



National University of Science and Technology
POLITEHNICA Bucharest
Doctoral School Materials Science and Engineering
313 Splaiul Independenței, District 6, Bucharest, 060042
<http://www.sdsim.upb.ro>



Disertație de doctorat Rezumat

Contribuții privind impactul finisării granulației aliajelor de aluminiu sudabile asupra structurii și proprietăților mecanice ale acestora

Contributions regarding the impact of grain refining of aluminum alloys used for welding on their structure and mechanical properties

PhD Candidate: Eng. Ahmad Daoud (Mohammad Baker) AL – AWANA

PhD Supervisor: Prof. Florin MICULESCU

COMISIE DE DOCTORAT

President	Prof.dr.habil.eng. Valeriu Gabriel Ghica	from	National University of Science and Technology Politehnica Bucharest
PhD Supervisor	Prof.dr.habil.eng. Florin Miculescu	from	National University of Science and Technology Politehnica Bucharest
Referee	Prof.dr.eng. Petrică Vizureanu	from	University “Gheorhe Asachi” from Iași
Referee	C.P. I Roxana Mioara Piticescu	from	National Institute for Nonferrous and Rare Metals Bucharest
Referee	Prof.dr.eng. Nicolae Constantin	from	National University of Science and Technology Politehnica Bucharest

Table of contents

Acknowledgement	4
Abstract.....	5
Rezumat.....	6
Introduction	7
Part 1. The current state of research in the field of doctoral thesis	10
Chapter 1. Materials selection & processing methods.....	10
1.1 Aluminum alloys classification.....	10
1.2 Aluminum alloys and equilibrium diagrams.....	12
1.2.1 Aluminum master alloy	15
1.2.2 Aluminum binary alloys	16
1.2.3 Aluminum ternary alloys	18
1.2.4 Aluminum quaternary alloys	18
1.3 Enhancer chemical elements for aluminum alloying.....	19
1.4. Methods and procedures for aluminum alloy obtaining	20
Chapter 2. Dynamics of knowledge in the field of aluminum alloys	22
2.1 Grain size affection	23
2.2 Welding of Aluminum and its alloys	27
2.3 Mechanical characteristics affection by adding EMs	34
2.4 The aim of the work	36
Part 2. Experimental research and personal contributions	37
Chapter 3. Methods & procedures of investigation in the research of aluminum alloys.....	37
3.1 General presentation	37
3.1.1 Optical microscopy analysis method.....	38
3.1.2 Scanning electron microscopy (SEM).....	38
3.1.3 EDS microanalysis	40
3.1.4 XRD method analysis.....	43
3.1.5 Corrosion test analysis	44
3.1.6 Mechanical test methods / tensile test investigation	48
3.1.7 Microhardness testing	49
3.2 Samples obtaining, materials & equipment's	51
3.2.1 The cast aluminum alloys obtaining.....	51
3.2.2 Equipment used for samples obtaining and characterization	53
Chapter 4. Cast alloys analysis	56
4.1 Microstructure and grain size analysis.....	56

4.1.1 General view	56
4.1.2 Microstructure and grain size characterization	60
4.1.3 Grain size affection results and discussion	64
4.2 Aluminum and its alloys fracture analysis	72
4.3 Aluminum & its alloys EDS analysis.....	77
4.3.1 Aluminum commercially pure.....	79
4.3.2 Al -Mo alloy	83
4.3.3 Al -Ti alloy	86
4.3.4 Al-Ti-B alloy	91
4.3.5 Al-Ti-B-Mo alloy	95
4.4 XRD results and analysis	100
Chapter 5. Corrosion test analysis for aluminum and its alloys	104
5.1. General View	104
5.2 Corrosion analysis for the Al and its alloys	107
5.3. Preliminary conclusion	118
Chapter 6. The mechanical characteristics of the cast samples	119
6.1 Load - stroke analysis	119
6.1.1 Curve obtaining	119
6.1.2 Ductility affection.....	121
6.1.3 UTS affection	124
6.2 Microhardness analysis.....	125
Chapter 7. Aluminum alloy welding results and discussions	127
7.1. Welded samples obtaining	127
7.2. HAZ region Al x Al samples results	133
7.3 HAZ region Al x Al-Ti samples results	134
7.4 HAZ region Al x Al-Mo sample results	134
7.5 HAZ region Al-Mo x Al-Mo sample results	134
7.6 HAZ region Al-Ti-B x Al-Ti-B samples results	135
7.7 HAZ Region Al-Ti-B-Mo x Al-Ti-B-Mo samples results	135
7.8 Preliminary conclusions.....	136
Chapter 8. Final conclusions, elements of originality and future perspectives	138
List of publications	142
Bibliography	143
List of figures	152
List of tables	154

