UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE POLITEHNICĂ DIN BUCUREŞTI

FACULTATEA ŞTIINŢA ŞI INGINERIA MATERIALELOR

Autor: Ing. Alin Mihai DEMIAN

TEZĂ DE DOCTORAT

CERCETAREA COMPORTĂRII LA EROZIUNEA CAVITAȚIONALĂ A ALIAJULUI DE ALUMINIU TIP 6082 ÎN CORELAȚIE CU DIFERITE STĂRI STRUCTURALE

Conducători de doctorat:
Prof. habil. dr. ing. Brânduşa GHIBAN
Prof.dr.ing. Ilare BORDEAŞU

București 2025

CAPITOLUL 1 - METALURGIA FIZICĂ A ALIAJELOR DE ALUMINIU DIN SERIA 6XXX

Cercetările documentare întreprinse în această lucrarea au aratat că, pentru a îmbunătăți proprietățile mecanice ale aliajelor de aluminiu din seria 6xxx, este important să se înțeleagă și să urmeze pașii corecți de procesare, precum și mecanismul din spatele durificării acestora. Este bine cunoscut din această sinteză documentară că omogenizarea corespunzătoare reprezintă un pas esențial înainte de procesarea aliajelor de aluminiu din seria 6xxx. Omogenizarea îmbunătățește calitatea precipitatelor turnate prin descompunerea și transformarea fazei β-Al_5FeSi de formă aciculară într-o formă mai sferoidală α-Al_8Fe_2Si și prin dizolvarea particulelor dure de Mg_2Si într-o matrice de aluminiu. Ulterior, aliajul este procesat și durificat prin precipitarea unui număr mare de zone GP fine și dispersate și precipitate de tip β″.

CAPITOLUL 2 - MATERIALUL, METODICA DE CERCETARE ȘI PROGRAMUL EXPERIMENTAL

2.1 Materialul și metodica de cercetare

Probele din aliaj de aluminiu tip 6082 au fost prelevate de la COLOR METALS S.R.L . Pentru experimentări au fost utilizate epruvete în stare laminat, stare T651, respectiv călire de punere in solutie la 525°C mentinere 4 ore, cu răcire în apă, urmată de îmbătrânire artificială la 175°C timp de 8 ore).Aspectul macroscopic al epruvetelor experimentale este redat în fig. 2.1.



Fig. 0.1 - Aspectul macroscopic al epruvetelor experimentale din aliaj 6082, cu diferite dimensiuni pentru efectuarea cercetărilor experimentale

Asupra epruvetelor experimentale în stare laminat T651 au fost efectuate tratamente termice de îmbătrânire artificială la 190°C, 160°C, 140°C, la fiecare cu menținere de 1 oră, 12 ore și, respectiv 24 ore, precum și epruvete acoperite cu sudură WIG.

Tratamentele termice au fost efectuate într-un cuptor Nabertherm, în cadrul Laboratorului de Știința Materialelor Metalice și Secției de Metalurgie Fizică a Universității Politehnice București. Pentru fiecare tip de tratament termic au fost efectuate șase teste pentru a determina proprietățile mecanice: rezistență la rupere, limita la curgere, alungire, tenacitate, duritate și microduritate. Determinarea mărimii de grăunte s-a făcut conform ASTM E3, ASTM E 407, ASTM E 112, folosind reactivul electrolitic Barker la o putere de x100. Investigațiile structurale au fost efectuate pe un microscop OLYMPUS.Determinarea caracteristicilor mecanice ale probelor testate și supuse diferitelor tratamente termice de îmbătrânire a fost efectuată pe o mașină de testare universală Walter + Bai AD Elveția model LFV 300. Rezistența la impact a fost realizată determinând valorile KCV pe ciocanul Pendulum Charpy tip Walter Bai cu 300J.Analiza structurală macroscopică a fost efectuată pe un stereomicroscop OLYMPUS SZX, echipat cu software QuickMicroPhoto 2.2, iar analiza microscopică pe un microscop optic de tip OLYMPUS echipat cu software Image Pro Plus.Analiza probelor prin difracție de raze X s-a realizat cu ajutorul difractometrului D8 Discover, Bruker-Germania, tub cu anod de Cu (λ=1.540598Å), detector 1D

Lynx Eye. Difractogramele au fost inregistrate cu un increment unghiular de 0.04^0, la o viteza de scanare de 1s/pas, domeniu unghiular de masura $2\theta = 10^o – 100^o$.
Analiza de microscopie electronica cu baleiaj a fost efectuată pe un microscop electronic cu scanare modelul Thermophischer Quattro S.Testele de comportare și rezistență la solicitările cavitației au fost realizate la Universitatea Politehnica Timișoara, în laboratorul de specialitate, **fig. 2.2**. Pentru interpretarea rezultatelor, cu privire la comportarea și rezistența structurii la solicitările ciclice, au fost construite diagrame specifice care conțin toate datele necesare.

2.2 Programul experimental al cercetărilor prezentei lucrări

Din epruvetele experimentale prelevate de la Color Metals S.R.L au fost realizate epruvete pentru diferitele experimentări din cadrul prezentei lucrări. Asupra epruvetelor de grosime 30mm, aflate în stare T651 (stare de livrare) au fost aplicate diferite tratamente termice de îmbătrânire artificială, la 190°C, 160°C și 140°C, fiecare la trei durate de menținere, respectiv 1 oră, 12 ore și 24 ore. Toate epruvetele au fost evaluate structural, fizic și mecanic, după care au fost realizate teste de eroziune cavitațională, în vederea determinării comportării acestei clase de material metalic la eroziunea cavitațională. În final a fost realizată o corelație structurală privind comportarea mecanică - aspectul microstructural - comportare la eroziunea cavitațională și aspectul fractografic, lucrarea finalizându-se cu contribuții originale și perspective ale cercetărilor experimentale viitoare. În **fig. 2.3** este redat programul experimental care permite îndeplinirea obiectivelor majore propuse inițial.

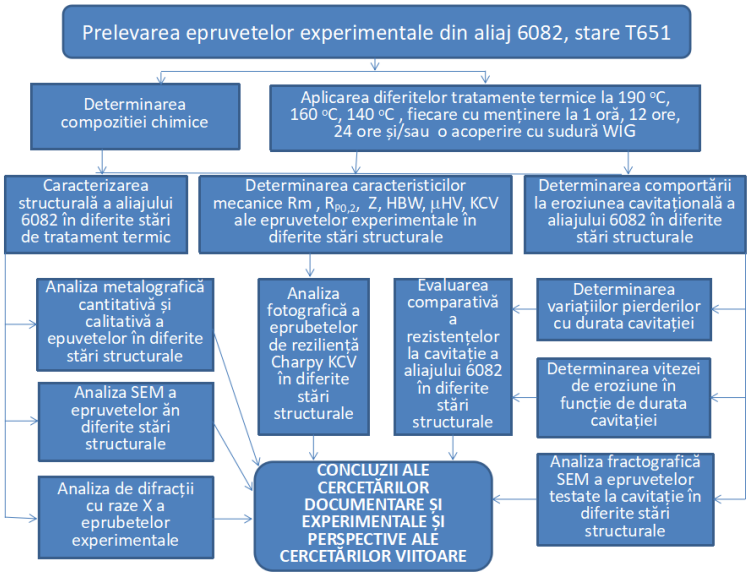


Fig. 0.2 - Programul experimental al cercetărilor din prezenta lucrare

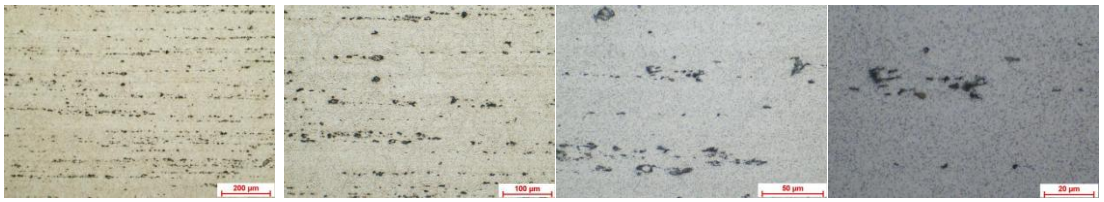
CAPITOLUL 3 - CARACTERIZAREA STRUCTURALĂ A ALIAJULUI DE ALUMINIU 6082 ÎN DIFERITE STĂRI DE TRATAMENT TERMIC

3.1 Analiza la microscopul optic metalografic

Analiza structurală realizată la microscopul optic metalografic este de mare importanță, aducând informații importante în caracterizarea structurală a unui material metalic. Rezultatele

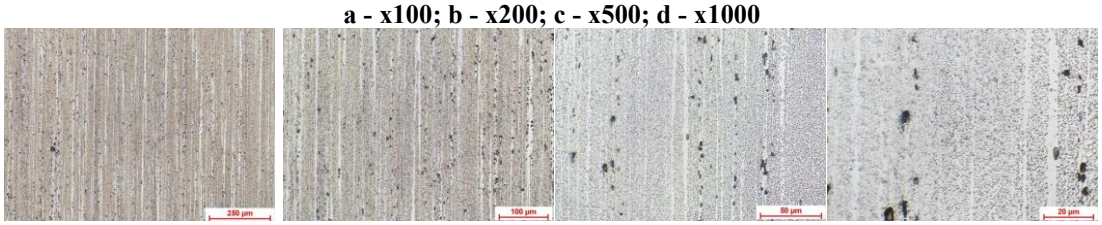
analizei metalografice ale aliajului de aluminiu tip 6082, în diferite stări de tratament termic de îmbătrânire, comparativ cu proba netratată termic sunt redate sugestiv în **fig. 3.1... fig.3.10**.

