solicitările ciclice ale cavitației mai mare sau mai mică, confirmând continuarea cercetărilor din punct de vedere al utilizării tratamentelor termice volumice la îmbunătățirea rezistenței la cavitație a aliajului de aluminiu 7075.

Concluziile desprinse din analiza fractografică a suprafețelor solicitate la eroziunea cavitațională a epruvetelor experimentale din aliaj 7075 au arătat faptul că la putere de mărire mici la SEM, adică la observarea macrostructurală suprafețele rugoase, acoperite cu numeroase cavitații, indiferent de starea superaliajului. Se pot face diferențieri, între starea turnat, la care se remarcă smulgeri de material, semn al unei comportări extrem de nerezistente a materialului metalic la atacul cavitațional și starea laminat, la care suprafețele apar doar rugoase. Se observă totuși o ușoară intensificare a atacului cavitațional, în limite rezonabile pe măsura creșterii duratelor de menținere la tratamentele de îmbătrânire artificială; la puteri de mărire mai mari la SEM, adică la observarea microstructurală atacul cavitațional apare similar la toate epruvetele din aliaj de aluminiu tip 7075, în sensul formării unor cavitații numeroase, cu geometrii complexe, semn al unei comportări fragile și slab rezistente la eroziunea cavitațională. Pe măsura creșterii duratei de menținere la diferitele tratamente termice de îmbătrânire artificială se constată o creștere numerică a cavitațiilor, care tind să se dispună uniform în întreaga masă metalică.

CONTRIBUȚII ORIGINALE aduse prin finalizarea prezentelor cercetări experimentale sunt: realizarea unei analize structurale complete și complexe a epruvetelor experimentale din aliaj de aluminiu tip 7075, în diferite stări structurale, fie turnat, fie laminat, urmat de diferite tratamente termice de îmbătrânire, corelată cu evaluarea rezistenței la eroziunea cavitațională; realizarea unei analize complete statistice efectuată asupra valorilor caracteristicilor mecanice ale tablelor din aliaj 7075, aflate în stare de livrare (T651) și grosimi diferite, care a evidențiat faptul că procesele tehnologice aplicate au condus la obținerea unor caracteristici mecanice corespunzătoare, fără abateri de la limitele de toleranță, cu mare reproductibilitate și stabilitate, testarea la eroziunea cavitațională a aliajului de aluminiu tip 7075 în vederea identificării mecanismului de propagare a rupei cavitaționale, precum și a identificării tratamentului termic de îmbătrânire care poate îmbunătăți această comportare; evaluarea într-o manieră originală a stării suprafețelor epruvetelor experimentale testate la eroziunea cavitațională prin analize simultane la stereomicroscop, microscopul optic metalografic și la microscopul electronic cu baleiaj; considerarea unui nou parametru de apreciere a rezistenței la eroziunea cavitațională, respectiv suprafața cea mai afectată de eroziunea cavitațională. În acest sens a fost realizată o analiză cantitativă completă macrostructurală la stereomicroscop.

DIRECȚII ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE sunt formulate următoarele direcții și perspective ale cercetărilor experimentale viitoare:

- Cercetările documentare din cadrul tezei de doctorat au identificat unele aspecte privind posibilitățile complexe de aplicare ale tratamentelor termice specifice aliajelor de aluminiu din seria 7xxx, respectiv călirea de punere în soluție urmată de îmbătrânire artificială, în una sau mai multe trepte, care permit îmbunătățirea caracteristicilor mecanice și de exploatare ale acestei clase de materiale metalice.
- Aliajele de aluminiu tip 7075 constituie în continuare surse ale unor viitoare cercetări experimentale privind explorarea performanțelor lor în domeniul eroziunii cavitaționale, în alte stări structurale de sensibilizare decât cele utilizate în cadrul prezentelor cercetări experimentale.
- Se pot propune și realiza experimentări în această direcție privind utilizarea tehnicilor specifice stereomicroscopiei în evaluarea stării suprafețelor solicitate la eroziunea cavitațională din diferite clase structurale de material metalice.

