



**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
Politehnica București
Școala doctorală Știința și Ingineria Materialelor**

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**Influența condițiilor de procesare
termomecanică asupra caracteristicilor
microstructurale și mecanice ale aliajului 7075**

Autor: Ing. Andrei Valeriu

Coordonator științific: Prof.dr.ing. Vasile Dănuț COJOCARU

București, 2023



**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
Politehnica București
Școala doctorală Știința și Ingineria Materialelor**

TEZĂ DE DOCTORAT

REZUMAT

**Influența condițiilor de procesare
termomecanică asupra caracteristicilor
microstructurale și mecanice ale aliajului 7075**

Autor: Ing. Andrei Valeriu

Doctoral Commission

Presedinte	Prof.dr.eng. Constantin Stelian STAN	de la	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București
Coordonator științific	Prof.dr.ing. Vasile Dănuț COJOCARU	de la	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București
Membru	Conf.dr.ing. Bogdan ISTRATE	de la	Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iasi
Membru	Conf.dr.ing. Claudiu NICOLICESCU	de la	Universitatea din Craiova
Membru	Conf.dr.ing. Nicolae SERBAN	de la	Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București

București, 2023

Influența condițiilor de procesare termomecanică asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075

Drd. Ing. Valeriu ANDREI

Rezumat

În această teză, au fost dezvoltate diferite programe experimentale având ca scop proiectarea rutelor adecvate de prelucrare termomecanică pentru a corela efectele induse de prelucrarea termomecanică asupra microstructurii și proprietăților mecanice ale aliajului de aluminiu 7075, pentru a obține o combinație potrivită a proprietăților de rezistență mecanică și reziliență. Programele experimentale dezvoltate arată un nivel ridicat de complexitate. Rutele de prelucrare s-au bazat pe următorii parametri principali: temperatura de deformare a aliajului 7075, în intervalul 225°C până la 475°C, temperatura tratamentului de călire cu punere în soluție, în intervalul 450°C până la 500°C cu durata tratamentului de călire cu punere în soluție de 10 minute, temperatura tratamentului de îmbătrânire artificială, în intervalul 100°C până la 150°C cu durata tratamentului de îmbătrânire artificială de 12 ore.

Microstructura aliajului 7075 este constituită din următoarele faze/ compuși: : α -Al, faza - η ($MgZn_2$); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($Al_2Mg_3Zn_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe: $Al_6(Fe,Mn)$, $Al_5Si_2(Fe,Mn)$, $Al_3(Fe,Mn,Cr)$;

Proprietățile mecanice obținute prin testarea la tracțiune (rezistența la curgere, rezistența finală la tracțiune și alungirea la rupere) și reziliență (energia absorbită și elasticitate) suferă modificări în funcție de ruta de procesare termomecanică aplicată aliajului 7075.

Cuvinte cheie: aliaj de aluminiu 7075; procesare termomecanica; faze/compuși; proprietăți mecanice.

CUPRINS

Listă abrevieri și simboluri	IV
Listă figuri.....	V
Listă tabele.....	IX
Abstract / Rezumat.....	XI
Introducere.....	XII
Partea I-a: Prezentarea tematicii de doctorat	1
Capitolul 1. Influența condițiilor de procesare termomecanică asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075.....	1
1.1. Obținerea aluminiului.....	1
1.2. Proprietăți fizice, fizico-chimice și mecanice ale aluminiului	1
1.2.1. Proprietățile fizice ale aliajelor de aluminiu.....	Error! Bookmark not defined.
1.2.2. Proprietățile mecanice ale aliajelor de aluminiu....	Error! Bookmark not defined.
1.2.3. Proprietăți fizico-chimice ale aliajelor aluminiului	Error! Bookmark not defined.
1.3. Clasificarea aliajelor aluminiului	2
1.4. Caracteristici structurale ale aliajelor de aluminiu	3
1.5. Procesare termică a aliajelor pe bază de aluminiu	4
1.5.1. Recoaceri aplicate aliajelor aluminiului	Error! Bookmark not defined.
1.5.2. Încălzirea pentru laminarea la cald	Error! Bookmark not defined.
1.5.3. Călirea de punere în soluție	Error! Bookmark not defined.
1.5.4. Îmbătrânirea.....	Error! Bookmark not defined.
1.6. Procesare mecanică a aliajelor pe bază de aluminiu	Error! Bookmark not defined.
1.6.1. Frezarea	Error! Bookmark not defined.
1.6.2. Placarea semifabricatelor.....	Error! Bookmark not defined.
1.6.3. Laminare la cald	Error! Bookmark not defined.
1.6.4. Laminarea la rece.....	Error! Bookmark not defined.
1.7. Prelucrarea termomecanică a aliajelor pe bază de aluminiu	5
1.8. Utilizarea aliajelor pe bază de aluminiu	5
1.9. Aliajul 7075	6
Partea a II-a: Obiectivele, metodele și conceptele de cercetare folosit	7
Capitolul 2. Obiectivele, metodele și conceptele de cercetare folosit.....	7
2.1. Obiectivele tezei de doctorat	7
2.2. Structura tezei de doctorat.....	7
2.3. Metodele și conceptele de cercetare folosite.....	7
Partea a III-a: Rezultate și concluzii	9
Capitolul 3. Caracterizarea microstructurală și mecanică a aliajului 7075 în stare inițială	9
3.1. Caracterizarea microstructurală a aliajului 7075 în stare inițială.....	9
3.2. Caracterizarea mecanică a aliajului 7075 în stare inițială	11
Capitolul 4. Influența temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075	13

4.1. Influența temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075	Error! Bookmark not defined.
4.2. Influența temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor mecanice ale aliajului 7075	Error! Bookmark not defined.
4.3. Concluzii	14
Capitolul 5. Influența temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075.....	16
5.1. Influența temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 225°C (HR1).....	Error! Bookmark not defined.
5.1.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
5.1.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
5.2. Influența temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 350°C (HR2).....	Error! Bookmark not defined.
5.2.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
5.2.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
5.3. Influența temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 475°C (HR3).....	Error! Bookmark not defined.
5.3.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
5.3.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
Capitolul 6. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075	19
6.1. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 225°C, și călite pentru punere în soluție la 450°C-10min-WQ (HR1-ST1)	Error! Bookmark not defined.
6.1.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.1.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.2. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 225°C, și călite pentru punere în soluție la 475°C-10min-WQ (HR1-ST2)	Error! Bookmark not defined.
6.2.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.2.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.3. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 225°C, și călite pentru punere în soluție la 500°C-10min-WQ (HR1-ST3)	Error! Bookmark not defined.
6.3.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.3.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.4. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 350°C, și călite pentru punere în soluție la 450°C-10min-WQ (HR2-ST1)	Error! Bookmark not defined.
6.4.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.

6.4.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.5. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 350°C, și călite pentru punere în soluție la 475°C-10min-WQ (HR2-ST2)	Error! Bookmark not defined.
6.5.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.5.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.6. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 350°C, și călite pentru punere în soluție la 500°C-10min-WQ (HR2-ST3)	Error! Bookmark not defined.
6.6.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.6.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.7. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 475°C, și călite pentru punere în soluție la 450°C-10min-WQ (HR3-ST1)	Error! Bookmark not defined.
6.7.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.7.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.8. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 475°C, și călite pentru punere în soluție la 475°C-10min-WQ (HR2-ST2)	Error! Bookmark not defined.
6.8.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.8.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.9. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale ale aliajului 7075 deformat plastic la cald, la temperatura de 475°C, și călite pentru punere în soluție la 500°C-10min-WQ (HR3-ST3)	Error! Bookmark not defined.
6.9.1. Evoluția caracteristicilor microstructurale	Error! Bookmark not defined.
6.9.2. Evoluția caracteristicilor mecanice	Error! Bookmark not defined.
6.10. Concluzii	19
Capitolul 7. Concluzii generale și contribuții personale	22
7.1. Concluzii generale	22
7.2. Contribuții personale	24
7.3. Direcții viitoare de cercetare	24
Lista cu lucrările științifice publicate.....	114
Bibliografie.....	115

Listă abrevieri și simboluri

CFC	Cub cu fețe centrate
ASTM	Societatea americană pentru testare și materiale
PTM	Prelucrare termomecanică
PTMI	Prelucrare termomecanică intermediară
PTMF	Prelucrare termomecanică finală
HR	Laminare la cald
ST	Calire de punere în soluție
AT	Imbătrânire
AR	Proba așa cum a fost primită
SEM	Microscopie electronică de baleaj
EDS	Spectroscopie cu dispersie de energie
XRD	Difracție de raze X
OM	Microscopie optică
α -Al	Faza de bază alfa - aluminiu
η	Faza eta ($MgZn_2$)
θ	Faza teta (Al_2Cu_3)
S	Faza S (Al_2CuMg)
T	Faza T ($Al_2Mg_3Zn_3$)

Introducere

Odată cu dezvoltarea rapidă a tehnicii în toate ramurile industriale este necesară cunoașterea și studierea cât mai completă a proprietăților metalelor folosite în construcția mașinilor și aparatelor mecanice, electrice și electronice, a instalațiilor pentru producerea, transformarea și transportul energiei electrice, în vederea utilizării acestora cu mare eficiență.

Unul din metalele cu cea mai largă utilizare, datorită proprietăților sale deosebite, este aluminiul. Se poate spune că nu există ramură a industriei moderne care să se poată dezvolta fără utilizarea aluminiului și aliajelor sale sub forma de pise tunate, forjate sau matrițate, de tablă, benzi, sârma, folii, profile etc. Aceasta explică și dezvoltarea impetuoasă a producției de aluminiu pe plan mondial. Pentru creșterea rezistenței, aluminiu se aliază cu diferite elemente de aliere, pentru tema de cercetare optându-se pentru aliajul 7075.