Analiza microstructurale a aliajului în stare de livrare T651 este redată în **fig. 3.1**. La un atac cu acid fluorhidric 5% se remarcă soluția solidă și prezența compușilor fini de Mg_2 și α- AlFeSi dispuși în direcția deformării plastice. La putere mare de mărire dimensiunea maximă a particulelor Mg_2Si este de 1-3 μm, iar plachetele de α- AlFeSi sunt foarte fine, sub 1 μm.La aplicarea tratamentelor tehnice de îmbătrânire, se constată, pe de o parte o precipitare mai abundentă a partriculelor de Mg_2Si și a plachetelor de α- AlFeSi, iar pe de altă parte, odată cu creșterea duratei de îmbătrânire la fiecare temperatură de tratament termic, o creștere a particulelor, în special a celor de Mg_2Si, **fig. 3.2 ... fig. 3.10.**



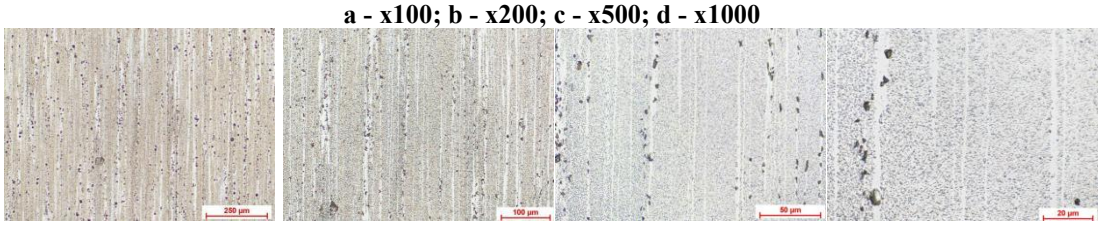
a b c d

Fig. 0.3 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651, proba martor (fără tratament termic de îmbătrânire), la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



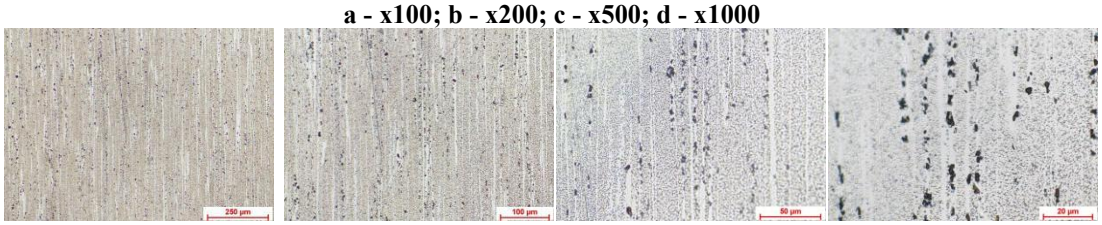
a b c d

Fig. 0.4 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 190 °C/1h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



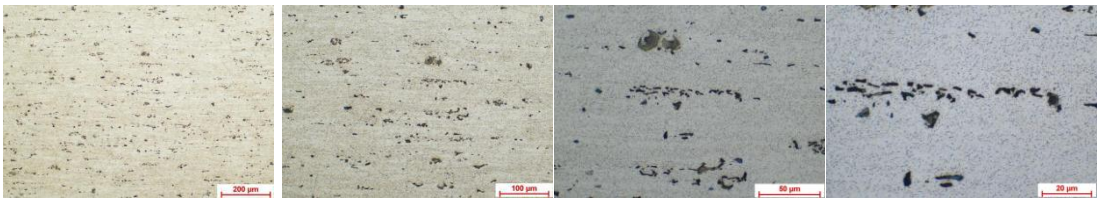
a b c d

Fig. 0.5 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 190 °C/12h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



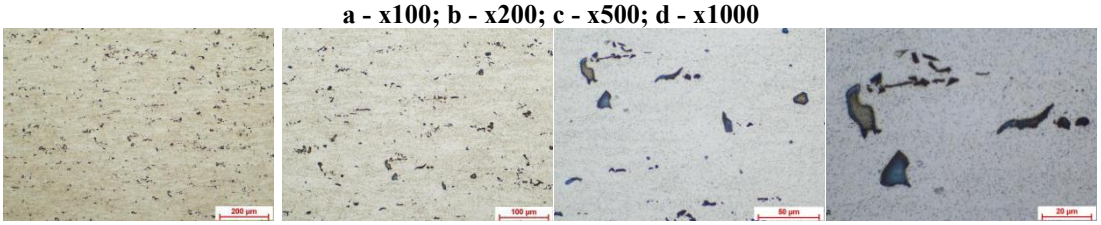
a b c d

Fig. 0.6 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 190 °C/24h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



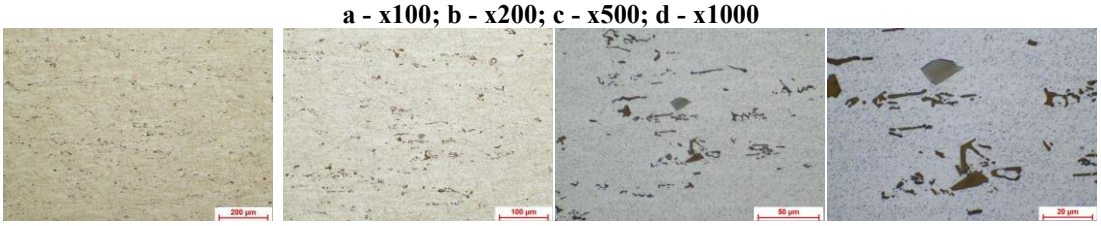
a b c d

Fig. 0.7 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 160 °C/1h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



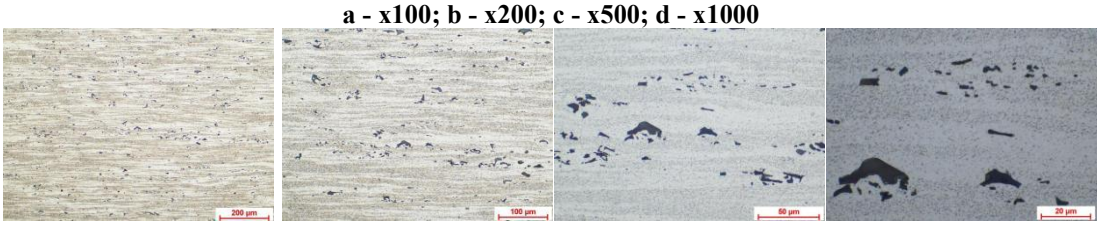
a b c d

Fig. 0.8 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 160 °C/12h, la diferite puteri de mărire a microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



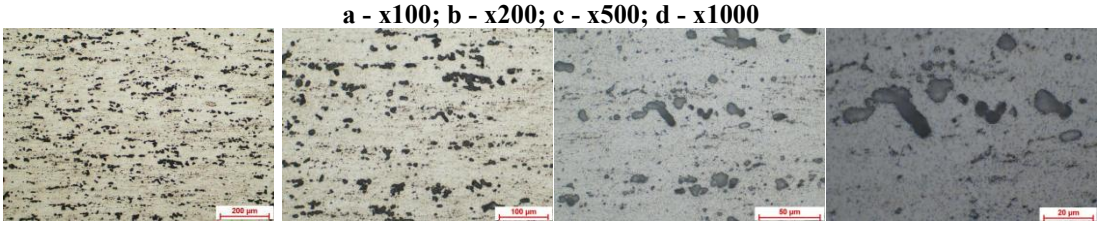
a b c d

Fig. 0.9 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 160 °C/24h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



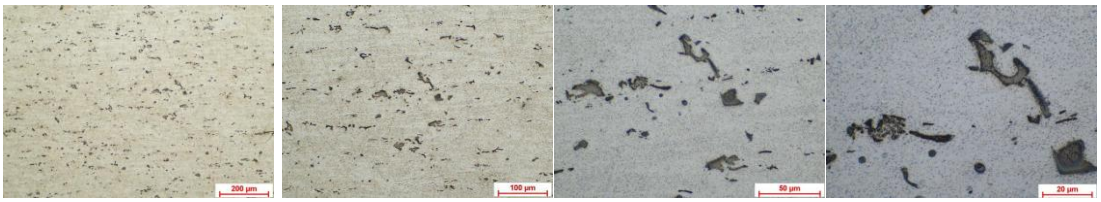
a b c d

Fig. 0.10 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 140 °C/1h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000



a b c d

Fig. 0.11 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 140 °C/12h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000