List of notations and abbreviations

Notation	Detail
Al	Aluminum
B	Boron
Ti	Titanium
Mo	Molybdenum
V	Vanadium
Cr	Chromium
Cu	Copper
Mg	Magnesium
EMs	Enhancer materials
Wt%	Weight Percent
HAZ	Heat Affected Zone
Abbreviation	Detail
SEM	Scanning Electron Microscopes
XRD	X-ray diffraction
EDS	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EOC	Open Circuit Potential
EMS	Enhancer materials
GTAW	Gas tungsten arc welding
TIG	Tungsten Insert Gas
HAZ	Heat Affected Zone
RSW	Resistance spot welding
E_{corr}	Corrosion potential
I_{corr}	Corrosion current
RP	Polarization resistance
SCE	Saturated calomel electrode
UTS	Ultimate tensile strength
FCC	Face centered cubic
B_c	The slop of the cathodic curve
B_a	Slope of the anodic curve
CR	Corrosion rate
E_w	Equivalent length

Abstract

Aliajele de aluminiu sunt indispensabile în numeroase industrii, în special în aplicațiile de sudură, unde proprietățile lor mecanice sunt critice. Această teză se concentrează asupra impactului profund al rafinării granulelor asupra caracteristicilor mecanice ale aliajelor de aluminiu utilizate în sudare. Odată cu creșterea cererii pentru materiale ușoare, dar robuste, aliajele de aluminiu, în special cele cu Al-, au devenit din ce în ce mai vitale în sectoare precum automotive, aerospace și construcții.

Rafinarea granulelor reprezintă o cale atractivă pentru îmbunătățirea performanțelor acestor aliaje, în special în structurile sudate. Studiul începe cu o recenzie extensivă a tehnicilor comune de rafinare a granulelor utilizate în aliajele de aluminiu, accentuând eficacitatea diferitelor aditivi și procese. Apoi, se adâncește în mecanismele subiacente care conduc la rafinarea granulelor, elucidând efectele lor asupra microstructurii aliajului.

În plus, această teză examinează consecințele directe ale rafinării granulelor asupra atributelor post-sudură ale Al și ale aliajelor sale. Prin utilizarea microscopiei avansate și a metodelor de caracterizare, cercetarea analizează distribuția dimensiunilor granulelor, morfologia frontierei granulelor și formarea defectelor în condiții atât de sudură, cât și de post-tratament termic, oferind insight-uri valoroase în evoluția microstructurală în timpul sudurii.

În plus față de modificările structurale, studiul explorează consecințele mecanice ale rafinării granulelor în aliajele de aluminiu. Prin teste de tracțiune, oboseală și impact, evaluează performanța aliajului prin compararea specișnelor rafinate granular cu cele convenționale. Rezultatele dezvăluie influența profundă a dimensiunii granulelor asupra rezistenței, ductilității și comportamentului la rupere a aliajului, îmbogățind înțelegerea noastră asupra răspunsului mecanic al aliajului.

Descoperirile acestei teze au ramificații extinse pentru industriile care depind de aliajele de aluminiu în scopuri de sudare. Informațiile obținute din această cercetare pot contribui la optimizarea proceselor de rafinare a granulelor, deschizând calea pentru dezvoltarea de materiale ușoare și cu rezistență înălțată, cu sudabilitate îmbunătățită. Aceste avansuri au potențialul de a revoluționa diferite sectoare, consolidând integritatea structurală și proprietățile mecanice ale componentelor sudate din aliaje de aluminiu, contribuind astfel la soluții de inginerie mai sigure, eficiente și durabile.