Alegerea temei de cercetare a fost realizată datorită dezvoltării și utilizării aliajului 7075 în diferite domenii de activitate precum domeniul aeronautic și militar. Aliajul 7075 este un aliaj de aluminiu care are ca element principal de aliere zincul. Conține caracteristici mecanice și ductilitate foarte bune, rezistență ridicată, tenacitate și rezistență bună la oboseală. Având în vedere caracterul aplicativ al temei de doctorat, un rol major în cadrul său îl deține procesarea termomecanică la diferite temperaturi pentru aliajul 7075.

Pentru îndeplinirea obiectivelor tezei de doctorat s-a realizat un program complex de cercetare, care cuprinde 3 etape de procesare mecanică (deformare plastică prin laminare la cald) și de procesare termică (tratament termic de călire de punere în soluție și tratament termic de îmbătrânire artificială)

Structura tezei constă din trei părți. Prima parte conține prezentarea generală și introducerea, vederea metalurgică a aluminiului și aliajelor sale, proprietățile acestora și utilizarea, o prezentare generală a operațiunilor de prelucrare mecanică și termică.

A doua parte cuprinde obiectivele tezei, metodologia prelucrării probelor, caracterizarea avansată și conceptele de cercetare folosite.

Partea a treia cuprinde evoluția microstructurală în timpul prelucrărilor termomecanice, evoluția proprietăților mecanice, procesarea și concluziile generale, contribuțiile personale, recomandările și direcțiile viitoare de cercetare.

Teza se încheie cu lista de referințe, anexe și lista publicațiilor/difuzarea rezultatelor

Partea I-a: Prezentarea tematicii de doctorat

Capitolul 1. Influența condițiilor de procesare termomecanică asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075

1.1. Obținerea aluminiului

Aluminiul este unul dintre cel mai răspândit metal în scoarța Terestră (7,45%) și ocupă locul trei în rândul elementelor după oxigen și siliciu. Acesta există sub formă de compuși în natură datorită activității sale chimice ridicate.

Aluminiul realizat prin electroliză are o pondere de la 99,5% până la 99,8% aluminiu, conține atât impurități metalice cât și nemetalice, dar poate fi purificat prin diverse metode.

În funcție de modul de obținere și de compoziția chimică aluminiul se poate clasifica în:

- aluminiul de puritate tehnică, care conține de la 0,15 – 1% impurități. Este destinat prelucrării prin laminare la temperaturi înalte (laminare la cald) sau la temperaturi joase (laminare la rece) și în turnatorii. Este folosit și pentru obținerea de pulberi de aluminiu și a diferitelor aliaje de aluminiu;
- aluminiul de înalta puritate, care conține de la 0,005 – 0,05% impurități. Este folosit la producerea de aparaturi chimice speciale, condensatori electrici etc.;
- aluminiul extra pur, care conține cel mult 0,0001% impurități, se obține prin topire zonală, este folosit pentru cercetări științifice, în tehnica nucleară, în tehnica semiconductorilor.

Aluminiul se poate alia ușor cu elemente precum: brom, crom, fier, mangan, nichel, titan, zirconiu și formează faze care se pot sau nu dizolva în matricea aluminiului, acestea realizând creșteri ale rezistenței și durității, dar și creșterea stabilității la cald a aliajelor [1,3-5].

1.2. Proprietăți fizice, fizico-chimice și mecanice ale aluminiului

Proprietățile fizice, fizico-chimice și mecanice ale diverselor produse de aluminiu pot fi influențate de impurități. Impuritățile cele mai des întâlnite în aluminiu sunt fierul și siliciul.

Fierul nu se poate dizolva în aluminiu și formează o pondere de 7% Al_3Fe (1,7% Fe) și eutectic Al- Al_3Fe . Impuritatea de fier în aluminiu la nivel microscopic constă din grăunți poliedrici de aluminiu și precipitate aciforme de Al_3Fe . Prezența simultană a fierului și a siliciului produce două noi faze, faza α (Fe_3SiAl_3) și faza β ($FeSiAl_5$), care nu apar în aliajele binare. Acești compuși localizați la limitele grăunților de aluminiu reduc plasticitatea aluminiului [6].

1.3. Clasificarea aliajelor aluminiului

Aluminiul este asociat grupei a III-a tabelului periodic al elementelor, conține un izotop stabil ^{27}Al și cinci izotopi instabili (^{24}Al , ^{25}Al , ^{26}Al , ^{28}Al) cu timpi de reducere la jumătate cuprins între 2,10 secunde și 394 secunde. Aluminiul se definește prin maleabilitate mare, duranță scăzută, conductivitate electrică specifică ridicată, conductibilitate termică ridicată și o foarte mare rezistență la coroziune în mediul înconjurător și acizi organici. Aluminiul are o densitate de numai $2,7 \text{ g/cm}^3$, aproximativ o treime din cea a oțelului ($7,83 \text{ g/cm}^3$).

Principalele caracteristici ale aluminiului sunt prezentate în Tabelul 1.2.

Tabel 1.1. Caracteristicile aluminiului [18].

Proprietatea	Valoarea
Număr atomic	Z=13
Masa atomică	A=26.98 at/g
Rețeaua cristalină	CFC
Parametru de rețea (la 20°C)	a= 4.04Å
Temperatura de topire	660°C
Punct de fierbere	2518°C
Densitate	2.7 g/cm ³
Conductivitatea termică	237W

Aliajele de aluminiu elaborate prin retopire se împart în trei grupe:

- aliaje deformabile fără transformări de fază solidă;
- aliaje deformabile cu transformări de fază în stare solidă, apte de durificare structurală prin tratamente termice de călire de punere în soluție și îmbătrânire;
- aliaje de turnătorie, cu transformare eutectică la solidificare și cu transformare parțială în stare solidă, unele dintre ele fiind apte de durificare prin tratamente termice de călire și îmbătrânire [25].

Aliajele aluminiului se clasifică astfel: aliaje deformabile tratabile termic și netratabile termic, turnate tratabile termic și netratabile termic.

Tabel 1.2. Clasificarea aliajelor cu bază de aluminiu [16].

	Clasa	Seria	Elemente principale de aliere
DEFORMABILE	Tratabile termic	2xxx	Cu, (Mg)
		6xxx	Mg, Si
		7xxx	Zn, Mg, (Cu)
	Netratabile termic	1xxx	Al
		3xxx	Mn, (Mg)
		5xxx	Mg
TURNATE	Tratabile termic	2xxx	Cu
		3xxx	Si, Cu/Mg

		7xxx	Zn, (Mg)
	Netratabile termic	1xxx	Al
		4xxx	Si
		5xxx	Mg

1.4. Caracteristici structurale ale aliajelor de aluminiu

Modificarea proprietăților de structură în procesele de laminare și termice iau în considerare proprietățile prezentate mai jos:

- Microstructura – dimensiunea, configurația și orientarea grăunților față de direcția de laminare;
- Substructura – structura internă a grăunților deformați, deosebindu-i de grăunții recristalizați;
- Textura - orientarea cristalografică a grăunților.

Tabelul 1.4 conține mai multe faze corespunzătoare aliajelor de aluminiu din seria 7xxx conform bazei de date Thermo-Calc [7, 30, 41].

Tabel 1.3. Nume de faze comune corespunzătoare aliajelor aluminiului din seria 7xxx [30].

Nume faza	Nume comun și descriere
Al ₁₅ Si ₂ M ₄	Un precipitat cubic, care provine din sistemul ternar Al-Mn-Si, cunoscută ca și precipitat de tip τ ₉ , Al ₁₅ Mn ₃ Si ₂ , Al ₁₆ Mn ₄ Si ₃ sau Al ₁₅ Mn ₄ Si ₂ . În acest precipitat Mn poate fi înlocuit cu Fe, precum și cu Cr și Mo. Da asemenea, în unele aliajele de aluminiu este identificată drept faza α.
Al ₁₃ Fe ₄	O aluminură de fier, care se formează adesea ca fază primară în timpul turnării, numită Al ₃ Fe.
Al ₂ Cu – C16	Așa-numita fază θ - Al ₂ Cu, se formează în multe aliaje de aluminiu care conțin Cu.
Al ₂ Cu_OMEGA	Ω-Al ₂ Cu, un precipitat metastabil și versiunea coerentă a fazei θ.
θ' (theta_prime)	Un precipitat semi-coerent cu o stoichiometrie a Al ₂ Cu în α-(Al), adică zonele GPI.
THETA_DPRIME	Precipitate metastabile coerente în α-(Al), denumite și zone GPII. Are o stoichiometrie apropiată de Al ₃ Cu.
BETA_DPRIME	Precipitat metastabil β'' legat de Mg ₂ Si care se formează în aliaje pe bază de Al-Mg-Si. Poate conține atomi de Al (Al ₂ Mg ₅ Si ₄) sau poate fi fără Al (Mg ₅ Si ₆).
β' (beta_prime)	Precipitat metastabil β' legat de Mg ₂ Si, alias Mg ₉ Si ₅ /Mg _{1.8} Si.
U1_Al ₂ MgSi ₂	Un precipitat metastabil pre-β Al-Mg-Si care conține Al, U1_Al ₂ MgSi ₂ .
U2_Al ₄ Mg ₄ Si ₄	Un precipitat metastabil pre-β Al-Mg-Si care conține Al, U2_Al ₄ Mg ₄ Si ₄ .
Al ₁₈ Fe ₂ Mg ₇ Si ₁₀	O fază cuaternară, alias Al ₈ FeMg ₃ Si ₆ , Q, PHI și H_PHASE.