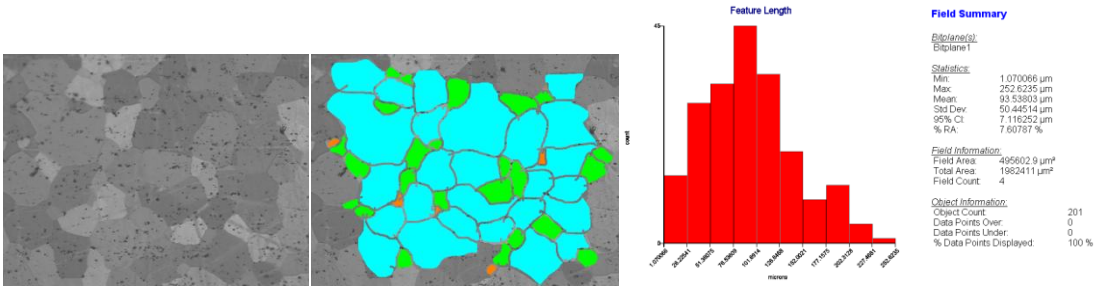


a **b** **c** **d**

Fig. 0.12 - Aspectul microstructural al aliajului 6082, stare T651 + tratament termic de îmbătrânire la 140 °C/24h, la diferite puteri de mărire ale microscopului:
a - x100; b - x200; c - x500; d - x1000

3.2 Determinarea mărimii de grăunte a aliajului 6082, în diferite stări structurale

Rezultatele privind determinarea mărimii de grăunte a epruvetelor experimentale după aplicarea diferitelor tratamente termice de îmbatrânire este redată în urma analizei metalografice cantitative conform ASTM E3, ASTM E 407, PO-043, PO-042, PO-044, reactiv Barker, cu examinare la x100, în **fig. 3.11,** pentru epruveta martor. Analiza valorilor privind mărimea de grăunte permite formularea următoarelor observații: Cea mai mare mărime de grăunte se înregistrează la epruveta martor, netratata termic, cu o granulație medie de 94µm, încadrându-se în clasa 4, conform ASTM E112. La epruvetele tratate termic la 190°C, cu diferite durate de menținere se înregistrează valori ale mărimii de grăunte cuprinse în intervalul 63-68µm, încadrându-se în clasa 5, conform ASTM E112. La epruvetele tratate termic la 160°C, cu diferite durate de menținere se înregistrează valori ale mărimii de grăunte cuprinse în intervalul 56-59µm, încadrându-se în clasa 5.5 conform ASTM E112. La epruvetele tratate termic la 140°C, cu diferite durate de menținere se înregistrează valori ale mărimii de grăunte cuprinse în intervalul 48-53µm, încadrându-se în clasa 5.5-6 conform ASTM E112.



a **b** **c**

***F*ig. 0.13 - Determinarea mărimii de grăunte a aliajului 6082, stare T651, proba martor:**
a - imagine captată; b - imagine analizată, c - analiza statistică

Analiza rezultatelor din histograma valorilor de mărime de grăunte a epruvetelor din aliaj de aluminiu 6082 în diferite stări structurale (**fig.3.21**) permite formularea următoarelor observații: Prin aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire se obține micșorarea mărimii de grăunte, indiferent de temperatura sau durata de menținere aplicată, respectiv se trece de la clasa 4 (pentru epruveta martor) la clasele 5, sau chiar 5.5 conform ASTM E112 la epruvete tratate termic; Cele mai mici valori ale mărimii de grăunte se înregistrează la epriuvetele tratate termic prin îmbătrânire la 140°C, cu grăunți fini care se încadrează în clasa 5.5, conform ASTM E112, față de grăunții din clasa 4, corspunzători probei în stare de livrare T651, netratată termic.

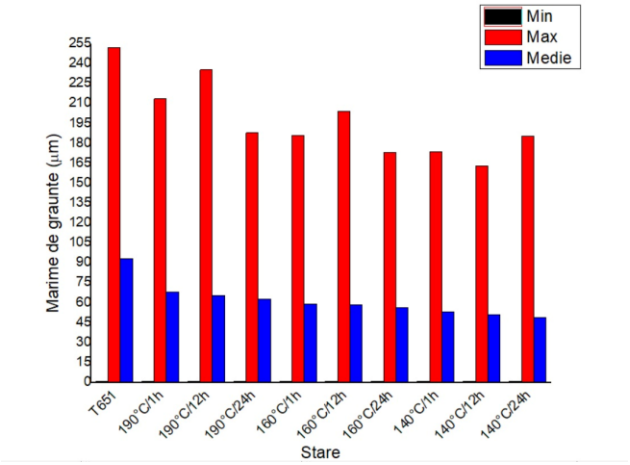


Fig. 0.14 - Histograma valorilor mărimii de grăunte ale aliajului 6082, în diferite stări structurale

3.3 Analiza de difractii cu raze X

Analiza difractometrică pentru identificarea fazelor din aliajul experimental aflat în stare T651 și supus ulterior diferitelor tratamente de îmbătrânire este redată în **fig.3.22**.

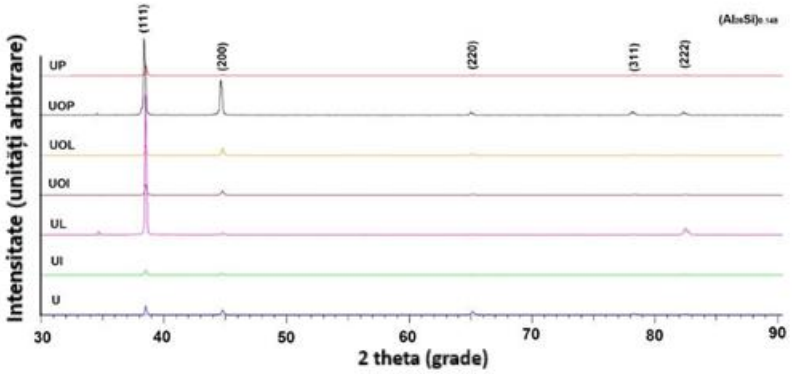


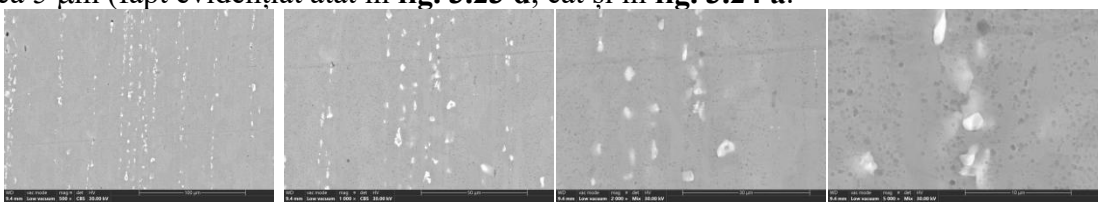
Fig. 0.15 - Analiza difractometrică a aliajului experimental în stare laminat T651 şi supus ulterior diferitelor tratamente de îmbătrânire

Analiza calitativă de fază prin difracție de raze X a evidentiat natura policristalină a eșantioanelor analizate. Fazele cristalografice au fost identificate conform bazei de date ICDD Release 2015. Parametrii celulei elementare, respectiv dimensiunea de cristalit au fost calculati folosind metoda Rietveld cu ajutorul programului TOPAS si a bazei de date FindIt si corespund fisei PDF: $Al_{0.97}Mn_{0.03}$ (01-074-5245), redată în tabelul 3.2. O analiză detaliată a fazelor din aliajul experimental arată faptul că matricea metalică de soluție solidă α are un parametru de rețea de 74.5 nm. Fazele Mg_2Si și α-AlFeSi nu au putut fi identificate, fiind în proporție foarte mică. Se remarcă totuşi faptul că parametrul de rețea se modifică semnificativ prin aplicarea diferitelor tratamente de îmbătrânire, fiind situat în domeniul 55.5 - 75.5nm.

3.4 Analiza la microscopul electronic cu baleiaj

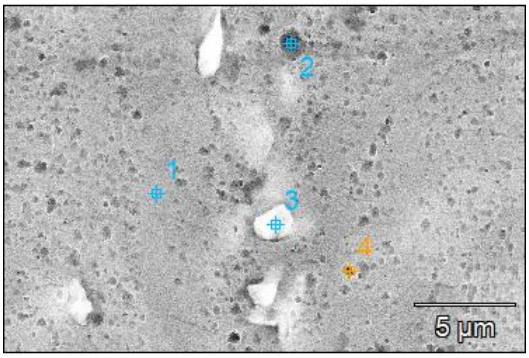
Rezultatele privind analiza la microscopul electronic cu baleiaj A fost efectuată pe epruvetele cu cea mai mare durată de menținere la fiecare temperatură, respectiv 190^0C, 160^0C, 140^0C, efectuându-se atât identificarea compozițională a fazelor durificatoare ale matricii metalice,

cât și distribuția elementelor de aliere. Se remarcă faptul că imaginile obținute sunt similare, singurul fapt care le diferențiază fiind dimensiunea particulelor, precum și modificări ușoare ale compoziției chimice locale. Astfel, în cazul aliajului 6082 îmbătrânit la 190^0C/24h se fac remarcate particule geometrice de Mg_2Si, particule plachetare de α-AlFeSi și particule globulare complexe de (Mg_x $Mn_yFe_zSi_t$) (**fig. 3.2.3**). Distribuțiile magneziului și aluminiului sunt omogene, iar imaginile din **fig. 3.24 i, j, k** arată prezența acestor particule complexe. Dimensiunea maximă este de circa 5 μm (fapt evidențiat atât în **fig. 3.23 d**, cât și în **fig. 3.24 a**.