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

Articole ISI web of knowledge

- [1] Brandusa GHIBAN, Claudia NATRA, Alexandru CERNEA, Anca Daniela RAICIU, **Petrisor Ovidiu ODAGIU**, Irina BALKAN- STRUCTURAL INVESTIGATIONS CONCERNING Al 3003/Al 4xxx CLAD MATERIALS, U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 81, Iss. 4, 2019, ISSN 1454-2331
- [2] Ilare BORDEASU, Brandusa GHIBAN, Vasile NAGY, Vlad PARAIANU, Cristian GHERA, Dionisie ISTRATE, Alin Mihai DEMIAN, **Petrisor - Ovidiu ODAGIU** - Cavitation erosion resistance considerations for alloy 6082 state T651 - U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 85, Iss. 1, 2023, ISSN 1454-2331
- [3] Dionisie ISTRATE, Ilare Bordeasu, Brândusa Ghiban, Bogdan Istrate, Beatrice-Gabriela Sbarcea, Cristian Ghera, Alexandru Nicolae Luca, **Petrisor Ovidiu Odagiu**, Bogdan Florea, Dinu Gubencu. - Correlation between Mechanical Properties—Structural Characteristics and Cavitation Resistance of Rolled Aluminum Alloy Type 5083. *Metals* 2023, 13, 1067. <https://doi.org/10.3390/met13061067>
- [4] **PETRISOR-OVIDIU ODAGIU**, CORNELIA LAURA SALCIANU, CRISTIAN GHERA, ANDREEA DANIELA BUZATU, LAVINIA MADALINA MICU, ALEXANDRU NICOLAE LUCA, ILARE BORDEASU, BRANDUSA GHIBAN - Heat Treatment Parameters Influence on the Cavitation Resistance of an Aluminum Alloy, U.P.B. Sci. Bull., Series ..., Vol. ..., Iss. ..., 201 ISSN 1223-7027 (accepted, in publishing)

Articole cotate BDI

1. Dionisie ISTRATE, Claudia Lazar (Natra), **Ovidiu Petrisor Odagiu**, Alin Mihai Demian, Andreea Daniela Buzatu, Brandusa Ghiban - Influence of homogenization and aging parameters applied to mechanical and structural characteristics of alloy 5083, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, vol. 1262, 2022, open access, 012021, DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012021
2. Claudia Lazar (Natra), Dionisie ISTRATE, **Ovidiu Petrisor Odagiu**, Alin Mihai Demian, Andreea Daniela Buzatu, Brandusa Ghiban- Evaluation of mechanical characteristics of 3003 aluminum alloy plated sheets, IOP Conference Series, Materials Science and Engineering, vol. 1262, 2022, open access, 012021, DOI 10.1088/1757-899X/1262/1/012021

Lucrări prezentate în cadrul unor conferințe naționale cu participare internațională

- [1] Dionisie ISTRATE, Claudia Lazar (Natra), **Ovidiu Petrisor Odagiu**, Alin Mihai Demian, Andreea Daniela Buzatu, Brandusa Ghiban - Influence of homogenization and aging parameters applied to mechanical and structural characteristics of alloy 5083, ACME-02-01: Materials and Surface Engineering, June 9th, 2022, ACME, Iași, code, 2-015
- [2] Claudia Lazar (Natra), Dionisie ISTRATE, **Ovidiu Petrisor Odagiu**, Alin Mihai Demian, Andreea Daniela Buzatu, Brandusa Ghiban- Evaluation of mechanical characteristics of 3003

- aluminum alloy plated sheets, ACME-02-01: Materials and Surface Engineering, June 9th, 2022, ACME, Iași, code, 2-016
- [3] Dionisie ISTRATE, Alin Mihai DEMIAN, Andreea Daniela BUZATU, **Petrișor- Ovidiu ODAGIU**, Brândușa GHIBAN -The influence of heat treatments on the mechanical and structural characteristics of plastically deformed type 5083 aluminum alloys - 9th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMAT 2022 November 24-25, 2022, Bucharest, Romania
- [4] A. D. Buzatu, D. ISTRATE, A. M. Demian, **Petrișor - Ovidiu Odagiu**, B. Ghiban - Heat treatments influence on the mechanical behavior and structural characteristics of aluminum alloys type 2017 - 9th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMAT 2022 November 24-25, 2022, Bucharest, Romania
- [5] **Petrișor- Ovidiu ODAGIU**, D. ISTRATE, A. M. Demian, A. D. Buzatu, B. Ghiban-The influence of thermal treatments on the mechanical and structural characteristics of aluminum alloys type 6082- 9th International Conference on Materials Science and Technologies – RoMAT 2022 November 24-25, 2022, Bucharest, Romania
- [6] A. M. Demian, A. D. Buzatu, **Petrișor- Ovidiu ODAGIU**, D. ISTRATE, B. Ghiban - Heat treatments influence on the mechanical and structural characteristics of 7075 aluminum type alloys- 9th International Conference on Materials Science and Technologies –RoMAT 2022 November 24-25, 2022, Bucharest, Romania