Al ₆ Mn	Un compus comun Al-Mn care se formează în aliaje de aluminiu care conțin Mn. Mn poate fi înlocuit cu, Cu și Fe, mai ales într-o măsură mai mare de către acesta din urmă.
Al ₂₈ Cu ₄ Mn ₇	O fază intermetalică Al-Cu-Mn care se formează în aliajele de aluminiu.
Q_AlCuMgSi	O fază cuaternară stabilă Al-Cu-Mg-Si, numită Q, Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , Al ₃ Cu ₂ Mg ₉ Si ₇ și Al ₄ Cu ₂ Mg ₈ Si ₇ .
QPRIME	Versiunea coerentă / semi-coerentă a Q_AlCuMgSi.
Mg ₂ Si – C1	Mg ₂ Si, se formează în aliaje de aluminiu care conțin Mg și Si.
Al ₉ Fe ₂ Si ₂	O fază ternară comună Al-Fe-Si în aliajele de aluminiu, alias τ6, Al ₅ FeSi, β-AlFeS.
Al ₈ Fe ₂ Si	O fază ternară comună Al-Fe-Si în aliajele de aluminiu, alias τ5, α-AlFeSi.
Al ₇ Cu ₂ Fe	Un compus ternar Al-Cu-Fe care se poate forma în unele aliaje de aluminiu.
DIAMOND_A4	Si, precum și C și Ge.
C14 - LAVES	Un precipitat stabil comun în aliajele de aluminiu din seria 7000, numit și faza η – eta (MgZn ₂) sau faza - M. Această fază include toate fazele de tip MgZn ₂ .
η' (eta-prime)	Faza metastabilă η', este legată de faza η-MgZn ₂ .
T	O fază stabilă în sistemul de aliaje Al-Mg-Zn, Al-Cu-Mg și Al-Cu-Mg-Zn. Este o fază de tip (Al,Cu,Zn) ₄₉ Mg ₃₂ și este adesea identificată ca Al ₂ Mg ₃ Zn ₃ în diverse aliaje de aluminiu.
T'	Faza metastabilă T', este o fază precursor a fazei T.
S	Faza S, este o fază de tip Al ₂ CuMg.
S'	Faza metastabilă S', este o fază precursor a fazei S.
Q_AlCuMgSi	Faza cuaternară Al-Cu-Mg-Si, adică faza Q, alias Al ₅ Cu ₂ Mg ₈ Si ₆ , Al ₃ Cu ₂ Mg ₉ Si ₇ și Al ₄ Cu ₂ Mg ₈ Si ₇ .
Q_Al ₇ Cu ₃ Mg ₆	O fază ternară Al-Cu-Mg, alias Al ₇ Cu ₃ Mg ₆ și faza Q.

În sistemul cuaternar de aliaje unde aluminiul împreună cu zincul, magneziul și cuprul, formează aliajul denumit zical, faza MgZn₂ îmbunătățește duritatea materialului, faza durificatoare Al₂Cu conferă o bună plasticitate dar rezistență scăzută la temperatură. Fierul și siliciul scad plasticitatea, manganul neutralizează influența nedorită a fierului, crescând duritatea și diminuând rezistența la coroziune.

1.5. Procesare termică a aliajelor pe bază de aluminiu

Tratamentul termic este un proces care implică diferite niveluri de încălzire și răcire pentru a modifica proprietățile fizice ale metalelor.

În funcție de caracteristicile urmărite, tratamentele termice se clasifică în:

- recoaceri care au scopul de a restabili structura și proprietățile fizico - chimice ale materialului;
- călire de punere în soluție cu obținerea soluției solide suprasaturate;
- îmbătrânire aplicată după călire de punere în soluție pentru a readuce materialul spre starea de echilibru cu obținerea durificării structurale (durificare prin precipitare) [44].
Tratamentele termice aplicate aliajelor pe bază de aluminiu au două scopuri:
- restabilirea plasticității în vederea aplicării deformării plastice ulterioare;
- durificarea aliajelor pentru a obține caracteristici mecanice maxime sau optime și asocierea cu alte caracteristici cum ar fi rezistența la fluaj, la temperatura înaltă, stabilitate dimensională, rezistența la oboseală, sau proprietăți fizico-chimice (rezistența la coroziune, sub sarcină, aspect după anodizare) [45].

1.6. Procesare mecanică a aliajelor pe bază de aluminiu

Există mai multe tipuri de procesări mecanice ale aliajelor pe bază de aluminiu dintre care cele mai importante sunt următoarele: frezarea, placarea, laminarea la cald și laminarea la rece. Pentru fiecare tip de procesare mecanică există o tehnologie specifică realizată în funcție de forma materiei prime (lingou, slob, bară), de tipul de aliaj și de cerințele clientului intermediar sau final.

1.7. Prelucrarea termomecanică a aliajelor pe bază de aluminiu

Prelucrarea termomecanică (PTM) a aliajelor de aluminiu a fost relativ puțin cercetată și aplicată în țara noastră, în ciuda faptului că necesită o utilizare practică mai mare decât procesele convenționale.

Beneficiile furnizate de proprietățile structurale se pot exploata în două tipuri:

- folosirea de acoperiri adezive în detrimentul celor mecanice, ce conduce la reducerea concentrației tensiunilor interne, mărirea fatigabilității, la simplificarea procesului de laminare în sine și, în cele din urmă, la o rezistență îmbunătățită la fisuri;
- obținerea proprietăților prin tehnici metalurgice.

1.8. Utilizarea aliajelor pe bază de aluminiu

Din 1940 au început să fie introduse în construcția avioanelor aliaje de tip 7075, rezistența mecanică a acestora fiind aproape dublă față de a aliajelor folosite anterior.

Începând din anii 1950, majoritatea constructorilor de avioane nu au mai utilizat aliajul 7075, ci numai aliajele din seria 2xxx pentru structurile critice. Aliajul 7075 a fost îmbunătățit,

perfecționându-se cunoștințele privind tratamentul de protecție. Începând din anii 1970, aliajul 7075 a fost reintrodus treptat [111].

1.9. Aliajul 7075

Aliajul 7075 este un aliaj de aluminiu care are ca element principal de aliere zincul. Conține caracteristici mecanice și ductilitate foarte bune, rezistență ridicată, tenacitate și rezistență bună la oboseală. Este mai susceptibil la fragilizare decât multe alte aliaje de aluminiu din cauza microsegregării, dar are o rezistență la coroziune semnificativ mai bună decât aliajele Al-Cu.

Din compoziția acestui aliaj fac parte următoarele elemente în următoarele intervale: 5,6–6,1% zinc, 2,1–2,5% magneziu, 1,2–1,6% cupru și mai puțin de jumătate de procent de siliciu, fier, mangan, titan, crom și alte metale [118].

În figura de mai jos este prezentată roata roverului Curiosity din aliaj de aluminiu 7075, înainte de a fi atașată la rover și trimis pe Marte, etichetată cu toate părțile sale componente [125].



Figura 1.1. Roată Curiosity din aliaj de aluminiu 7075-T7351 [125].

Partea a II-a: Obiectivele, metodele și conceptele de cercetare folosit

Capitolul 2. Obiectivele, metodele și conceptele de cercetare folosit

2.1. Obiectivele tezei de doctorat

Obiectivele tezei sunt clasificate după cum urmează:

- să aibă o mai bună înțelegere a modului de prelucrare adecvată a aliajului 7075, folosind diferiți parametri de procesare termomecanică și să cuantifice efectele induse asupra microstructurii aliajului și a comportamentului său mecanic;
- să optimizeze caracteristicile microstructurale și mecanice finale ale aliajului 7075;
- să utilizeze diverse tehnici de investigare, cum ar fi microscopia optică și electronică pentru proprietățile microstructurale și testarea la tracțiune și reziliență pentru caracteristicile mecanice.

2.2. Structura tezei de doctorat

Structura tezei constă din trei părți. Prima parte conține prezentarea generală și introducerea, vederea metalurgică a aluminiului și aliajelor sale, proprietățile acestora și utilizarea, o prezentare generală a operațiunilor de prelucrare mecanică și termică.

A doua parte cuprinde obiectivele tezei, metodologia prelucrării probelor, caracterizarea avansată și conceptele de cercetare folosite.

Partea a treia cuprinde evoluția microstructurală în timpul prelucrărilor termomecanice, evoluția proprietăților mecanice, procesarea și concluziile generale, contribuțiile personale, recomandările și direcțiile viitoare de cercetare.

Teza se încheie cu lista de referințe, anexe și lista publicațiilor/difuzarea rezultatelor.

2.3. Metodele și conceptele de cercetare folosite

Pentru îndeplinirea obiectivelor tezei de doctorat s-a realizat un program complex de cercetare, care cuprinde etape de procesare mecanică (deformare plastică prin laminare) și de procesare termică (călire de punere în soluție și de îmbătrânire). În figura 2.1 se prezintă schema programului experimental folosit pentru punerea în evidență a influenței condițiilor de procesare termomecanică asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075.