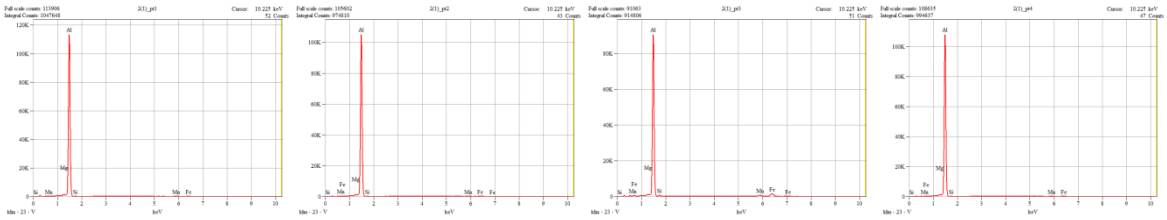


a **b** **c** **d**

***F*ig.0.16 - Imagini SEM ale aliajului experimental de aluminiu 6082, stare T651, îmbătrânit la 190°C/24h, atac acid fluorhidric 5%, la diferite puteri de mărire ale microscopului: a - x500; b - x1000; c - x2000; d - x5000**



a



b c d e

zona	*Micro-compoziție locală (%gr.)*				
	Mg	*Al*	*Si*	*Mn*	*Fe*
1	0.59	98.81	0.00	0.37	0.24
2	0.60	98.36	0.00	0.52	0.52
3	0.52	88.73	2.12	2.34	6.28
4	0.57	98.51	0.00	0.53	0.39

f

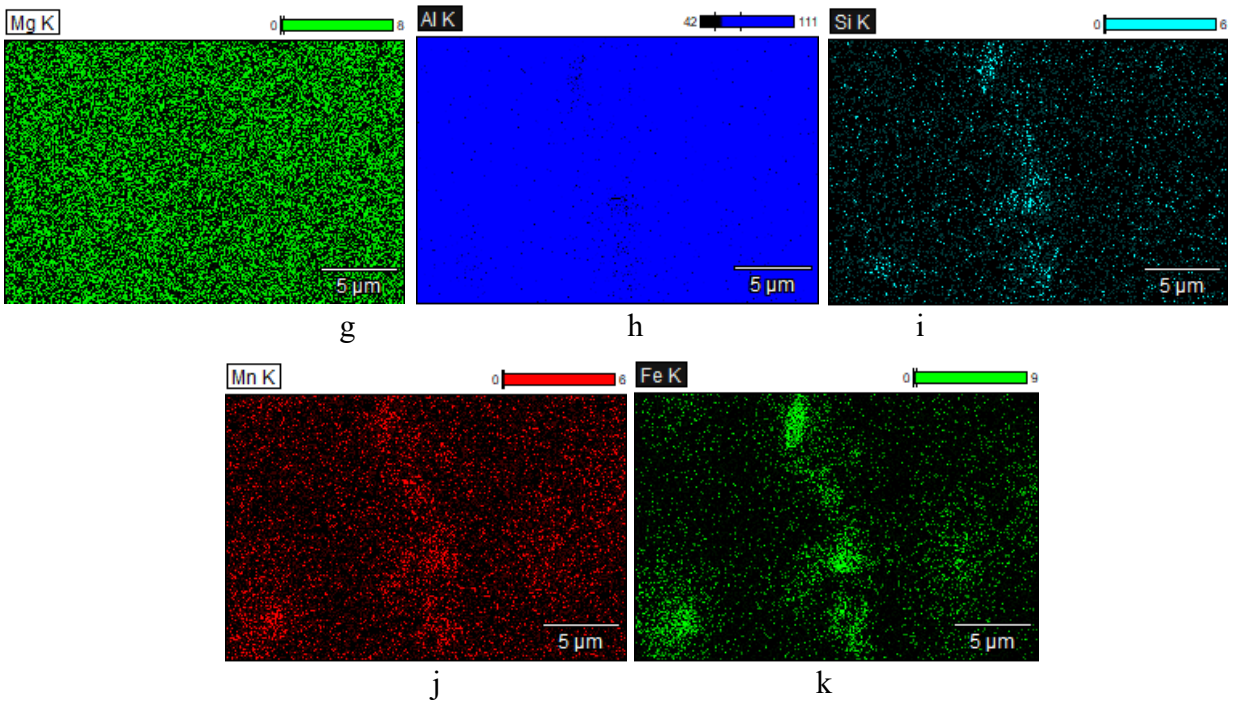


Fig. 0.17 - Analiza cantitativă și calitativă SEM a aliajului experimental de aluminiu 6082, stare T651, îmbătrânit la 190°C/24h, atac acid fluorhidric 5%: a- imagine SEM, cu indicarea punctelor de investigat; b,c,d,e- EDAX ale punctelor investigate; f - microcompoziția locală a punctelor investigate; d - distribuția magneziului; h - distribuția aluminiului; i - distribuția siliciului; j - distribuția manganului; k - distribuția fierului

CAPITOLUL 4 - COMPORTAREA MECANICĂ A ALIAJULUI DE ALUMINIU 6082, ÎN DIFERITE STĂRI STRUCTURALE

4.1 Determinarea caracteristicilor mecanice ale aliajului experimental în diferite stări structurale de tratament termic

Caracterizarea completă a unui material metalic a fost realizată prin determinarea caracteristicilor mecanice ale acestuia. În urma aplicării tratamentelor termice de îmbătrânire artificială au fost obținute următoarele valori ale caracteristicilor mecanice, indicate sintetic în **fig.4.1...fig.4.6.** Ca o concluzie generală se constată că prin aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire la 190^0C, 160^0C sau 140^0C, cu diferite durate de menținere (1h, 12h sau 24h) are loc creșterea valorilor rezistenței la rupere, limitei de curgere și a rezilienței. Tratamentul termic de îmbătrânire la 140^0C/24h conduce la valorile cele mai mari ale caracteristicilor mecanice, respectiv 402 MPa (rezistența la rupere), 321 MPa (limita de curgere) și 30 J/cm^2 (KCV) față de aceleași caracteristici ale aliajului martor, fără tratament termic de îmbătrânire, respectiv 208 MPa (rezistența la rupere), 112 MPa (limita de curgere) și 25 J/cm^2 (KCV).

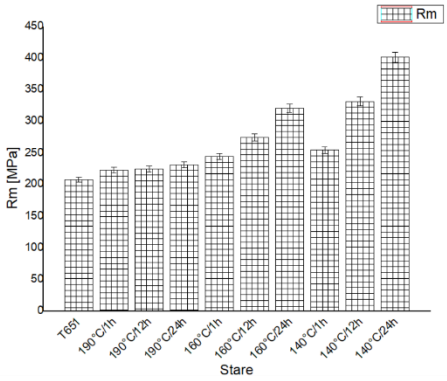


Fig. 0.1 - Histograma valorilor rezistenței la rupere a aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

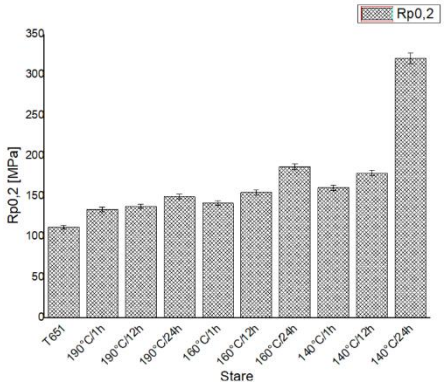


Fig. 0.2 - Histograma valorilor limitei de curgere a aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

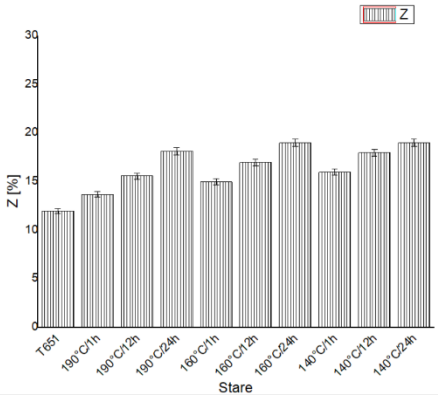


Fig. 0.3 - Histograma valorilor de gâtuire a aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