Aliajele de aluminiu au câștigat recunoaștere largă pentru proprietățile lor ușoare, raportul impresionant dintre rezistență și greutate și rezistența lor excepțională la coroziune. Cu toate acestea, există încă loc pentru îmbunătățiri, în special prin integrarea de materiale

îmbunătățitoare. Introducerea acestor materiale îmbunătățitoare în aliajele de aluminiu promite să îmbunătățească diferite aspecte, de la proprietăți mecanice precum rezistența și duritatea, până la îmbunătățirea atributelor precum rezistența la uzură și stabilitatea termică. Această teză se angajează într-o explorare a utilizării materialelor îmbunătățitoare în aliajele de aluminiu, investigând impactul lor profund asupra proprietăților generale ale acestor aliaje. Printre materialele îmbunătățitoare supuse examinării se numără Titan (Ti), Bor (B) și Molibden (Mo). În ultimii ani, peisajul producției de aliaje de aluminiu a cunoscut o transformare semnificativă, stimulată de evoluția noilor proceduri și tehnologii. Această călătorie transformătoare, împreună cu apariția materialelor avansate, a deschis calea pentru metode inovatoare în fabricarea aliajelor de aluminiu. O abordare deosebit de remarcabilă implică introducerea precisă a mai multor materiale îmbunătățitoare în procente de greutate specifice în matricea de aluminiu înainte de solidificare în timpul procesului de turnare. Această metodă inovatoare a demonstrat eficacitate remarcabilă în îmbunătățirea proprietăților aliajelor de aluminiu [1]. Introducerea materialelor îmbunătățitoare în aliajele de aluminiu poate produce efecte semnificative asupra proprietăților lor [2]. Aceste efecte se manifestă atât în microstructură, cât și în macrostructură ale aliajelor, conducând la îmbunătățiri în rezistență, duritate și rezistență la uzură [3], precum și îmbunătățiri în stabilitatea termică. Materialele îmbunătățitoare joacă un rol crucial în creșterea semnificativă a rezistenței și durității aliajelor de aluminiu [4]. Printre materialele îmbunătățitoare cel mai des utilizate în aliajele de aluminiu se află cuprul. Cuprul formează ușor o soluție solidă robustă cu aluminiul, care contribuie la îmbunătățirea rezistenței și durității aliajului [5]. Mai mult, această adiție îmbunătățește rezistența aliajului la coroziune, transformându-l într-un material ideal pentru aplicații în medii marine.

Alte materiale îmbunătățitoare incorporate în aliajele de aluminiu includ magneziul și siliciul, ambele având un rol vital în creșterea rezistenței și durității. În plus, integrarea materialelor îmbunătățitoare în aliajele de aluminiu poate duce la o îmbunătățire semnificativă a rezistenței la uzură a acestora [6]. Rezistența la uzură este crucială în aplicații în care materialele sunt expuse la forțe abrazive sau erozive [6]. Cromul, un material îmbunătățitor frecvent utilizat în aliajele de aluminiu, contribuie la îmbunătățirea rezistenței la uzură a aliajului [7]. Materialele îmbunătățitoare pot îmbunătăți și stabilitatea termică a aliajelor de aluminiu [8]. Acest aspect este important în aplicații în care aliajul este supus la temperaturi ridicate. Unul dintre cele mai frecvent utilizate materiale îmbunătățitoare pentru îmbunătățirea stabilității termice este titanul [8, 9]. Titanul formează un compus intermetallic puternic cu aluminiul care îmbunătățește stabilitatea termică a aliajului [1]. Este utilizat în aliajele de aluminiu pentru a îmbunătăți stabilitatea termică a aliajului. Titanul formează un compus intermetallic puternic cu aluminiul

care îmbunătățește stabilitatea termică a aliajului [9]. Titanul contribuie, de asemenea, la creșterea rezistenței și durității.