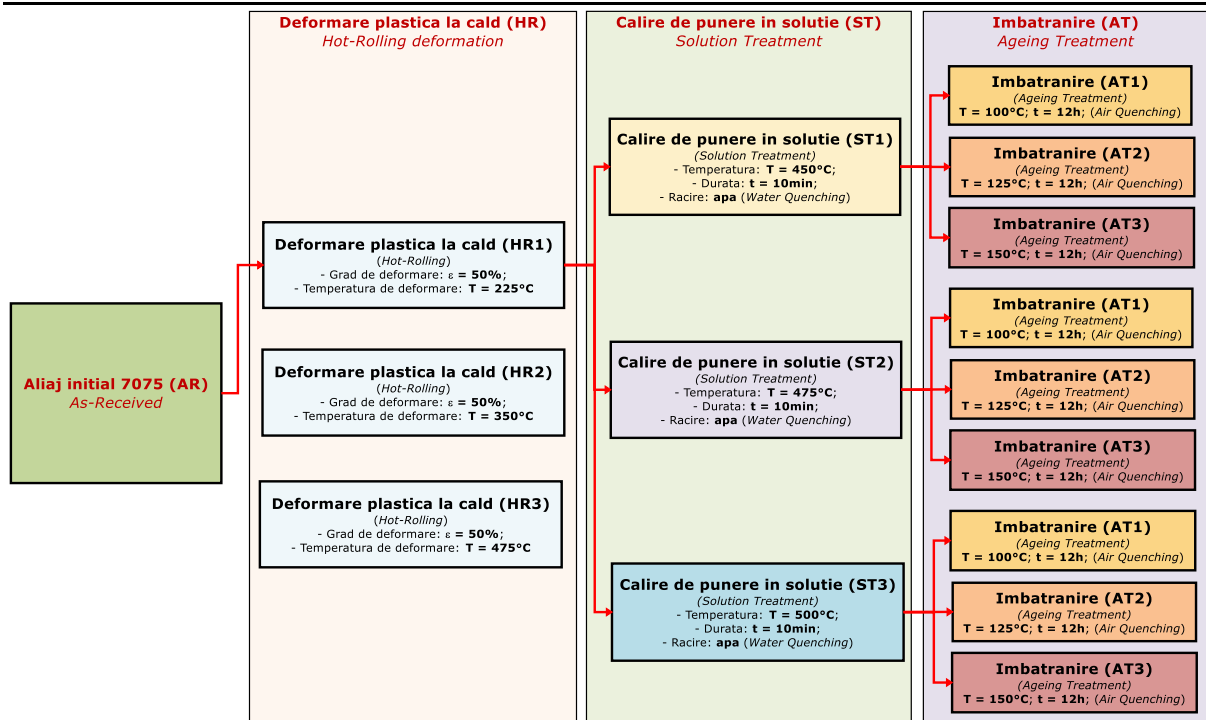


Figura 2.1. Schema programului experimental folosit pentru punerea în evidență a influenței condițiilor de procesare termomecanică asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075.

Deformarea plastică la cald (HR)

În urma deformării plastice la cald au rezultat un număr de 3 stări structurale (HR1, HR2, HR3). Pentru fiecare stare structurală s-au încălzit și deformat plastic la cald un număr de 12 probe. Durata de menținere în cuptorul de încălzire în vederea deformării plastice la cald a fost 2,5 min/mm ($t = 30\text{ min}$).

Călire de punere în soluție (ST) și îmbătrânirea (AT)

În urma tratamentului termic de călire de punere în soluție și de îmbătrânire au rezultat un număr de 9 stări structurale și, respectiv, 27 stări structurale.

Partea a III-a: Rezultate și concluzii

Capitolul 3. Caracterizarea microstructurală și mecanică a aliajului 7075 în stare inițială

3.1. Caracterizarea microstructurală a aliajului 7075 în stare inițială

Aliajul 7075 în stare inițială (*as-received - AR*) a fost complet caracterizat din punct de vedere microstructural. Caracterizarea microstructurală a fost efectuată cu ajutorul următoarelor tehnici de investigare: difracție de raze X (*X-ray diffraction - XRD*), microscopie optică (*optical microscopy - OM*) și microscopie electronică de tip SEM (*scanning electron microscopy - SEM*).

Compoziția chimică a aliajului 7075 folosit este prezentată în tabelul 3.1. Se observă ca acesta este aliat, în principal, cu Zn (5,57%gr), Mg (2,38%gr) și Cu (1,38%gr). De asemenea, în compoziția chimică a aliajului 7075 se mai găsesc, în cantități mai mici, Fe (0,25%gr), Cr (0,19%gr), Si (0,16%), etc.

Tabel 3.1. Compoziția chimică a aliajului 7075 în stare structurală AR.

Zn, %gr	Mg, %gr	Cu, %gr	Fe, %gr	Cr, %gr	Si, %gr	Mn, %gr	Ti, %gr	V, %gr	Al, %gr
5,57	2,38	1,38	0,25	0,19	0,16	0,095	0,029	0,01	rest

Analiza XRD a aliajului 7075 în stare inițială (AR) (figura 3.1), a arătat că în microstructura acestuia sunt prezente următoarele faze și compuși: α -Al, faza - η ($MgZn_2$); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($Al_2Mg_3Zn_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe: $Al_6(Fe,Mn)$, $Al_5Si_2(Fe,Mn)$, $Al_3(Fe,Mn,Cr)$, etc.. De asemenea, analiza XRD arată că faza majoritară prezentă este constituită din faza de bază α -Al.

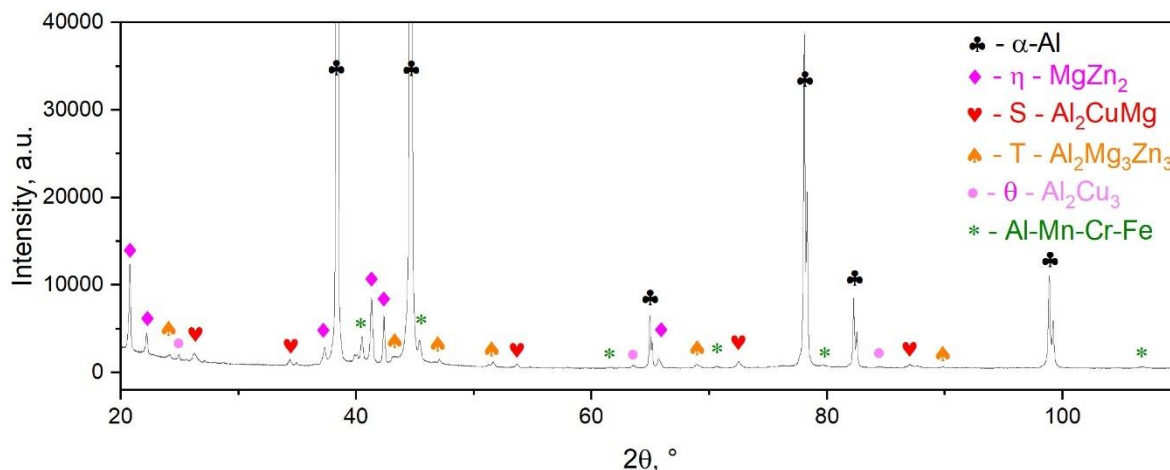


Figura 3.1. Spectrul XRD aferent aliajului 7075 în stare inițială (AR).

Analiza microstructurii aliajului 7075 în stare inițială (AR) cu ajutorul microscopiei electronice SEM (figura 3.2) confirmă observațiile rezultate în urma analizei XRD, arătând că în masa de bază (faza α -Al) sunt prezente disperse o serie de faze secundare și compuși, după cum urmează: faza - η (MgZn_2); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$); faza - θ (Al_2Cu) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe. De asemenea, se observă că fazele secundare η (MgZn_2) și T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$) prezintă o morfologie sferoidală și dimensiune submicronică, în timp ce fazele S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe prezintă o morfologie sferoidală/alungită și dimensiuni micronice.

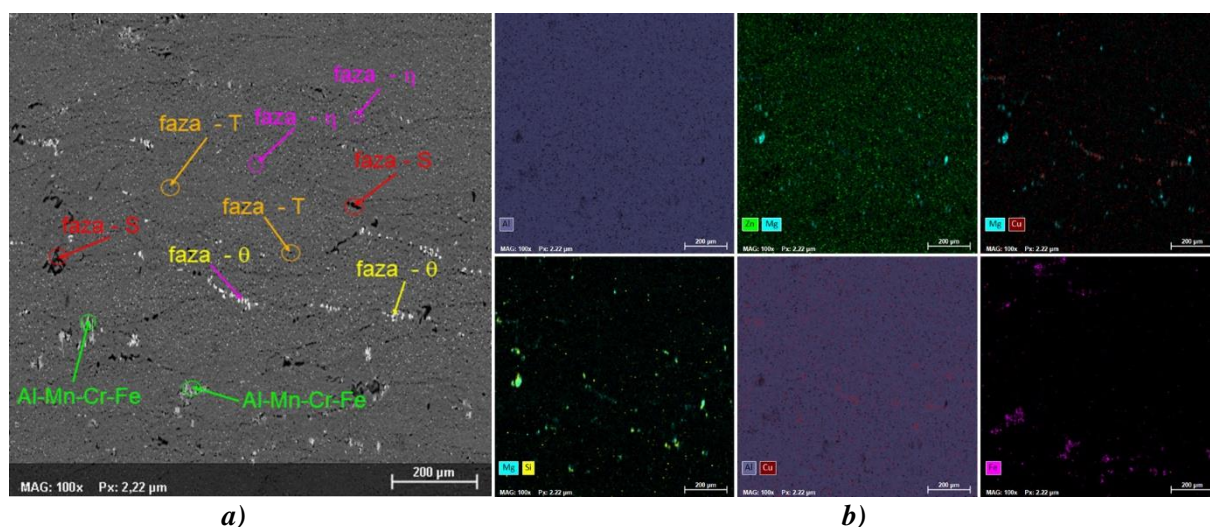


Figura 3.2. Imagine SEM a microstructurii aliajului 7075 în stare inițială (AR) – a ; dispersia principalelor elemente de aliere în masa de bază – b.