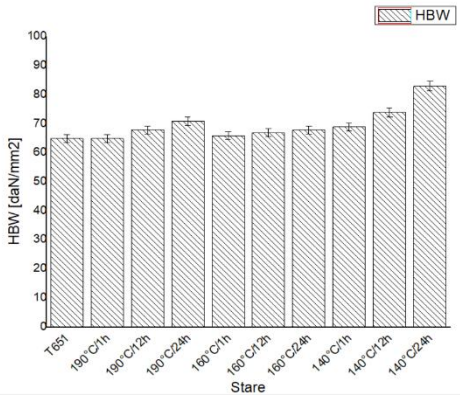


Fig. 0.4 - Histograma valorilor de duritate ale aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

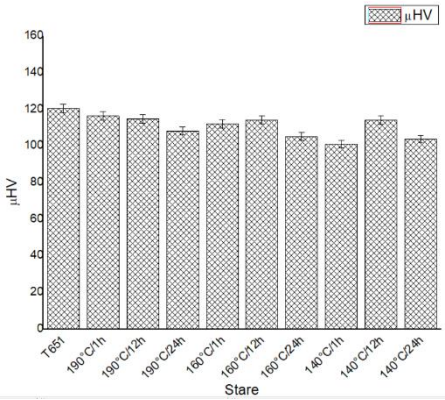


Fig. 0.5 - Histograma valorilor de microduritate ale aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

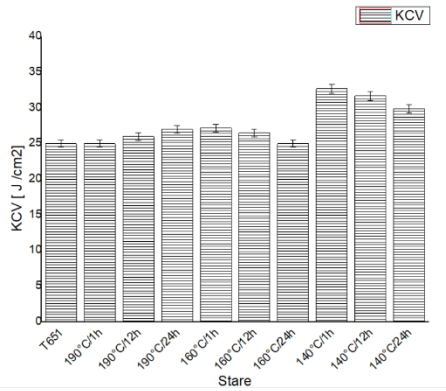


Fig. 0.6 - Histograma valorilor rezilienței aliajului experimental 6082 în diferite stări structurale

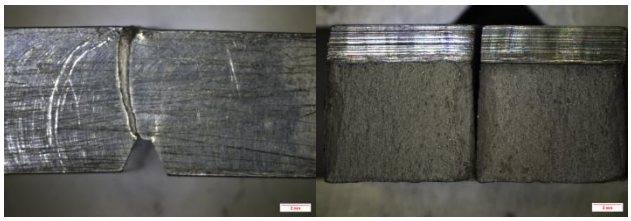
4.2 Analiza fractografică stereomacrostructurală a epruvetelor de reziliențe ale aliajului de aluminiu 6082

Un studiu fractografic asupra aspectului suprafețelor de rupere ale eruvetelor de reziliență Charpy KCV a fost realizat ca element de noutate al acestei lucrări. Analiza fractografică a fost realizată la un stereomicroscop, la scara macroscopică, identificându-se principalele elemente structurale ale ruperii dinamice la impact. Au fost investigate epruvetele corespunzătoare duratelor de menținere de 1 ora si 24 ore, pentru fiecare tempeatură de tratament termic de îmbătrânire, respectiv 190°C, 160°C și 140°C pentru a se indentifica elementele structurale de diferențiere. Ca o observație generală ruperea este dinamică, cu aspect fibros, cu diferențieri ale propagării frotului de rupere datorate stărilor structurale ale epruvetelor.



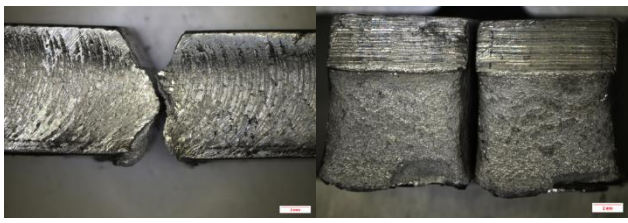
a b

Fig. 0.7 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 (proba martor, U): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversală



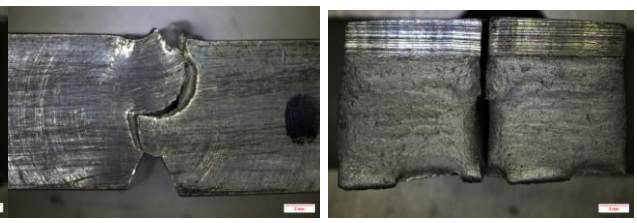
a b

Fig. 0.8 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 + 190°C/1h (proba UP): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversal



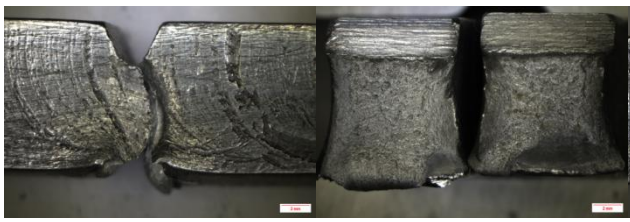
a b

Fig. 0.9 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 + 190°C/24h (proba UL): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversală



a b

Fig. 0.10 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 + 160°C/1h (proba UI): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversală



a b

Fig. 0.11 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 + 160°C/24h (proba UOP): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversală



c d

Fig. 0.12 - Aspectul stereomacrostructural al epruvetelor de reziliență Charpy V, din aliaj de aluminiu 6082, stare T651 + 140°C/1h (proba UOL): a - secțiune longitudinală; b - secțiune transversală

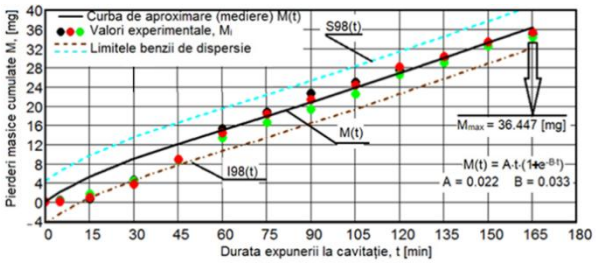
CAPITOLUL 5 - COMPORTAMENTUL CAVITAȚIONAL AL ALIAJULUI EXPERIMENTAL DE ALUMINIU TIP 6082, ÎN DIFERITE STĂRI STRUCTURALE

În acest capitol au fost redate diagramele specifice de comportare și rezistență la cavitație obținute atât pe proba în stare de livrare T651, cât și pe probele supuse diferitelor tratamente termice, câte trei pentru fiecare temperatură a tratamentului termic de îmbătrânire artificială la 190^0C, 160^0C și 140^0C și una cu suprafața retopită prin metoda WIG.

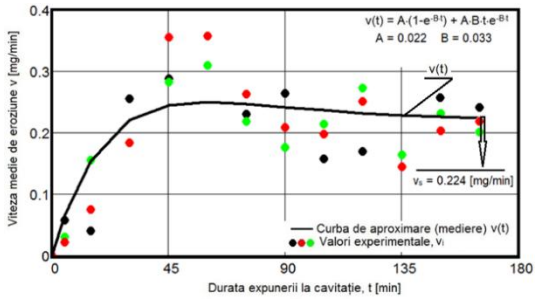
5.1 Comportarea aliajului experimental în stare de livrare (Martor-T651)

5.1.1 Diagrame și parametri specifici comportării și rezistenței la eroziunea cavitației ale aliajului experimental, proba martor

Diagramele specifice comportării și rezistenței epruvetelor experimentale ale aliajului în stare de livrare, proba martor sunt prezentate în **fig.1**. Conform cutumei laboratorului, în legendele acestora sunt detaliate informații despre valorile experimentale, acuratețea testării și valorile parametrilor recomandați de normele ASTM G32-2016 [15] în evaluarea comportării și rezistenței structurii la solicitările ciclice ale microjeturilor și undelor de șoc. În **fig.5.1** sunt folosite rezultatele obținute pe cele trei probe testate din starea de semifabricat laminat (martor). Valorile experimentale ale celor trei probe, din **fig.5.**1, sunt exprimate de punctele de culoare roșie, verde și negru, determinate pe cele 12 perioade intermediare (câte una de 5 și 10 minute și 10 perioade intermediare de 15 minute). Având în vedere rezultatele cercetărilor recente, oferite de literatură [2-5, 7, 8, 21-29], se pot face remarcate următoarele observații: - evoluția curbei de mediere a valorilor experimentale, **fig.5.1a**, obținute pentru pierderile de masă cumulată (M(t)), are formă convexă pe prima parte a atacului (0...45 minute) și este urmată de creștere liniară pe ultima parte (45...165 minute), până la valoarea maximă M_{max};- evoluția curbelor v(t), **fig.5.1b**, care mediază valorile experimentale obținute pentru vitezele de eroziune, prezintă creștere spre o valoare de maxim în intervalul 30...75 minute, urmată de descreștere asimptotică spre valoarea finală v_s (viteza de stabilizare). Acest mod de evoluție, după cum se poate vedea din analizele realizate în capitolele referitoare la proprietățile mecanice și morfologia degradării structurale, este efectul structurii și al proprietăților mecanice rezultate prin regimul de tratament termic.- abaterea medie standard a epruvetelor martor este de $\sigma = 2.213$, adică eroarea de aproximare este de ($\pm$ 2%) a valorilor experimentale de către curba de mediere M(t).