Incorporarea materialelor îmbunătățitoare în aliajele de aluminiu aduce îmbunătățiri semnificative în proprietățile lor, cum ar fi creșterea rezistenței, durității, rezistenței la uzură și stabilității termice. Fiecare dintre aceste materiale conferă caracteristici unice pentru a îmbunătăți calitățile generale ale aliajului. Înțelegerea modului în care materialele îmbunătățitoare influențează aliajele de aluminiu le permite inginerilor și oamenilor de știință să adapteze compozițiile aliajelor pentru a satisface cerințele specifice ale aplicației, fie că este vorba de îmbunătățirea rezistenței, rezistenței la uzură sau stabilității termice. Pe parcursul ultimului secol, aluminiul, aliajele sale și microaliajele au devenit materiale de construcție esențiale în inginerie, în ciuda complexităților și costurilor procesului lor de extracție. Ele sunt utilizate pe scară largă într-o gamă de aplicații industriale și de inginerie datorită atributelor lor atractive, inclusiv un raport ridicat între rezistență și greutate, conductivitate termică și electrică excepțională și rezistență la coroziune [10]. Cu toate acestea, o dezavantaj notabil este tendința lor de a se solidifica cu dimensiuni mari ale granulelor în structuri coloane. Pentru a aborda această limitare, acestea sunt aliate cu elemente precum Cu, Mn, Mg sau microaliate cu elemente îmbunătățitoare cum ar fi Ti, Ti-B, Mo, V și altele. În această teză, cercetarea a investigat impactul adăugării de Ti, Ti-B și Mo la un topitor comercial de aluminiu înainte de solidificare. Studiul a examinat procente de greutate corespunzătoare limitei peritectice din diagramele de fază ale Al-Ti, Al-Ti-B și Al-Mo și a cercetat efectele lor asupra microstructurii, proprietăților mecanice, rezistenței ultime la tracțiune, ductilității și microdurității Vickers în stare de turnare. Cercetarea a descoperit că adăugarea oricărui dintre acești elemente a dus la rafinarea structurii de aluminiu prin reducerea dimensiunii granulelor [11]. Acest lucru a transformat aliajul de la o structură predominant coloanară cu granule mari la o structură cu granule fine și echiaxe. Studiul a investigat, de asemenea, influența acestor elemente asupra sudabilității aluminiului comercial utilizând Metoda de Sudare cu Arc cu Tungsten de Argon (GTAW). Cercetarea a implicat sudarea a douăzeci de combinații diferite de foi cu specimene atât similare, cât și diferite, iar rezultatele au fost prezentate și discutate. Procesul de rafinare a granulelor a fost observat că îmbunătățește rezistența la inițierea și propagarea fisurilor în metalul sudat. Mai mult, a împiedicat formarea fisurilor de solidificare pe linia centrală, care sunt adesea întâlnite în sudura aluminiului și a microaliajelor sale fără rafinatoare de granule, rezultând într-o structură coloanară cu granule mari. Diverse

Metodele tehnice, inclusiv microscopia electronică de scanare (SEM), difracția de raze X (XRD), analiza spectroscopică de energie dispersivă (EDS) și microscopia optică, au fost utilizate pentru a investiga porozitatea, fisurile "hairy" și alte defecte vizibile în fotomicrografii. Fotomicroografiile au relevat porozități de dimensiuni mici și fisuri "hairy" în câteva probe [12]. În concluzie, se poate afirma că procesul de rafinare a granulelor pentru aluminiu și microaliajele sale nu doar că a îmbunătățit proprietățile lor mecanice, ductilitatea și calitatea suprafeței, dar a și permis producerea de suduri sănătoase, ceea ce ar fi fost dificil de realizat fără rafinarea granulelor. Aceste constatări sunt așteptate să aibă o valoare semnificativă pentru inginerii care lucrează în industria turnătoriei de aluminiu și sudură [13].