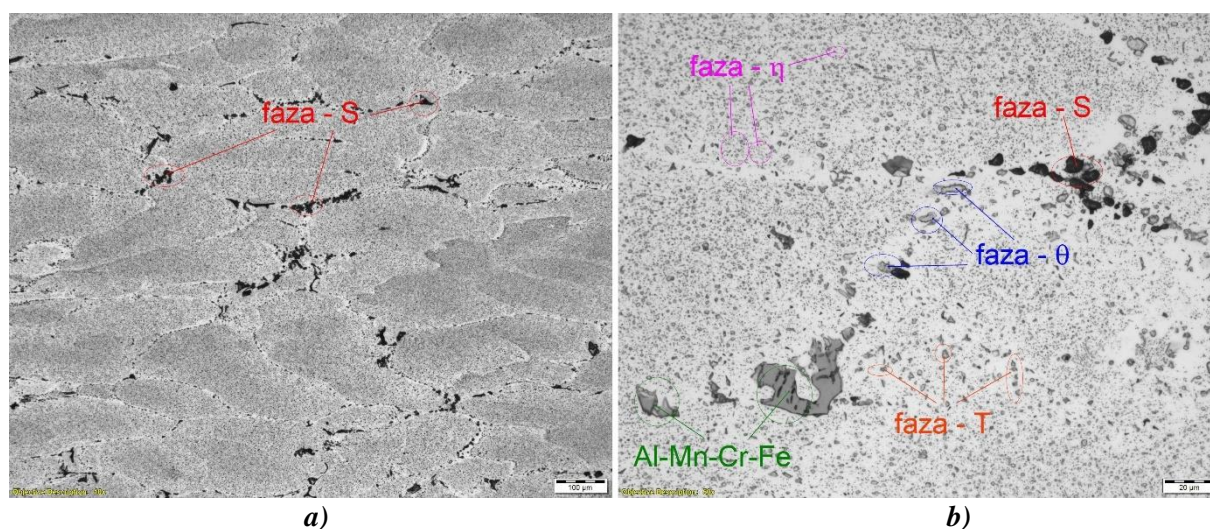


Figura 3.3. Imagine de microscopie optică pentru microstructura aliajului 7075 în stare inițială (AR); a: X100 ; b: X500.

Analiza microstructurii aliajului 7075 în stare inițială (AR) cu ajutorul microscopiei optice (figura 3.3) confirmă observațiile rezultate în urma analizei XRD și microscopiei

electronice SEM. Și în acest caz se observă că în grăunții masei de bază (faza α -Al) sunt prezente disperse fazele η ($MgZn_2$) și T ($Al_2Mg_3Zn_3$), în timp ce la limita de grăunte sunt prezente fazele S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe. De asemenea, microscopia optică confirmă faptul că fazele secundare η ($MgZn_2$) și T ($Al_2Mg_3Zn_3$) prezintă o morfologie sferoidală și dimensiune submicronică, în timp ce fazele S (Al_2CuMg), θ (Al_2Cu) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe prezintă o morfologie de tip chunky / alungită și dimensiuni micronice.

3.2. Caracterizarea mecanică a aliajului 7075 în stare inițială

Aliajul 7075 în stare inițială (*as-received* - AR) a fost complet caracterizat din punct de vedere mecanic. Caracterizarea mecanică s-a efectuat cu ajutorul testelor de tracțiune (*tensile testing*) și a testelor de reziliență (*Charpy impact testing*). Pentru relevanță statistică toate testele mecanice au fost efectuate în duplicat. În figura 3.4 se prezintă aspectul curbelor tipice tensiune-deformație rezultate. Se observă că aliajul 7075 în stare inițială (AR) prezintă o ductilitate ridicată, alungirea la rupere având o valoare mai mare (18-20)%. De asemenea, se observă că limita maximă de rezistență depășește valoarea/pragul de 250MPa.

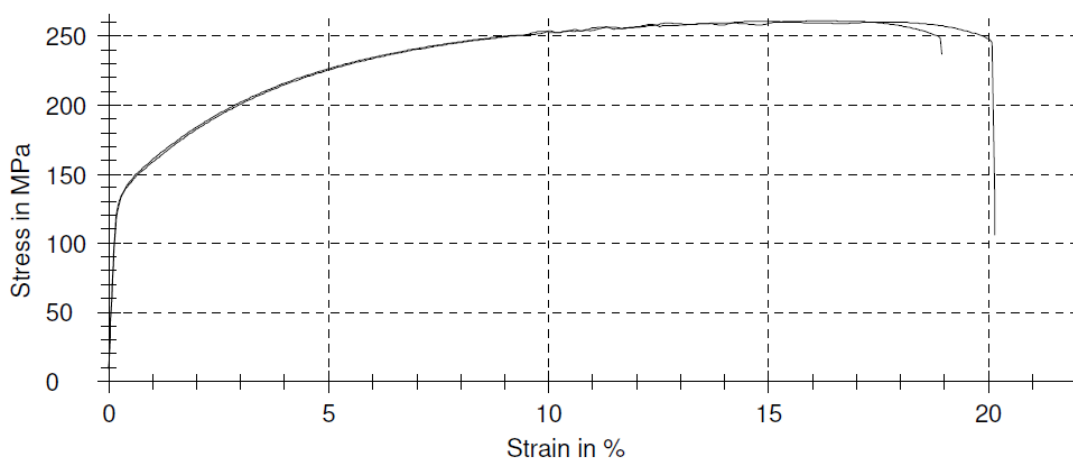


Figura 3.4. Curbe tensiune-deformație tipice pentru aliajul 7075 în stare inițială.

Tabel 3.2. Caracteristicile mecanice pentru aliajul 7075 în stare structurală AR.

Număr probă	Proprietăți mecanice				
	Tracțiuni			Reziliență	
	Limita maximă de rezistență, R_m [MPa]	Limita de curgere, $R_{p0.2}$ [MPa]	Alungirea la rupere, A_{50} [%]	Energia absorbită la rupere, E [J]	Elasticitatea, El [j/cm ²]
0.1	261	145	17	6,53	16
0.2	261	144	17,5	6,66	16
Valoare medie:	261	144,5	17,25	6,59	16

În tabelul 3.2 se prezintă centralizat caracteristicile mecanice determinate pe baza analizei curbelor de tracțiune (tensiune-deformație) și a testelor de reziliență. Se observă că în cazul ambelor teste (tracțiune și reziliență) valorile caracteristicilor mecanice obținute sunt foarte apropiate / aproximativ identice, fapt ce arată / confirmă că aliajul 7075 în stare inițială (AR) prezintă o microstructură omogenă în toată masa de bază.

Capitolul 4. Influența temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075

Pentru studiul influenței temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075 s-a realizat prima etapă de experimentări:

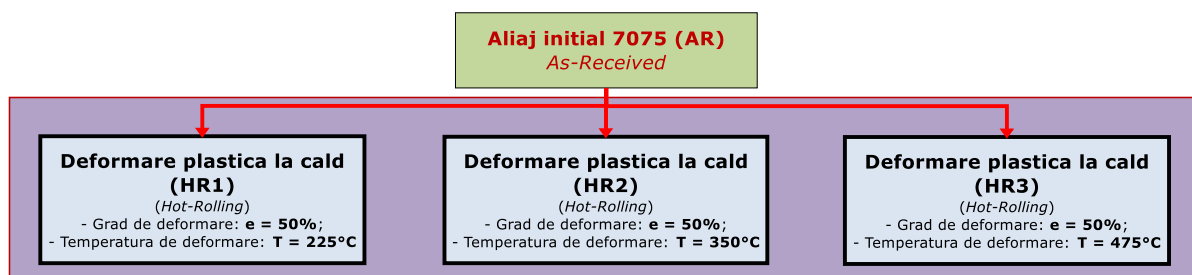


Figura 4.1. Schema de procesare termomecanică (prima etapă) aplicată aliajului 7075 pentru determinarea influenței temperaturii de deformare plastică la cald asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice.

Principalul parametru care a fost luat în considerare la proiectarea rutelor de prelucrare termomecanică aplicate este reprezentat de *temperatura de recristalizare a aliajului 7075*, temperatură situată aproape de 400°C, realizându-se experimente de prelucrare mecanică la temperaturi sub, aproape și peste temperatura de recristalizare.

Prima etapă experimentală (vezi Fig. 4.1) constă în prelucrarea mecanică (prin deformare plastică la cald - HR) a aliajului 7075 așa cum a fost primit (AR) într-un domeniu larg de temperatură, de la 225°C - mult sub temperatura de recristalizare (~400°C) până la 475°C - mult peste temperatura de recristalizare (~400°C).

În toate cazurile, deformarea la cald a fost efectuată prin laminare cu grad total de deformare de 50%, având ca parametru de variație temperatura de deformare (*hot rolling* – **HR**), aceasta fiind situată la 225°C (starea structurală – **HR1**), 350°C (starea structurală – **HR2**) și 475°C (starea structurală – **HR3**).

Având în vedere că durata de menținere la temperature de preelucrarea la cald poate influența drastic microstructura aliajului, pentru a avea o bază de comparație, s-a ales să se aplice aceeași durată de menținere la încălzire pentru toate temperaturile de deformare (225°C - **HR1**, 350°C - **HR2** și 475°C - **HR3**) de 2,5 min / mm grosime proba ($t = 30$ min).