a) Variația pierderilor de masă cu durata cavitației: abaterea medie standard $\sigma = 2.213$ (eroare de aproximare ± 2%)



b) Variația vitezei de eroziune cu durata cavitației

Figură 0.1 - Diagramele specifice ale epruvetelor experimentale în stare de livrare, T451-651

5.1.2 Morfologia degradării structurale ale epruvetelor solicitate la cavitație, proba martor

Rezultatele analizei microstructurale ale spruvetelor martor solicitate la cavitație sunt redate în **fig.5.2.** Imaginie din **fig.5.2** sunt realizate atât la stereomicroscop, la diferite puteri de mărire, cât și la microscopul optic metalografic. Astfel, rezultatele comparative ale măsurătorilor adâncimii maxime de pătrundere a ataculuicavitațional de la stereomicroscop și de la microscopul optic metalografic sunt redate în **fig. 5.2a**, și centralizate în **tabelul 5.1**. Se semarcă faptul ca adâncimea maximă de pătrudere a ataculuicavitațional la epruvetele în stare T651 este similară la cele două analize comparative, respectiv 490 μm la stereomicroscop și 491 μm la microscopul optic metalografic, ceea ce arată reproductibilitatea măsurătorilor la diferite tipuri de microscoape. Analiza fractografică realizată la stereomicroscop este redată în **fig. 5.2b, c,** care surprinde suprafața atacată cavitațional în vedere frontală, cu prezența a numeroase caverne, interconectate și aspect rugos al suprafeței degradate cavitațional. Analiza cantitativa a măsurării diametrelor suprafețelor supuse ataculuicavitațional (redate sintetic în **tabelul 5.1**) îndică faptul că suprafața totală atacată de eroziunea cavitațională este de circa 85%, iar suprafață cea mai atacată de eroziunea cavitațională este de 74%, fapt ilustrat în **fig. 5.2 d, e, f**.

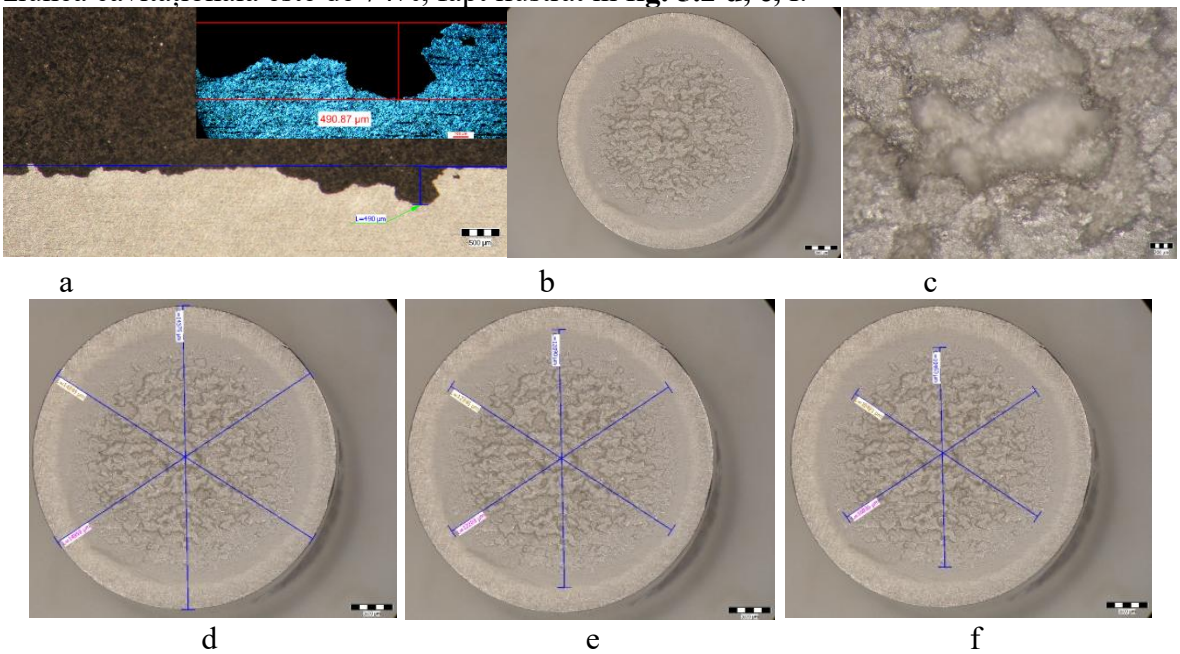


Fig. 0.2 - Analiza cantitativă și calitativă metalografică a suprafețelor epruvetei experimentale din aliaj 6082, stare de livrare, proba martor (stare aliaj T651 călire de punere in solutie la 525°C mentinere 4 ore, racit in apă): a - imagini ale măsurării adâncimii maxime de pătrundere a cavitației (fundal imagine - aspect stereomicroscopic, dreapta sus - imagine la microscopul metalografic); b - imagine în secțiune frontală la stereomicroscop, x8; c - detaliu b, x56; d - imagine la stereomicroscop cu determinarea diametrulor epruvetei solicitate la cavitație; e -imagine la stereomicroscop cu determinarea diametrelor întregii zone afectate de cavitație; f - imagine la stereomicroscop cu determinarea diametrelor zonei celei mai afectate de cavitație

5.5 Evaluarea rezistențelor la cavitație ale epruvetelor experimentale din aliajul 6082 în diferite stări structurale

Histogramele din **fig. 4.23** și **fig.4.24** arată diferențele de rezistență la solicitările hidrodinamice ale cavitației vibratoare, pe care le-au avut cele 11 stări cercetate, în care simbolizarea (notarea) este simplificată: prin temperatură și durata de menținere, repectiv prin WIG

pentru regimul de retopire.Histograma din **fig.5.23** permite evaluarea rezistenței la cavitație a structurii suprafețelor probelor. Raportul dintre valorile parametrilor R_{cav}, oferă imagine asupra diferenței dintre rezistențele la cavitație ale structurilor suprafețelor probelor, și dau informații despre efectele regimurilor de tratament termic, respectiv al retopirii WIG. De asemenea, datele din histograma prezentată în **fig.5.24** arată dependența adâncimii medii de eroziune de rezistența structurii la eroziunea prin cavitație. Concret, cu cât rezistența la cavitație este mai mare cu atât aria eroziunii produse în suprafața atacată, respectiv dimensiunile cavernelor sunt mai mici.

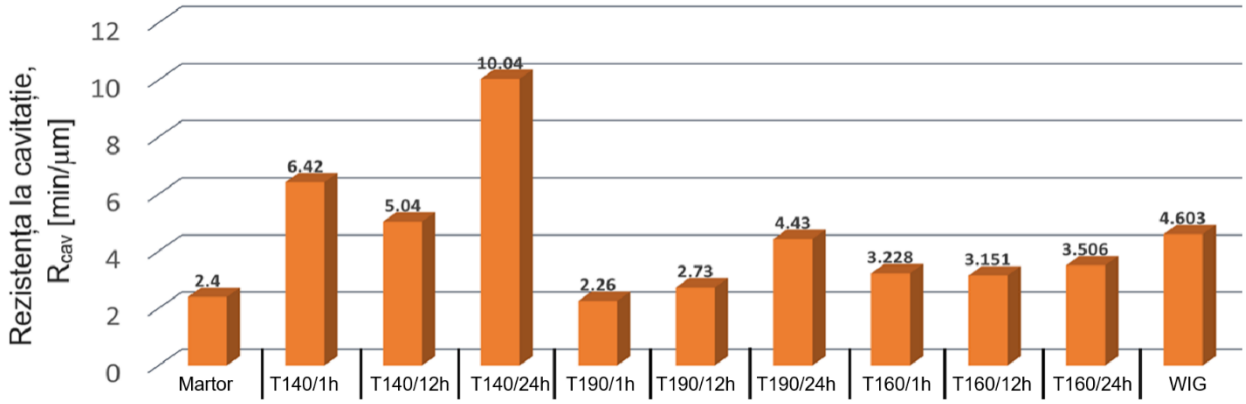


Fig. 0.3 - Histograma comparării rezistențelor la cavitație ale aliajului 6082, în diferite stări structurale