Această teză investighează efectul adăugării de titan, titan plus bor și molibden la topitura comercială de aluminiu, în procente de greutate corespunzătoare limitei peritectice din diagramele de fază ale Al-Ti, Al-Ti-B și Al-Mo, asupra microstructurii, caracteristicilor mecanice, rezistenței ultime la tracțiune, ductilității și microdurității Vickers în condiția de turnare. Adăugarea oricărui dintre acești elemente singuri a dus la rafinarea structurii de aluminiu, rezultând într-o tranziție de la o structură predominant coloanară cu granule mari la una cu granule fine și echiaxe. Teza examinează, de asemenea, impactul acestor elemente asupra sudabilității aluminiului comercial utilizând Metoda de Sudare cu Arc cu Tungsten de Argon (GTAW), prin sudarea a douăzeci de combinații diferite de foi cu specimene atât similare, cât și diferite. Procesul de rafinare a granulelor a îmbunătățit rezistența la inițierea și propagarea fisurilor în metalul sudat și a prevenit formarea fisurilor de solidificare pe linia centrală, care există adesea în sudura aluminiului și a microaliajelor sale fără rafinatoare de granule. Cercetarea prezentată în acest studiu demonstrează că adăugarea de materiale îmbunătățitoare precum Ti, Ti-B și Mo la aluminiul comercial poate îmbunătăți sudabilitatea și calitatea aluminiului și a aliajelor sale. Prin rafinarea granulelor, realizată prin adăugarea acestor materiale îmbunătățitoare, microstructura aluminiului trece de la o structură coloanară cu granule mari la una cu granule fine, rezultând în îmbunătățiri ale proprietăților mecanice, ductilității și calității suprafeței. În plus, utilizarea materialelor îmbunătățitoare a fost găsită să crească rezistența la inițierea și propagarea fisurilor în metalul sudat, să prevină fisurarea de solidificare pe linia centrală și să producă suduri sănătoase care nu puteau fi obținute anterior fără rafinarea granulelor. Aceste constatări indică faptul că utilizarea materialelor îmbunătățitoare în sudarea aluminiului are un potențial semnificativ pentru îmbunătățirea performanței și calității structurilor sudate, făcându-l un domeniu important de cercetare pentru industria turnătoriei de aluminiu și sudură. Cercetarea discutată în acest studiu subliniază eficacitatea încorporării materialelor îmbunătățitoare în procesele de sudare a aluminiului

pentru îmbunătățirea microstructurii și proprietăților aluminiului și ale aliajelor sale. O explorare suplimentară în acest domeniu promite să propulseze progrese în sudare și știința materialelor.

Aliajele de aluminiu sunt categorisite în funcție de compoziția lor, determinată în primul rând de elementul de aliere principal și de alte elemente secundare. Această compoziție influențează în mod semnificativ proprietățile aliajului, inclusiv rezistența sa, rezistența la coroziune și sudabilitatea [84]. Iată câteva clasificări comune ale aliajelor de aluminiu deformabile:

1. Seria 1xxx: Acestea sunt aliaje de aluminiu cu o puritate minimă a aluminiului de 99%, fără un element major de aliere. Sunt frecvent utilizate în aplicații care prioritizează rezistența la coroziune și conductivitatea termică ridicată, cum ar fi componente electrice și schimbătoare de căldură.
2. Seria 2xxx: Aceste aliaje de aluminiu au în principal cuprul ca element de aliere cheie. Ele prezintă o rezistență remarcabilă, dar au o rezistență la coroziune redusă, făcându-le potrivite pentru aplicații aero-spațiale și militare.
3. Seria 3xxx: Aliajele de aluminiu din această serie sunt caracterizate de mangan ca principal element de aliere. Ele au o bună formabilitate, rezistență moderată și o excelentă rezistență la coroziune, făcându-le potrivite pentru construcții și aplicații auto.
4. Seria 4xxx: Aceste aliaje de aluminiu conțin siliciu ca element de aliere principal. Sunt frecvent utilizate în aplicații de sudare datorită punctului lor de topire scăzut și a excelenței lor fluidități.
5. Seria 5xxx: Aceste aliaje de aluminiu au magneziu ca element de aliere principal. Oferă o excelentă rezistență la coroziune, rezistență ridicată și o bună sudabilitate, făcându-le ideale pentru aplicații marine și auto.
6. Seria 6xxx: Aceste aliaje de aluminiu prezintă atât magneziu, cât și siliciu ca elemente de aliere principale. Ele au o bună formabilitate, o excelentă rezistență la coroziune și o rezistență moderată, fiind larg utilizate în industria construcțiilor, auto și aero-spațială.
7. Seria 7xxx: Aceste aliaje de aluminiu constau în zinc ca element de aliere principal, cu cantități mici de cupru și magneziu. Ele oferă o rezistență ridicată și o bună rezistență la oboseală, fiind adesea utilizate în aplicații aero-spațiale și militare [85].

Clasificarea aliajelor de aluminiu se bazează pe elementul de aliere predominant și pe proprietățile asociate. Această clasificare simplifică selectarea aliajului potrivit pentru aplicații specifice.