4.3. Concluzii

Pentru prima etapă a schemei de procesare termomecanică aplicată în prezentul studiu cu scopul de a investiga evoluțiile în microstructura și proprietățile mecanice ale aliajului 7075, s-au constatat următoarele concluzii:

- În timpul procesului de deformare plastică la cald, realizat la diferite temperaturi în intervalul 225°C - 475°C, au apărut diferite deformări a texturii coloniilor de grăunți inițiali de-a lungul direcției de laminare, acestea crescând odată cu creșterea temperaturii de laminare;
- Analiza microstructurii optice a aliajului 7075 în stare deformată plastic la cald (**HR**) confirmă observațiile rezultate în urma analizei XRD și microscopiei electronice SEM fiind observate și în acest caz următoarele faze secundare în grăunții masei de bază (faza α -Al): faza - η (MgZn_2); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($\text{Al}_2\text{Mg}_3\text{Zn}_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe;
- Odată cu creșterea temperaturii de deformare plastică la cald, fazele și compușii din masa de bază a aliajului 7075 își schimbă forma, mărimea și dispersia;
- Parametrii cristalografici ai fazei de bază α -Al aferenți aliajului 7075 deformat plastic la cald la diferite temperaturi au evoluat odată cu creșterea temperaturii de laminare prin creșterea parametrului de rețea cristalină α -Al, creșterea dimensiunii medii a domeniului cristalin coerent α -Al și scăderea gradului de deformare reziduală a celulei elementare α -Al;
- În urma analizării curbelor tensiune-deformație se constată că aliajul 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling* – **HR**) prezintă o ductilitate ridicată, alungirea la rupere având o valoare mare (15-18)%, de asemenea, se observă că limita maximă de rezistență depășește valoarea/pragul de 300MPa;
- Proprietățile mecanice ale aliajului 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling* – **HR**) au evoluat astfel:
 - cea mai avantajoasă valoare obținută la rezistența mecanică la tracțiune a fost la proba **HR3** (*laminare la cald: T = 475°C; ϵ = 50%*) cu o valoare de RM = 344 MPa, cu 24,13% mai mare decât valoarea probei **HR2** (*laminare la cald: T = 350°C; ϵ = 50%*) și față de valoarea probei **AR** (*stare inițială*); proprietățile de rezistență mecanică cresc odată cu creșterea temperaturii de laminare;
 - cea mai avantajoasă valoare obținută la limita de curgere a fost la proba **HRI** (*laminare la cald: T = 225°C; ϵ = 50%*) cu o valoare de Rp0.2 = 249 MPa, cu 17% mai mare decât valoarea probei **HR2** (*laminare la cald: T = 350°C; ϵ = 50%*) și cu

41,97% mai mare decât proba **AR** (*stare inițială*); odată cu creșterea temperaturii de laminare scad proprietățile limitei de curgere;

- cea mai avantajoasă valoare obținută la alungire a fost la proba **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*), cu o valoare de $A_{50} = 16\%$, cu 59,37% mai mare decât proba **HRI** (*laminare la cald: $T = 225^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) și cu 7,8% mai mică decât proba **AR** (*stare inițială*); valorile crescute la alungire pentru probele menționate se datorează ductilității materialului, care este bună în stare procesată mecanic odată cu creșterea temperaturii de laminare;

prin comparație cu proba de referință **AR**-17% se poate susține că materialul prezintă o ductilitate foarte bună în stare neprocesată mecanic;

- cea mai avantajoasă valoare obținută la energia absorbită a fost la proba **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) cu o valoare de $E = 6.5 \text{ J}$, cu 9,23% mai mare decât valoarea probei **HRI** (*laminare la cald: $T = 225^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) și cu 1,38% mai mică decât valoarea probei **AR** (*stare inițială*);
- cea mai avantajoasă valoare obținută la elasticitate a fost la proba **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) cu o valoare de $E_l = 17 \text{ J/cm}^2$, cu 11,76% mai mare decât valoarea probei **HRI** (*laminare la cald: $T = 225^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) și cu 5,88% mai mare decât valoarea probei **AR** (*stare inițială*); creșterea temperaturii de laminare îmbunătățește proprietățile rezilienței;

Capitolul 5. Influența temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075

Pentru studiul influenței temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075, s-a realizat a doua etapă experimentală:

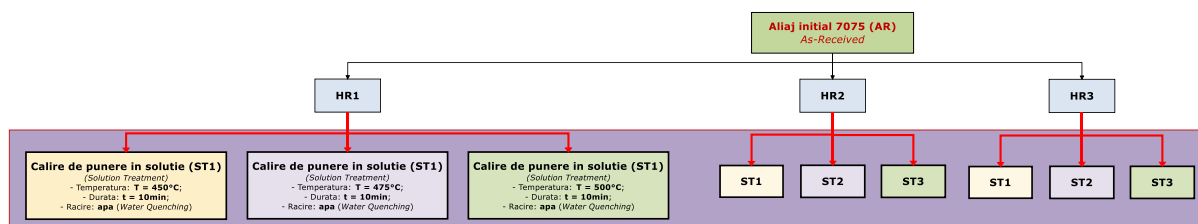


Figura 5.1. Schema de procesare termomecanică (a doua etapă experimentală) aplicată aliajului 7075 pentru determinarea influenței temperaturii tratamentului termic de călire de punere în soluție asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice.

A doua etapă experimentală (vezi Fig. 5.1) constă în experimente de procesare termică dezvoltate la temperaturi sub, apropiate și peste *temperatura eutectică – solidus line* ($\sim 477^{\circ}\text{C}$), deoarece aliajul 7075 posedă un interval larg de temperaturi pentru regiunea dintre linia solidus ($\sim 477^{\circ}\text{C}$) și linia lichidus ($\sim 652^{\circ}\text{C}$), fapt ce permite procesarea acestuia în stare semi-solidă. Având în vedere că prelucrarea termică poate influența microstructura aliajului, pentru a avea o bază de comparație, s-a ales să se aplice tratament termic de călire de punere în soluție după prelucrare mecanică (deformare plastică la cald), la temperaturile de 450°C (starea structurală – *ST1*), 475°C (starea structurală – *ST2*) și 500°C (starea structurală – *ST3*), durata de tratament fiind în toate cazurile de $t = 10\text{min}$.

5.4. Concluzii

Pentru a doua etapă a schemei de procesare termomecanică aplicată în prezentul studiu cu scopul de a investiga evoluțiile în microstructura și proprietățile mecanice ale aliajului 7075, s-au constatat următoarele concluzii:

- După tratamentul termic de călire de punere în soluție, odată cu creșterea temperaturii de la 450°C (*ST1*) la 500°C (*ST3*), fazele au o dimensiune mai mică și mai sfericizată; pe măsură ce temperatura de tratament crește, fazele solubile se dizolvă în soluția solidă.

- Gradul mare de deformare anterioară a aliajului conferă o structură marunțită și, ca urmare, viteza de dizolvare a precipitatelor secundare la temperatura de călire este mai mare.
- Analiza microstructurii optice a aliajului 7075 în stare deformată plastic la cald (**HR**) și călită pentru punere în soluție (**ST**) confirmă observațiile rezultate în urma analizei XRD fiind observate și în acest caz următoarele faze secundare în grăunții masei de bază (faza α -Al): faza - η ($MgZn_2$); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($Al_2Mg_3Zn_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe;
- Parametrii cristalografici ai fazei de bază α -Al aferenți aliajului 7075 deformat plastic la cald și călit pentru punere în soluție la diferite temperaturi au evoluat odată cu creșterea temperaturii de laminare și călire prin creșterea parametrului de rețea cristalină α -Al, creșterea dimensiunii medii a domeniului cristalin coerent α -Al și scăderea gradului de deformare reziduală a celulei elementare α -Al;
- În urma analizării curbelor tensiune-deformație se constată că aliajul 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling* – **HR**) și călită (*solution treatment* – **ST**) prezintă o ductilitate ridicată, alungirea la rupere având o valoare mare (7-15%), de asemenea, se observă că limita maximă de rezistență depășește valoarea/pragul de 300Mpa;
- Proprietățile mecanice ale aliajului 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling* – **HR**) și călită (*solution treatment* – **ST**) au evoluat astfel:
 - cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la rezistența mecanică la tracțiune, la proba **HR3-ST3** (*laminare la cald: $T = 475^\circ C$; $\epsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$*) cu o valoare de $RM = 337$ MPa, cu 1,78% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST2** (*laminare la cald: $T = 475^\circ C$; $\epsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 475^\circ C$*) și cu 2,23% mai mică decât valoarea probei **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^\circ C$; $\epsilon = 50\%$*); se observă că rezultatele probelor **HR3-ST1**, **HR3-ST2**, **HR3-ST3** au valori superioare celorlalte probe testate, ceea ce rezultă că odată cu creșterea temperaturii de laminare și călire valorile la rezistența mecanică cresc;
 - cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la limita de curgere, la proba **HRI-ST3** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$*) cu o valoare de $R_{p0.2} = 259$ MPa, cu 9,28% mai mare decât valoarea probei **HRI-ST1** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 450^\circ C$*) și cu 3,67% mai mare decât valoarea probei **HRI** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$*); se observă că rezultatele probelor **HRI-ST1**, **HRI-ST2**, **HRI-ST3** au valori superioare celorlalte probe testate, ceea ce rezultă că laminarea la o

temperatură mai joasă și călirea la temperatură ridicată influențează creșterea proprietăților la limita de curgere;

- cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la alungire, la proba **HR3-ST3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 500^{\circ}\text{C}$*) cu o valoare de $A_{50} = 15\%$, cu 24,67% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST1** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 450^{\circ}\text{C}$*) și cu 6,67% mai mică decât valoarea probei **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*); creșterea temperaturii de procesare termomecanică influențează pozitiv proprietățile de alungire, materialul devine mai ductil;
- cele mai avantajoase valori s-au obținut la energia absorbită și elasticitate, la proba **HR3-ST2** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 475^{\circ}\text{C}$*) cu o valoare de $E = 11 \text{ J}$ și $E_l = 26 \text{ J/cm}^2$, cu 36,79% mai mare la E (energia absorbită la rupere) față de valoarea probei **HR3-ST3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 500^{\circ}\text{C}$*) și cu 38,68% mai mare decât valoarea probei **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*) iar pentru E_l (elasticitate) cu 36,53% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$ și călire de punere în soluție $T = 500^{\circ}\text{C}$*) și cu 34,61% mai mare decât valoarea probei **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$*); odată cu creșterea temperaturii de laminare și călire cresc valorile la reziliență; depășirea eutecticului la tratamentul de călire de punere în soluție scade considerabil proprietățile rezilienței materialului;
- Odată cu creșterea temperaturii de laminare la cald și călire de punere în soluție, rezultatele testelor mecanice s-au îmbunătățit considerabil.