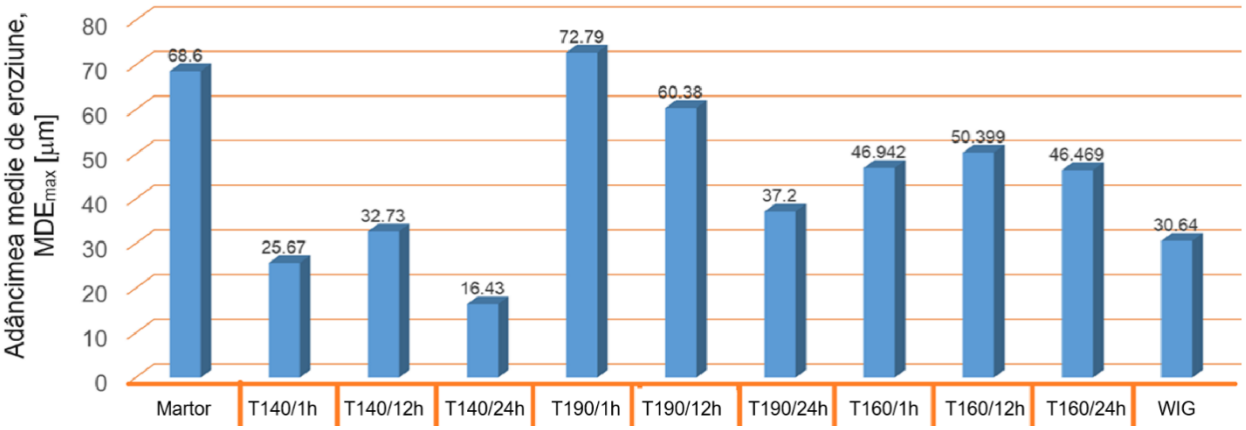


Fig. 0.4 - Histograma comparării adâncimilor de eroziune ale aliajului 6082, în diferite stări structurale

Raportarea la starea de semifabricat, folosind pe oricare dintre cei doi parametri (R_{cav} sau MDE_{max}), arată că structura cu cea mai bună rezistență, în care cavernele rezultate în cele 165 minute de cavitație sunt cele mai mici, este a probelor din starea 140℃/24h, iar cea mai slabă rezistență, în care dimensiunile ariei distruse de cavitație și ale cavernelor sunt cele mai mari, este a probelor din starea 190℃/1h. Sporurile de rezistență la solicitarea erozivă a cavitației vibratoare, conferite de regimurile de tratament analizate, respectiv de retopirea WIG, față de starea de semifabricat (Martor), după valoarea oricărui dintre cei doi parametri, sunt: de 2.67 ori pentru starea T140℃/1h, de 2. 1 ori pentru starea T140℃/12h, de 4.18 ori pentru starea starea T140℃/24h, cu 13.75 % pentru starea T190℃/12h, cu 84.6 % pentru starea T190℃/24h, cu 34.5 % pentru starea T160℃/1h, cu 31.3 % pentru starea T160℃/12h, cu 46.1 % pentru starea T160℃/24h și cu 91.8

% pentru starea WIG. Creșterea de rezistență a structurii rezultate prin tratamentul T140**°C**/24h față de regimul T160**°C**/24 este de 2.27 ori, față de regimul T160**°C**/24h este de 2.86 ori și față de a structurii retopite WIG este de 2.18 ori. Din compararea rezistenței dobândite prin retopire WIG cu regimurile T160**°C**/24h și T190**°C**/24h constatăm o creștere de la 4 % până la circa 31 %, ceea ce arată că pentru piese ce lucrează în condiții cu regim de cavitație moderată acest tip de tratament poate fi aplicat. Totodată, se poate observa că prin regimul de tratament T190**°C**/1h nu se realizează de cât o scădere nesemnificativă de rezistență față de a structurii de semifabricat, de circa 0.6 %, ceea ce înseamnă ca acest regim nu este indicat pentru tratarea termică a pieselor solicitate la cavitație, indiferent de intensitatea ei.În schimb, restul regimurilor, în special cele de la temperatura de 140^0C, sunt indicate pentru piese de tip rotoare de pompe și elice de șalupe, care lucrează în regimuri hidrodinamice de cavitație intensă.

Din analiza rezultatelor prezentate în acest capitol s-au desprind următoarele concluzii:

- diferențele dintre valorile experimentale și dispersia acestora față de curbele de mediere M(t) și v(t), exprimată prin valoarea câmpului de toleranță și abaterea medie standard, arată că semifabricatul din care acestea s-au realizat are o microstructură cu dimensiuni mari ale grăunților și compușilor intermetalici, care au ca efect variația largă a valorilor caracteristicilor mecanice (R_m, $R_{p0.2}$, HB, A_5 și KCU - vezi tabelul 4.1);

- evoluțiile curbei M(t), concavă sau convexă pe prima parte a atacului cavitației, urmată de creștere liniară pe ultima parte și a curbei v(t) cu atingerea unui maxim și scădere spre valoarea de stabilizare v_s, arată că suprafața se durifică mecanic pe parcursul solicitării ciclice de către undele de șoc și de microjeturile generate prin implozia bulelor din norul cavitațional;

- forma suprafeței erodate, cu aspect de burete cu caverne mari în plan și adâncime, arată că microstructura este formată din grăunți de mari dimensiuni, indiferent că sunt ai metalului de bază, sau ai compușilor intermetalici fragili;

- diferențele dintre valorile parametrilor rezistenței la cavitației, conform datelor din histogramele de comparație, arată că, în general, utilizarea tratamentelor termice de îmbătrânire artificială și retopire WIG, poate conferi modificări benefice al structurii suprafețelor acestui tip de aliaj, cu indicarea sa spre utilizarea la fabricarea pieselor cu intensitate moderată a hidrodinamicii cavitației;

- valorile parametrilor statistici, abatere medie standard și precizia aproximării valorilor experimentale, confirmă acuratețea regimurilor de tratament termic de îmbătrânire artificială și a derulării programului experimental;

- aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire, în special la 140°C (indiferent de durata de menținere) conduce și la micșorarea suprafeței atacate cavitațional față de cea a suprafeței aliajului martor, de la 74% la 54%, ceea ce poate constitui un alt parametru de apreciere a fenomenului cavitațional;

- aplicarea tratamentelor termice de îmbătrânire conduce de asemenea la obținerea unor adâncimi maxime de pătrundere ale atacului cavitațional cu mult mai mici, de peste 2 ori mai mici, respectiv 215μm (la epruvetele îmbătrânite la 140°C/24 ore), față de 493μm la epruveta martor;

- funcție de regimul de tratament termic, creșterea de rezistență la cavitație a structurii aliajului de aluminiu 6082 stare T651 este de la 13 % până la peste 4 ori. Rezultatele cercetării

conduc spre indicarea regimului de tratament termic a cărui temperatură este de 140^0C, indiferent de durata de menținere (o oră, 12 ore sau 24 ore);

- creșterea rezistenței structurii aliajului 6082 prin retopire WIG este soluție de îmbunătățire a rezistenței la cavitație, dar cercetarea trebuie continuată pentru alți parametri ai regimului, astfel încât rezistența să fie una mult mai mare, pentru a se putea aplica la piese de tip elice de vapoare, sau rotoare de mașini hidraulice (pompe) care lucrează în curenți cavitaționali cu intensitate erozivă foarte puternică.

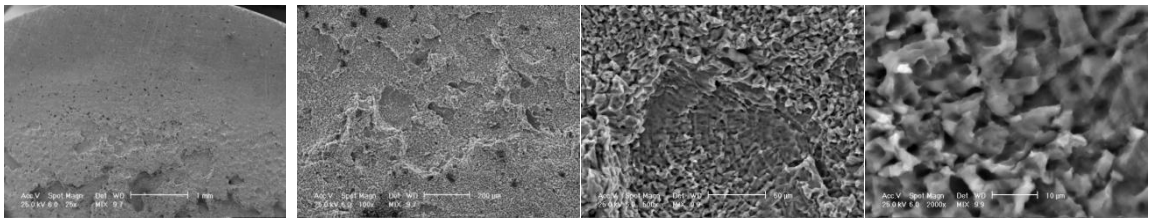
CAPITOLUL 6 - ANALIZA FRACTOGRAFICĂ A EPRUVETELOR SOLICITATE LA CAVITAȚIE DIN ALIAJUL EXPERIMENTAL DE ALUMINIU 6082 ÎN DIFERITE STĂRI STRUCTURALE

În acest capitol au fost prezentate rezultatele analizei fractografice efectuate la microscopul electronic cu baleiaj, la diferite puteri de mărire ale microscopului, precum și la diferite stări structuale ale aliajului de aluminiu 6082 pentru a identifica caracteristicile modului de propagare a ruperii provocate de atacul cavitațional. În final s-a încercat o corelație între starea materialului și modul de rupere prin eroziunea cavitațională. Probele investigate au fost selecționate din epruvetele solicitate la atacul cavitațional pe durata a 165 minute corepunzătoare temperaturilor de tratament termic de îmbătrânire de 190°C, 160°C și 140°C, a menținеri de 24 ore la fiecare temperatură, iar rezultatele au fost comparate cu aspectele fractografice corespunzătoare epruvetei martor, starea T651, fără tratament termic. De asemenea întregul studiu fractografic a fost comparat cu aspectele fractografice obținute de colectivele de cercetare din Universitatea Politehnica Timișoara și UNST care au efectuat lucrări pe epruvetele din alte aliaje de aluminiu, respectiv seria 5xxx, seria 7xxx.