Sistemul de designare a aliajelor de aluminiu deformabile utilizează un cod cu 4 cifre pentru a identifica și clasifica diferite tipuri de aliaje de aluminiu. Prima cifră semnifică elementul

principal de aliere adăugat aliajului de aluminiu. Această cifră specifică seria aliajului de aluminiu, variind de la seria 1000 la seria 8000. Dacă a doua cifră se abate de la 0, indică o modificare adusă aliajului specific. Cele de-a treia și a patra cifră sunt numere arbitrare utilizate pentru a identifica un aliaj specific în cadrul seriei. De exemplu, aliajul 5183 aparține seriei de aliaje de magneziu (5xxx), cu 1 indicând prima modificare adusă aliajului original 5083, iar 83 servind drept identificator specific în seria 5xxx. Seria 1xxx a aliajelor de aluminiu (aluminiu pur) este singura excepție de la acest sistem de numerotare. În acest caz, ultimele două cifre ale aliajului reprezintă procentul minim de aluminiu peste 99%. De exemplu, aliajul 13(50) are un procent minim de aluminiu de 99,50%. Sistemul de designare a aliajelor de aluminiu deformabile este o abordare standardizată și sistematică pentru identificarea și categorizarea diferitelor tipuri de aliaje de aluminiu pe baza elementelor de aliere și a modificărilor acestora. Acest sistem oferă o metodă eficientă și simplă de selecție a aliajului de aluminiu potrivit pentru aplicații specifice [86-88].

Sistemul de designare a aliajelor de turnare este o altă metodă standardizată folosită pentru identificarea și categorizarea diferitelor aliaje de aluminiu pe baza compoziției lor [89]. În plus față de clasificarea aliajelor deformabile menționată anterior, există și o altă serie 8xx.x. Acestea sunt aliaje de Al cu staniu, un sistem cu frecare redusă folosit în principal în aplicații de rulmenți și manșoane. Acest sistem utilizează o designare cu 3 cifre și punct zecimal, exemplificată de 356.0. Prima cifră (Xxx.x) în designare denotă elementul principal de aliere introdus în aliajul de aluminiu. De exemplu, seriile de aliaje 1xxx constau din aluminiu pur, aliajele seriei 2xxx au cuprul ca element principal de aliere, aliajele seriei 3xxx includ mangan, și așa mai departe. A doua și a treia cifră (xxX.x) furnizează detalii mai precise despre compoziția aliajului. Aceste cifre specifică aliajul specific din serie și orice modificări care au fost aplicate aliajului. De exemplu, aliajul 356.0 conține siliciu ca element principal de aliere, iar 0 indică că este compoziția originală a aliajului. Prezența unui punct zecimal urmat de cifre (xxx.X) furnizează informații suplimentare cu privire la modificarea sau procesul de turnare al aliajului. Cifra care urmează după punctul zecimal poate indica metoda utilizată pentru turnarea aliajului sau poate oferi informații suplimentare despre compoziția aliajului. Sistemul de designare a aliajelor de turnare servește ca un instrument valoros pentru recunoașterea și selecția aliajelor de aluminiu potrivite pentru aplicații de turnare. Acesta stabilește o modalitate standardizată de transmitere a informațiilor despre compoziția și proprietățile diferitelor aliaje de aluminiu, permițând producătorilor să facă decizii informate cu privire la selecția materialului adaptată cerințelor lor specifice de turnare [89-92].

În plus față de informațiile menționate anterior, a doua și a treia cifră (xXX.x) în sistemul de designare a aliajelor de turnare constau în numere arbitrare utilizate pentru identificarea specifică a unui aliaj în cadrul seriei. Aceste cifre nu semnifică niciun element de aliere sau modificare în mod special. Numărul care urmează după punctul zecimal indică dacă aliajul este destinat pentru turnare (.0) sau sub formă de lingou (.1 sau .2). În plus, este utilizat un prefix format dintr-o literă mare pentru a indica o modificare făcută unui anumit aliaj. De exemplu, aliajul A356.0 prezintă un prefix A (Axxx.x), indicând o modificare a aliajului original 356.0. Numărul 3 (A3xx.x) semnifică că acesta aparține seriei de siliciu plus cupru și/sau magneziu. Numărul 56 (Ax56.0) identifică aliajul specific în cadrul seriei 3xx.x, în timp ce .0 (Axxx.0) indică adecvarea acestuia pentru turnarea formei finale în loc de a fi sub formă de lingou. Sistemul de designare a aliajelor de turnare stabilește o modalitate standardizată de recunoaștere și categorizare a diferitelor aliaje de aluminiu utilizate în aplicații de turnare. Este un instrument indispensabil pentru transmiterea informațiilor despre compoziția și caracteristicile aliajelor diverse, permițând producătorilor să aleagă aliajul cel mai potrivit pentru cerințele lor specifice de turnare [89-92].