Capitolul 6. Influența temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075

Pentru studiul influenței temperaturii tratamentului termic de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice ale aliajului 7075 s-a realizat a treia etapă experimentală:

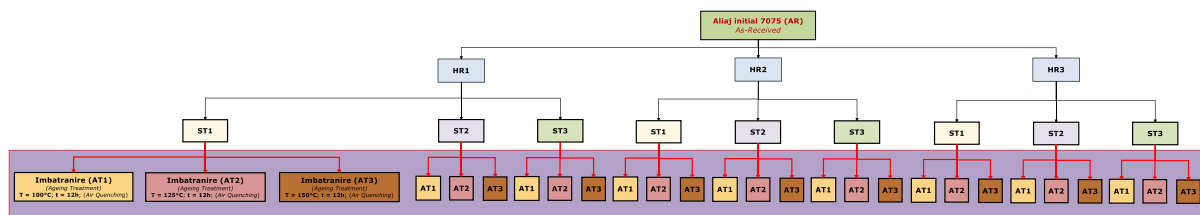


Figura 6.1. Schema de procesare termomecanică (a treia etapă) aplicată aliajului 7075 pentru determinarea influenței temperaturii tratamentului de îmbătrânire asupra caracteristicilor microstructurale și mecanice.

A treia etapă experimentală (vezi Fig. 6.1) constă în experimente de procesare termică dezvoltate la temperaturi sub, apropiate și peste *temperatura de germinare* (stare $T_6 - 120^\circ\text{C}$), deoarece aliajul 7075 cuprinde un interval redus de temperaturi pentru regiunea dintre sub-îmbătrânire ($<100^\circ\text{C}$) și supra-îmbătrânire ($>150^\circ\text{C}$). Având în vedere că prelucrarea termică poate influența microstructura aliajului, pentru a avea o bază de comparație, s-a ales să se aplice tratament termic de îmbătrânire artificială după prelucrare mecanică (deformare plastică la cald) și tratament termic de călire de punere în soluție, la temperaturile de 100°C (starea structurală – **AT1**), 125°C (starea structurală – **AT2**) și 150°C (starea structurală – **AT3**), durata de tratament fiind în toate cazurile de $t = 12\text{h}$.

6.10. Concluzii

Pentru a treia etapă a schemei de procesare termomecanică aplicată în prezentul studiu cu scopul de a investiga evoluțiile în microstructura și proprietățile mecanice ale aliajului 7075, s-au constatat următoarele concluzii:

- După tratamentul termic de îmbătrânire artificială, odată cu creșterea temperaturii de la 100°C (**AT1**) la 150°C (**AT3**), dimensiunea și dispersia fazelor/compușilor variază.
- Analiza microstructurii optice a aliajului 7075 în stare îmbătrânită (*ageing treatment - AT*) confirmă observațiile rezultate în urma analizei XRD a celorlalte două etape experimentale anterioare fiind observate și în acest caz următoarele faze secundare în

grăunții masei de bază (faza α -Al): faza - η ($MgZn_2$); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($Al_2Mg_3Zn_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe;

- În urma analizării curbelor tensiune-deformație se constată că aliajul 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling – HR*), călită (*solution treatment – ST*) și în stare îmbătrânită (*ageing treatment - AT*) prezintă o ductilitate ridicată, alungirea la rupere având o valoare mare (7-15%), de asemenea, se observă că limita maximă de rezistență depășește valoarea/pragul de 350 Mpa;
- Proprietățile mecanice ale aliajului 7075 în stare deformată plastic la cald (*hot rolling – HR*), călită (*solution treatment – ST*) și îmbătrânită (*ageing treatment - AT*) au evoluat astfel:
 - cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la rezistența mecanică la tracțiune, la proba **HRI-ST2-AT1** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ C$ și îmbătrânire artificială $T=100^\circ C$)* cu o valoare de RM = 377 MPa, cu 31,03% mai mare decât valoarea probei **HRI-ST2-AT3** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ C$ și îmbătrânire artificială $T=150^\circ C$)* și cu 15,78% mai mare decât valoarea probei **HRI-ST2** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ C$)*); se observă că cele mai avantajoase rezultate (cu valori peste 300 Mpa) se întâlnesc la probele unde laminarea s-a realizat la temperaturi de $225^\circ C$ și $450^\circ C$ și îmbătrânirea artificială la temperatura de $100^\circ C$, ceea ce rezultă că odată cu scăderea temperaturii de îmbătrânire cresc valorile la rezistența mecanică.
 - cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la limita de curgere, la proba **HRI-ST3-AT1** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$ și îmbătrânire artificială la $100^\circ C$)* cu o valoare de $R_{p0.2} = 260$ MPa cu 23,07% mai mare decât valoarea probei **HRI-ST3-AT3** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$ și îmbătrânire artificială la $150^\circ C$)* și cu 0,58% mai mare decât valoarea probei **HRI-ST3** (*laminare la cald: $T = 225^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$)*); se observă că cele mai avantajoase rezultate (cu valori peste 240 MPa) se întâlnesc la probele unde laminarea s-a realizat la aceeași temperatură ($225^\circ C$) și îmbătrânirea artificială la temperatura de $100^\circ C$, ceea ce rezultă că odată cu scăderea temperaturii de laminare și îmbătrânire cresc valorile la limita de curgere; procesarea termomecanică a dublat valorile obținute la limita de curgere față de valorile obținute la proba inițială (**AR**);
 - cea mai avantajoasă valoare s-a obținut la alungire, la proba **HR3-ST3-AT1** (*laminare la cald: $T = 475^\circ C$; $\epsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ C$ și*

îmbătrânire artificială la 100°C) cu o valoare de $A_{50} = 15\%$, cu 20% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST3-AT2** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 125°C) și valoare identică cu proba **HR3-ST3** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ\text{C}$); odată cu creșterea temperaturii de laminare și scăderea temperaturii de îmbătrânire, cresc valorile alungirii materialului, acesta devenind mai ductil;

- în ceea ce privesc rezultatele la reziliență cele mai avantajoase valori s-au obținut la energia absorbită și elasticitate, la proba **HR3-ST2-AT3** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 150°C) cu o valoare de $E = 11 \text{ J}$ și $E_l = 29 \text{ J/cm}^2$, cu 23,89% mai mare la E (energia absorbită) decât valoarea probei **HR3-ST2-AT1** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 100°C) și cu 6,19% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST2** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$) iar pentru E_l (elasticitate) cu 24,14% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST2-AT1** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 100°C) și cu 10,34% mai mare decât valoarea probei **HR3-ST2** (laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$); concluzia este că odată cu creșterea temperaturii de laminare, călire și îmbătrânire, cresc valorile la reziliență;

Capitolul 7. Concluzii generale și contribuții personale

7.1. Concluzii generale

Teza se ocupă central de investigarea modului în care parametrii de prelucrare termomecanică influențează microstructura aliajului, arătând astfel proprietățile mecanice ale aliajului 7075. Ca parametru cheie de influență în traseul prelucrării termomecanice, teza are în vedere temperatura, fiind un parametru cheie atât în prelucrarea mecanică prin deformare la cald, cât și în prelucrarea termică prin tratamente de punere în soluție și îmbătrânire.

Următoarele concluzii generale cheie reies din teză:

- Microstructura aliajului 7075 este constituită din următoarele faze/ compuși: : α -Al, faza - η ($MgZn_2$); faza - S (Al_2CuMg); faza - T ($Al_2Mg_3Zn_3$); faza - θ (Al_2Cu_3) și compuși intermetalici de tip Al-Mn-Cr-Fe: $Al_6(Fe,Mn)$, $Al_5Si_2(Fe,Mn)$, $Al_3(Fe,Mn,Cr)$;
- Creșterea temperaturii de călire de punere în soluție de la $450^\circ C$ (*ST1*) la $500^\circ C$ (*ST3*) duce la dizolvarea diferitelor faze/compuși secundari, influențând comportamentul mecanic; fracția de greutate a fazelor/compușilor constituenți joacă un rol foarte important în comportamentul mecanic;
- Creșterea temperaturii de tratament la îmbătrânire, de la $100^\circ C$ (*A1*) to $150^\circ C$ (*A3*), duce la precipitarea/consolidarea diferitelor faze/compuși secundare, deasemenea, influențează comportamentul mecanic; fracția de greutate a fazelor/compușilor constituenți joacă un rol foarte important în comportamentul mecanic;
- Combinație adecvată de proprietăți de înaltă rezistență și de ductilitate ridicată poate fi obținută prin combinarea tratamentului de călire de punere în soluție cu tratamentul de îmbătrânire (trebuie aleasă cu atenție temperatura de călire de punere în soluție și temperatura și durata tratamentului de îmbătrânire):
 - în general, tratamentul de îmbătrânire duce la o mică scădere a proprietăților de rezistență și la o mică creștere a ductilității;
 - în general, atunci când se doresc proprietăți de rezistență: temperatura de călire de punere în soluție trebuie crescută și tratamentul de îmbătrânire trebuie scăzut;
 - în general, atunci când se doresc proprietăți de duritate: temperatura de călire de punere în soluție trebuie crescută și tratamentul de îmbătrânire trebuie crescut.
- Transformările de fază și mecanismele care produc durificarea prin precipitare ale aliajelor pe bază de aluminiu durificabile prin tratament termic stau la baza aplicabilității lor în domenii de lucru de mare răspundere cum ar fi cel al aparatului de zbor. Cele trei etape de tratament termic decisive sunt următoarele:

- încălzirea pentru punerea în soluție a precipitatelor solubile,
 - răcirea rapidă pentru menținerea în soluția solidă a elementelor solubilizate,
 - reîncălzirea pentru o reprecipitare uniformă cu efect durificator.
- Din ciclul de tratamente termice aplicate (călire pentru punere în soluție și îmbătrânire) cele mai ample transformări au loc la îmbătrânire. Acestea constau în descompunerea prin difuzie a soluției solide suprasaturate obținută la călire. Formarea zonelor Guiner-Preston și a precipitatelor de tranziție până la obținerea precipitatului de echilibru reprezintă o succesiune de transformări caracterizate fiecare de proprietăți mecanice particulare. Studiile de microscopie optică privind structura nu pot fi aplicate decât din momentul în care precipitatele nu mai sunt în coerență cu matricea. Pentru situația extremă eficientă este microscopia electronică.
- Alegerea temperaturii optime de îmbătrânire reprezintă o particularitate a fiecărui aliaj, depășirea temperaturii respective, antrenând scăderi importante ale proprietăților rezistență mecanică.
- Mecanismele de durificare care intervin, durificare prin tensiuni interne (Mott- Nabaro), durificarea chimică sau durificarea prin dispersie sunt decisive în alegerea cu corectitudine a parametrilor de lucru.
- Proprietățile mecanice ale aliajului 7075 în timpul rutelor de prelucrare termomecanică au evoluat astfel:
- la testul de rezistența mecanică la tracțiune cea mai avantajoasă valoare $R_M = 377$ MPa, s-a obținut la proba **HRI-ST2-AT1** (*laminare la cald: $T = 225^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială $T=100^\circ\text{C}$) cu 35,81% mai mare decât cea mai scăzută valoare $R_M = 242$ MPa, obținută la proba **HR2-ST1-A3** (*laminare la cald: $T = 350^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 450^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială $T=150^\circ\text{C}$);**
 - la testul de limita de curgere cea mai avantajoasă valoare $R_{p0.2} = 260$ MPa, s-a obținut la proba **HRI-ST3-AT1** (*laminare la cald: $T = 225^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 500^\circ\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 100°C) cu 44,42% mai mare decât cea mai scăzută valoare $R_{p0.2} = 144,5$ MPa, obținută la proba **AR** (*stare inițială*);*
 - la testul de alungire cea mai avantajoasă valoare $A_{50} = 17,25\%$, s-a obținut la proba **AR** (*stare inițială*) cu 62,32% mai mare decât cea mai scăzută valoare $A_{50} = 6,5\%$, obținută la proba **HR3** (*laminare la cald: $T = 475^\circ\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$,)*
 - la testul de reziliență la energia absorbită și elasticitate cele mai avantajoase valori $E = 11$ J și $E_l = 29$ J/cm² s-au obținut la proba **HR3-ST2-AT1** (*laminare*

la cald: $T = 475^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 475^{\circ}\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 100°C) cu 51,82% respectiv 55,17% mai mari decât cele mai scăzute valori $E = 5,3 \text{ J}$ și $E_I = 13 \text{ J/cm}^2$, obținute la proba **HRI-STI-ATI** (laminare la cald: $T = 225^{\circ}\text{C}$; $\varepsilon = 50\%$, călire de punere în soluție $T = 450^{\circ}\text{C}$ și îmbătrânire artificială la 100°C).

7.2. Contribuții personale

O serie de contribuții originale/personale, din punct de vedere al noutății, rezultate din această teză pot fi prezentate astfel:

- Realizarea unui studiu complex de literatură, axat pe aliajele pe bază de aluminiu, în principal pe aliajul 7075, care aparține clasei de aliaje pe baza de zinc, pentru a determina cei mai influenți parametri de prelucrare termomecanică la proiectarea unui traseu care combină prelucrarea mecanică și termică aplicată aliajului 7075, urmărind obținerea unei combinații adecvate de proprietăți mecanice.
- Dezvoltarea de programe experimentale originale având în vedere infrastructura de laborator existentă în vederea atingerii obiectivelor asumate.
- Investigarea efectelor induse de deformarea la cald în cazul aliajului 7075 într-un spațiu experimental variind de la o temperatură de 225°C până la 475°C .
- Investigarea efectelor induse de tratarea prin călire de punere în soluție asupra microstructurii și proprietăților mecanice expuse, într-o gamă de temperaturi de tratament variind de la 450°C la 500°C , cu aceeași durată de tratament de 2min/mm.
- Investigarea efectelor induse de un tratament de îmbătrânire aplicat după tratamentul de călire de punere în soluție asupra microstructurii și proprietăților mecanice prezentate.
- Obținerea probelor adecvate prelucrate termomecanic din aliaj 7075 pentru a fi utilizate în evaluarea efectelor induse de prelucrarea termomecanică pe baza programelor experimentale dezvoltate.
- Dezvoltarea procedurilor specifice de investigare și caracterizare aplicate probelor de aliaj 7075 prelucrate termomecanic în vederea obținerii de date despre microstructură și proprietăți mecanice axate pe OM, SEM, XRD și încercări de tracțiune.

7.3. Direcții viitoare de cercetare

Direcțiile viitoare de continuare a cercetărilor în domeniul prelucrării termomecanice și al caracterizării aliajului 7075 pot fi rezumate după cum urmează:

- Pe lângă metodele convenționale de examinare, cum ar fi microscopia optică (OM), microscopia electronică cu scanare (SEM), difracția de raze X (XRD), se pot implica și

alte tehnici avansate de investigare, cum ar fi: microscopia electronică cu transmisie (TEM), difracția cu retrodifuziune a electronilor (EBSD) și alte metode descriptiv-analitice pentru a studia cu exactitate constituenții microstructurali ai aliajului (morfologia fazelor, cristalografie etc.), precipitarea în fază secundară, apariția mecanismelor de deformare (alunecare/înfrățire), propagarea dislocației etc. , despre oferirea de informații suplimentare în înțelegerea relației dintre proprietățile mecanice și microstructura.

- Într-o serie similară de investigații efectuate în cadrul programelor experimentale, se poate extinde studiul creșterii duratei de încălzire/tratament de punere în soluție/tratament de îmbătrânire artificială/naturală asupra evoluției microstructurii și proprietăților mecanice ale aliajului 7075. De asemenea, se poate lua în considerare influența condițiilor de răcire la călire.
- Este posibilă extinderea cercetării prin modificarea etapelor de prelucrare mecanică și de prelucrare termică a aliajului 7075 cu etape suplimentare de prelucrare, care pot oferi o combinație mai bună de proprietăți, extinzând astfel posibilele aplicații ale utilizatorului final.
- Este posibilă extinderea cercetării prin modificarea compoziției chimice a aliajului 7075 cu elemente/conținut suplimentar de aliere, ceea ce poate oferi o perspectivă mai bună asupra diferitelor aplicații posibile ale utilizatorilor finali.

Lista cu lucrările științifice publicate
(în domeniul tezei de doctorat)

A – Lucrări publicate în reviste cotate / indexate ISI
- prim-autor:

1. **Valeriu ANDREI**, Irina Varvara BALKAN, Marian TURCIN, *Hot-rolling deformation behaviour of 7075 aluminium alloy*, Buletinul UPB: Seria B Chimie și Știința Materialelor, vol. 85, Iss. 4, 2023.
2. **Valeriu ANDREI**, Marian TURCIN, Nicolae SERBAN, Irina Varvara BALKAN, *Simultaneous influence of rolling temperature and solubilization quenching conditions on structure and properties of a ZICRAL type aluminum alloy (class 7075)*, Buletinul UPB: Seria B Chimie și Știința Materialelor, vol. 85, Iss. 4, 2023.

B – Susținere publică în conferința internațională ROMAT 2022

3. **Valeriu ANDREI**, Carmen STANICA, Marian TURCU, Nicolae SERBAN, Marian TURCIN, Vasile Danut COJOCARU, *The influence of termomechanical processing parameters on the microstructural and mechanical properties of 7075 alloy*, International Conference on Materials Science and Technologies-RoMAT 2022 November 24-25, 2022, Bucharest, Romania, www.romat2022.ro.

Bibliografie

- [1] L. Cardenas; Aluminiul și aliaje pe bază de aluminiu , București 1981.
- [3] R. Ricks, P. Evans; Introduction to rollings, Technology Strategy Consultants.
- [4] E. Cazimirovici, M.V.Suciu; Laminarea materialelor metalice speciale, Editura Bren București, 2000.
- [5] I. Carcea, Aliaje neferoase de turnătorie, Editura Performantica, Iași, 2009.
- [6] A. Alexandru; Metalurgie fizică , Editura Tehnopress, Iași, 2005.
- [7] M. Vasilescu, Dobrescu M. - Tratamente termice aplicate aliajelor pe bază de aluminiu, Editura POLITEHNICA PRESS, Bucuresti, 2009.
- [16] Moise. Ienciu, Petru. Moldovan, Nicolae. Panait, Mihai. Buzatu. ELABORAREA ȘI TURNAREA ALIAJELOR NEFEROASE SPECIALE, Editura Didactică și Pedagogică București, 1985.
- [18] T. Dulamita, E, Florian TRATAMENTE TERMICE SI TERMOCHIMICE. Bucuresti, Ed didactica si pedagogica 1982.
- [25] Suciu V, Suciu M., Studiul materialelor, Editura Fair partners, București, 2008.
- [30] L.Katchanov, Elements de la theorie de la plasticité, Edition MIR, Moskou, 1975.
- [41] Myriam Nicolas, Evolution de l'état de précipitation dans un alliage Al-Zn-Mg lors de traitements thermiques anisothermes et dans la zone affectée thermiquement de joints soudés, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2002.
- [44] New Heat Treating Progress No.4-5/March- April 2005, Heat Treatments for Age Hardenable Aluminum Alloys.
- [45] T. Dulămiță, Tehnologia tratamentelor termice, Editura didactică și pedagogică, București 1982.
- [111] J.A. Österreicher, G. Kirov, S.S. Gerstl, E. Mukeli, F. Grabner, M. Kumar, Stabilization of 7xxx aluminium alloys, J. Alloy. Compd., 740 (2018), pp. 167-173.
- [118] Rajan Michael H.B., Ramabalan S., Dinaharan I., Vijay S.J., Synthesis and characterization of in situ formed titanium diboride particulate reinforced AA7075 aluminium alloys cast composites, Materials and Design 44 (2013), pp: 438-445;
- [125] <https://www.planetary.org/space-images/diagram-of-a-curiosity-wheel>.