BIBLIOGRAFIE SELECTIVA

- [1]. K. Yasakau, J. Tedim, M. Zheludkevich, M. Ferreira, Smart Self-healing Coatings for Corrosion Protection of Aluminium Alloys, Handbook of Smart Coatings for Materials Protection, 2014, p. 224.
- [2]. L.F. Mondolfo, Aluminum Alloys: Structure and Properties, Elsevier, 2013.
- [3]. R.S. Mishra, H. Sidhar, Chapter 2 - physical metallurgy of 2XXX aluminum alloys, in: Friction Stir Welding of 2XXX Aluminum Alloys Including Al-Li Alloys, Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 15-36.
- [4]. J. Pang, F. Liu, J. Liu, M. Tan, D. Blackwood, Friction stir processing of aluminium alloy AA7075: microstructure, surface chemistry and corrosion resistance, Corrosion Sci. 106 (2016) 217-228.
- [5]. J. Brown, Foseco Non-ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth-Heinemann, 1999.
- [6]. A. Azarniya, H.R.M. Hosseini, A new method for fabrication of in situ Al/ Al₃Ti₂O₃ nanocomposites based on thermal decomposition of nanostructured tialite, J. Alloys Compd. 643 (2015) 64-73.
- [7]. J. Bedyk, P. Mallick, Aluminum alloys for lightweight automotive structures, Mater. Des. Manuf. Lightweight Vehicles 3 (2010) 79-113.
- [8]. P. Threadgill, A. Leonard, H. Shercliff, P. Withers, Friction stir welding of aluminium alloys, Int. Mater. Rev. (2013).
- [9]. B. Kumar, M.S. Milton, PCTIG Welding of 5xxx Aluminium Alloys: a Literature Review, 2016.
- [10]. J. John, S. Shanmughanatan, M. Kiran, Friction Stir Welding of Wrought Aluminium Alloys- A Short Review. International Journal of Engineering trends and Technology, (2016) 32-2, 76-81
- [11]. Z. Cordero, B. Knight, C. Schuh, Six decades of the Hall-Petch effect: a survey of grain-size strengthening studies on pure metals, Int. Mater. Rev. 61 (2016) 495-512.
- [12]. H. Choi, J. Shin, D. Bae, Grain size effect on the strengthening behavior of aluminum-based composites containing multi-walled carbon nanotubes, Compos. Sci. Technol. 71 (2011) 1699-1705.
- [13]. R. Valiev, N. Enikeev, M.Y. Murashkin, S. Aleksandrov, R. Goldshtein, Superstrength of ultrafine-grained aluminum alloys produced by severe plastic deformation, in: Doklady Physics, Springer, 2010, pp. 267-270.
- [14]. P.V. Liddicoat, X.-Z. Liao, Y. Zhao, Y. Zhu, M.Y. Murashkin, E.J. Lavernia, R.Z. Valiev, S.P. Ringer, Nanostructural hierarchy increases the strength of aluminium alloys, Nat. Commun. 1 (2010) 63.
- [15]. S.K. Panigrahi, R. Jayaganthan, Development of ultrafine grained high strength age hardenable Al 7075 alloy by cryorolling, Mater. Des. 32 (2011) 3150-3160.
- [16]. R.E. Smallman, A.H.W. Ngan, Chapter 13 - precipitation hardening, in: Modern Physical Metallurgy, eighth ed., Butterworth-Heinemann, Oxford, 2014, pp. 499-527.