Aspectele fractografice corespunzătoare probei martor, cu excepția epruvetei în stare T651, nesupusă tratamentului termic de îmbătrânire, sunt redate în **fig. 6.1** și **fig. 6.2.** Se remarcă la puteri mici de analiză (**fig. 6.1.a**) prezența unor caverne deschise cu diametre mari, până la 1-3 mm, aflate în centrul epruvetei, în zonele cele mai afectate ale atacului cavitațional. În marginile epruvetei aspectul este fin rugos. Examinarea la putere de mărire X100 (**fig. 6.1.b**) se remarcă cavitațiile cu aspect geometric, cu marginile colțuroase, rezultat al smulgerii de material dinamice. La putere de mărire X500 (**fig. 6.1.c**) se pun în evidență creste ascuțite ale cavernelor cu dispunere în rozete, precum și propagarea prin clivaj a frontului de rupere. La putere de mărire X2000 (**fig. 6.1.d**) cavernele au aspecte colțuroase cu numeroase fisurii negranulare și cu prezența compușilor (geometrici, de culoare albă) în vârful crestelor. Analiza cantitativă și calitativă a suprafețelor erodate cavitațional corespunzătoare probei martor redate în fig. 6.2 pune în evidență faptul că ruperea are un aspect prin clivaj, generat de compuși fragili de tip α-AlFeSi.

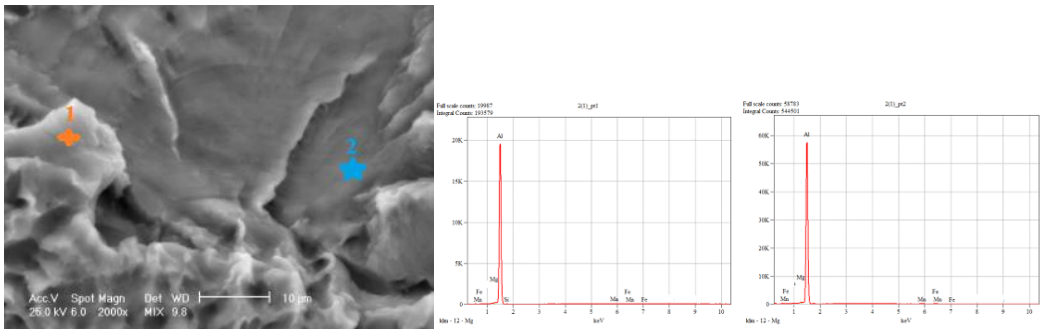
Analizând comportarea aliajului 6082 în diferitele sale stări de tratament termic comparativ fie cu aliajul 5083 / fie cu aliajul 7075 / se pot face următoarele observații: aspectele suprafețelor solicitate la cavitație pot fi considerate similare, cu cavitățile fațetate, cu propagare a frontului de rupere în trepte, prin clivaj, deoarece aliajele de aluminiu fac parte din categoria materialelor metalice cu rezistență relativ scăzută la cavitație; dacă la aliajul 5083 nu există faze secundare care pot produce o durificare volumică, cu propietăți mecanice ridicate după aplicarea diferitelor

tratamente termice (de exemplu, martensita), degradare prin erodare cavitațională este dată de precipitarea fazelor secundare (Mg_5 Al_8) care duce la dislocarea particulelor, lăsând o suprafață erodată cu numeroase fisuri secundare. La aliajul 7075, cavitățile sunt deosebit de mari, colțuroase, care sunt generate de compuși durificatori pe bază de (Mg, Mn, Cu). Cavitățile sunt coalescente, interconectate, lasând suprafața extrem de rugoasă după degradare prin eroziune cavitațională.



a **b** **c** **d**

Figură 0.1 - Imagini SEM ale epruvetei din aliaj de aluminiu 6082, stare T651, proba martor, solicitate la cavitație 165 minute, la diferite puteri de mărire ale microscopului: a - x25; b - x100; c - x1000; d - x500;



a **b** **c**

zona	*Microcompozitie chimică locală, %gr.*				
	Mg	*Al*	*Si*	*Mn*	*Fe*
1	0.43	98.43	0.00	0.71	0.20
2	0.60	97.84	0.54	0.43	0.43

d

Fig. 0.2 - Analiza SEM a epruvetei solicitate la cavitatie din aliaj de aluminiu stare T651, proba martor, solicitate la cavitație 165 minute: a - imagine SEM ; b - EDX a punctului 1; c - EDX a punctului 2; d - microcompoziție locală a zonelor indicate pe imaginea din fig. a

CAPITOLUL 7 - CONCLUZII, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DIRECȚII ȘI PERSPECTIVE ALE CERCETĂRILOR VIITOARE

7.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

- Realizarea unei sinteze documentare privind metalurgia fizică a precipitării în aliajele de aluminiu din seria 6xxx, cu preponderență în aliajul 6082, ca parte integrantă din această serie;
- Realizarea unui program experimental complex, de selectare a epruvetelor experimentale din aliaj 6082, de aplicare a unor tratamente termice stabilite dintr-o documentare aprofundată,

respectiv îmbătrâniri la 190°C, 160°C și 140°C, fiecare cu mentinere la 1 ora, 12 ore și 24 ore și de utilizarea a celor mai adecvate metode și echipamente de cercetare care să permită îndeplinirea obiectivelor propuse inițial;

- Evaluarea structurală completă a epruvetelor experimentale din aliaj de aluminiu tip 6082, în diferite stări structurale, atât la microscopul optic metalografic, la stereomicroscop, cât și la microscopul electronic cu baleiaj, cu analiza de difracții de raze X;
- Evaluarea comportării mecanice a epruvetelor experimentale, cu determinarea principalelor caracteristici mecanice R_m, $R_{p0,2}$, Z, HBW, μHV și KCV;
- Realizarea unui studiu fractografic asupra aspectului suprafețelor de rupere ale epruvetelor de reziliență Charpy KCV la un stereomicroscop, la scara macroscopică, identificându-se principalele elemente structurale ale ruperii dinamice la impact;
- Evaluarea comportării la eroziunea cavitațională a epruvetelor în diferitele stări structurale, prin construirea curbelor de variație a adâncimilor de pătrudere a cavității și a vitezelor de degradare și evaluarea comparativă a rezistențelor la cavitație pentru identificarea celui mai optim tratamnet care poate îmbunătăți comportarea la eroziunea cavitațională;
- Evaluarea originală a stării suprafețelor epruvetelor experimentale testate la eroziunea cavitațională prin analiză fractografică complexă, analize simultane la stereomicroscop, microscopul optic metalografic și la microscopul electronic cu baleiaj;

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE

Articole ISI web of knowledge

1. Istrate, D; Sbarcea, BG; Demian, AM; Buzatu, AD; Salcianu, L; Bordeasu, I; Micu, LM; Ghera, C; Florea, B; **Ghiban, B. ,***CORRELATION BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES-STRUCTURAL CHARACTERISTICS AND CAVITATION RESISTANCE OF CAST ALUMINUM ALLOY TYPE 5083*, Crystals, vol. 12, issue 11, 1538, doi: 10.3390/cryst121111538, published 2022
2. Ghera, C; Odagiu, OP; Nagy, V; Micu, LM; Luca, AN; Bordeasu, I; Demian, MA; Buzatu, AD; **Ghiban, B. ,***INFLUENCE OF AGEING TIME ON CAVITATION RESISTANCE OF 6082 ALUMINUM ALLOY*, University Politehnica of Bucharest Scientific Bulletin Series B- Chemistry and Materials Science, Volume84, Issue4, Page225-237, Published 2022, Indexed2023-01-06
3. Ilare BORDEASU, Brandusa GHIBAN, Vasile NAGY, Vlad PARAIANU, Cristian GHERA, Dionisie ISTRATE, **Alin Mihai DEMIAN**, Petrisor - Ovidiu ODAGIU - Cavitational erosion resistance considerations for alloy 6082 state T651 - U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 85, Iss. 1, 2023, ISSN 1454-2331, Page 213-224,
4. Bordeasu, I; **Ghiban, B**; Micu, LM; Luca, AN; Demian, AM; Istrate, D, *THE INFLUENCE OF HEAT AGING TREATMENTS ON THE CAVITATION EROSION BEHAVIOR OF A TYPE 6082 ALUMINUM ALLOY*, Materials, Volume 16 Issue17, DOI10.3390/ma16175875, 2023
5. **Ghiban, B.,** Demian, A.M., Ghera, C. ,*CAVITATION BEHAVIOR STUDY OF THE AGING HEAT TREATED ALUMINUM ALLOY 7075*, Luca, A.N., Bordeasu, I., Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2540(1), 012037

6. Bordeasu I, Ghiban B, Ghera C, Salcianu C. L , Micu L. M, Stroita D.C, *, Demian A.M, Buzatu A.D, *THE EFFECT OF HARDENING OBTAINED AFTER TIG REMELTING ON THE RESISTANCE OF THE 7075 ALLOY STRUCTURE TO CAVITATION EROSION,* U.P.B. Sci. Bull., Series B, Vol. 87, Iss. 1, 2025 ISSN 1454-2331, Page 163-178

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, Petrisor- 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