- [17]. Y. Zhang, D. Pelliccia, B. Milkereit, N. Kirby, M.J. Starink, P.A. Rometsch, Analysis of age hardening precipitates of Al-Zn-Mg-Cu alloys in a wide range of quenching rates using small angle X-ray scattering, Mater. Des. 142 (2018) 259-267.
- [18]. M. Liu, B. Klobes, K. Maier, On the age-hardening of an Al-Zn-Mg-Cu alloy: a vacancy perspective, Scr. Mater. 64 (2011) 21-24.
- [19]. Y. Liu, S. Liang, D. Jiang, Influence of repetitious non-isothermal aging on microstructure and strength of Al-Zn-Mg-Cu alloy, J. Alloys Compd. 689 (2016) 632-640.
- [20]. M.-h. Li, Y.-q. Yang, Z.-q. Feng, B. Huang, L. Xian, J.-h. Lou, J.-g. Ru, Precipitation sequence of h phase along low-angle grain boundaries in Al-Zn-MgCu alloy during artificial aging, Trans. Nonferrous Metals Soc. China 24 (2014) 2061-2066.
- [21]. L. Lin, Z. Liu, P. Ying, M. Liu, Improved stress corrosion cracking resistance and strength of a two-step aged Al-Zn-Mg-Cu alloy using Taguchi method, J. Mater. Eng. Perform. 24 (2015) 4870-4877.
- [22]. R.-x. Yang, Z.-y. Liu, P.-y. Ying, J.-l. Li, L.-h. Lin, S.-m. Zeng, Multistage-aging process effect on formation of GP zones and mechanical properties in Al-Zn-Mg-Cu alloy, Trans. Nonferrous Metals Soc. China 26 (2016) 1183-1190.
- [23]. Y. Wang, K. Zhang, W. Wu, W. Wang, J. Wang, Effect of electrical pulse treatment on the retrogression and re-aging behavior of 6061 aluminum alloy, Mater. Sci. Eng., A 703 (2017) 559-566.
- [24]. F. Jiang, H.S. Zurob, G.R. Purdy, H. Zhang, Characterizing precipitate evolution of an Al-Zn-Mg-Cu-based commercial alloy during artificial aging and non-isothermal heat treatments by in situ electrical resistivity monitoring, Mater. Char. 117 (2016) 47-56.
- [25]. R.-m. Su, Y.-d. Qu, Effect of aging treatments on the mechanical and corrosive behaviors of spray-formed 7075 alloy, J. Mater. Eng. Perform. 23 (2014) 3842-3848.
- [26]. J.-T. Lu, H. Huang, H. Wu, S.-P. Wen, K.-Y. Gao, X.-L. Wu, Z.-R. Nie, Mechanical properties and corrosion behavior of a new RRA-treated Al-Zn-Mg-Cu-Er-Zr alloy, Rare Met., (2023) 42, 672-679
- [27]. Bordeasă I., Teză de doctorat: Eroziunea cavitațională asupra materialelor utilizate în construcția mașinilor hidraulice și elicelor navale. Efecte de scară, Timișoara, 1997
- [28]. Jurchela, A.D., Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în crom și variabil de nichel, Teza de doctorat, Timișoara, 2012
- [29]. Karabenciov A., Cercetări asupra eroziunii produse prin cavitație vibratorie la oțelurile inoxidabile cu conținut constant în nichel și variabil de crom, Teza de doctorat, Timișoara, 2013

- [30]. Mânzână M.E., Studii și cercetări experimentale privind modificările structurale produse prin cavitație-eroziune în diferite materiale metalice, Teza de doctorat, Bucuresti, 2012
- [31]. Ghera, C., Rolul tratamentelor duplex în creșterea rezistenței la cavitație a oțelurilor pentru aparatura sistemelor hidraulice, Teza de doctorat, Timisoara, 2017
- [32]. Salcianu, L., Curgerea în vanele fluture și eroziunea prin cavitație a componentelor din oțeluri inoxidabile austenitice Teza de doctorat, Timisoara, 2017
- [33]. Oanca O., Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje CuAlNiFeMn destinate execuției elicelor navale, *Teza de doctorat*, Timișoara, 2014
- [34]. Micu Lavinia Madalina. *Comportarea la eroziune prin cavitație a oțelurilor inoxidabile duplex*, Teza de doctorat, Timisoara, 2017
- [35]. Lazar, I, Tehnici de optimizare a rezistenței la eroziunea prin cavitație a unor aliaje Cu-Zn și Cu-Sn, Teza de doctorat, Timisoara, 2020
- [36]. Bordeasu Ilare. Monografia Laboratorului de Cercetare a Eroziunii prin Cavitație al Universității Politehnice Timisoara (1960-2020). Editura POLITEHNICA, Timisoara, 2020
- [37]. ***Standard method of vibratory cavitation erosion test, ASTM, Standard G32, 2016
- [38]. Istrate I.; Sarcea B.G.; Demian A.M.; Buzatu A.D.; Salcianu L.; Bordeasu I.; Micu L.M.; Chera C.; Florea B.; Ghiban B. Correlation between Mechanical Properties - Structural Characteristics and Cavitation Resistance of Cast Aluminum Alloy type 5083, *Crystals* 2022, 12, 1538, <http://doi.org/103390/Crystal2111538>
- [39]. Istrate D.; Ghera C.; Salcianu L.; Bordeasu I.; Ghiban B.; Bazavan D. V.; Micu L. M.; Stroita D.-C.; Ostoia D. Heat Treatment Influence of Alloy 5083 on Cavitation Erosion Resistance. 2021, *Hydraulica*, no. 3, pp 15- 25
- [40]. Bordeasu I.; Ghera C.; Istrate D.; Salcianu L.; Ghiban B.; Bazavan D. V.; Micu L. M.; Stroita D.-C.; Suta A.; Tomoiaga I.; Luca A. N. Resistance and Behavior to Cavitation Erosion of Semi-Finished Aluminum Alloy 5083. 2021, *Hidraulica*, no. 4, pp 17- 24
- [41]. Bordeasu I.; Patrascoiu C.; Badarau R.; Sucitu L.; Popoviciu M. O.; Balasoiu V. New contributions to cavitation erosion curves modeling. 2006, *FME Transactions* 34, no.1, pp 39-43.
- [42]. Micu L. M.; Bordeasu I.; Popoviciu M.O. A New Model for the Equation Describing the Cavitation Mean Depth Erosion Rate Curve. 2017, *Revista de Chimie*, no.4, pp 894-898
- [43]. Bordeasu I., Eroziunea cavitațională a materialelor, Editura Politehnica, Timișoara, 2006
- [44]. Steller K., Reymann Z., Krzysztoowicz T: *Evaluation of the resistance of materials to the cavitation erosion*, Proceedings of the fifth Conference on Fluid Machinery, Vol 2, Akad Kiado, Budapest, 1975
- [45]. Mitelea I, Ghera C, Bordeasu I and Craciunescu C M 2015 Ultrasonic cavitation erosion of a duplex treated 16MnCr5 steel, *International Journal of Materials Research*, 106 (4), April, pp 391–397
- [46]. Bordeasu I., Popoviciu M.O., Patrascoiu C-tin, Bălăsoiu V., An Analytical Model for the Cavitation Erosion Characteristic Curves, *Scientific Buletin Politehnica University of Timisoara, Transaction of Mechanics*, Tom 49(63), Timișoara, ISSN:1224-6077, pp. 253-258, 2004
- [47]. Ghiban Brandusa, Sohaciu Mirela Gabriela, Bordeasu Ilare, Guragata Constantin Madalin, Salcianu Laura Cornelia, Badarau Rodica: *Heat Treatment and Cavitation Behaviour of the Inconel 718 in Different*, Researchfora International Conference, 5th – 6th April (2020), Sydney, Australia: 4-9
- [48]. Guragata M.C. Studies and experimental researches concerning plastic forming and erosion-cavitation behavior of superalloy type INCONEL 718. 2021, PhD Thesis, University Politehnica Bucharest, Romania. (In Romanian)
- [49]. Thiruvengadam A., Preiser H. S., - On testing materials for cavitation damage resistance, Report. 233 – 3, 1963
- [50]. Bordeasu, I., Mitelea, I., Cavitation Erosion Behaviour of Stainless Steels with Constant Nickel and Variable Chromium Content, *Materials Testing* 54 (1), 53-58, 2012
- [51]. Antoniac I., Handbook of Bioceramics and Biocomposites, Publisher Springer International Publishing Switzerland, 1386 pages, ISBN 978-3-319-12459-9, 2016.
- [52]. Antoniac I., Biologically Responsive Biomaterials for Tissue Engineering, Publisher Springer Science+Business Media New York, in Springer Series in Biomaterials Science and Engineering, 254 pages, ISBN 978-1-4899-9256-7, 2013.
- [53]. D. Bojin, D. Bunea, F. Miculescu, M. Miculescu, „*Microscopie Electronică de Baleiaj și Aplicații*”, Ed. AGIR, 2005, ISBN 973-720-019-5 (In Romanian)
- [54]. F. Miculescu, „*Metode Experimentale de Analiză a Biomaterialelor*”, Ed. Printech, 2007, ISBN 978-973-718