Rezultate și Discuții privind Afectarea Dimensiunii Boabelor:

Procedura de Analiză a Dimensiunii Boabelor

Analiza dimensiunii boabelor a fost investigată conform ASTM E112, utilizând software-ul Image J pentru procesarea și analiza imaginii. Metoda de interceptare a liniei ASTM E112 descrie numărul real al boabelor interceptate de o linie de test sau numărul de intersecții ale granițelor boabelor cu o linie de test, per unitate de lungime a liniei de test utilizată pentru a calcula lungimea medie a interceptării liniare, L . L este folosit pentru a determina numărul ASTM de mărime al boabelor, G . Precizia metodei este o funcție a numărului de interceptări sau intersecții numărate. Se poate obține o precizie de mai bine de plus/minus 0,25% unități de mărime ale boabelor cu un efort rezonabil. Rezultatele sunt lipsite de bias; repetabilitatea și reproductibilitatea sunt mai mici de plus/minus 0,5% unități de mărime ale boabelor. Deoarece se poate face un număr precis fără a fi nevoie de efectuarea de interceptări, figura 1.

În acest studiu, au fost realizate 7 linii pentru fiecare imagine și numărul boabelor a fost numărat, apoi a fost luată valoarea medie și conform acestei proceduri s-au observat următoarele rezultate:

Bazat pe rezultatele observate, se poate concluziona că adăugarea de materiale enhancer, cum ar fi titanul (Ti), borul (B) și molibdenul (Mo), singure sau împreună, are un efect asupra dimensiunilor și formelor boabelor. În timp ce adăugarea de titan tinde să reducă dimensiunea

boabelor, unde dimensiunea medie a boabelor pentru Al este de aproximativ 17,73 micrometri, iar dimensiunea medie a boabelor după adăugarea a 0,15% titan a dus la reducerea dimensiunii medii a boabelor la 16,21 micrometri, reprezentând o reducere procentuală de 6,99%. În plus, adăugarea de Ti afectează forma boabelor și granițele acestora, rezultând forme mai rotunjite și granițe bine definite. Aceste observații sugerează îmbunătățiri în proprietățile mecanice, cum ar fi duritatea și tensiunea superficială.

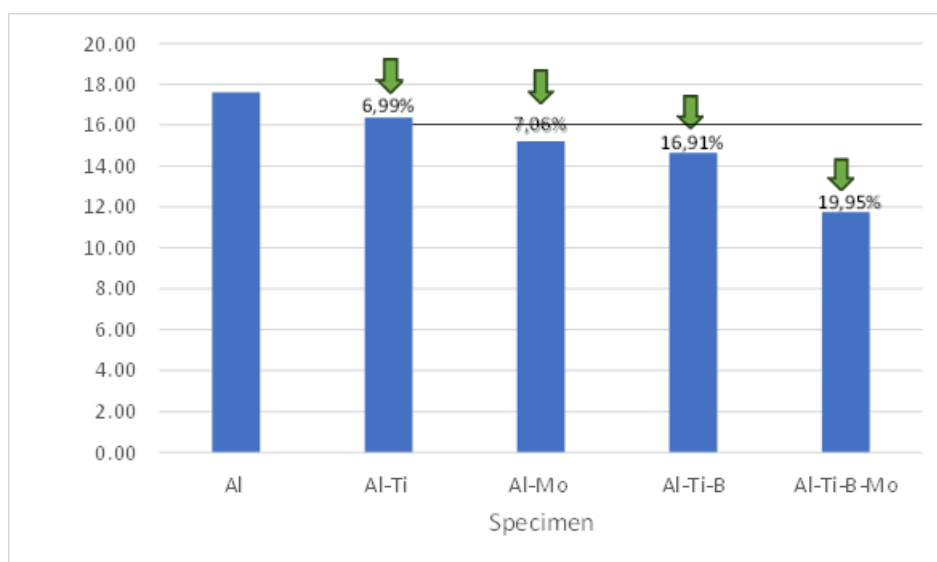


Figure 1. Al and its alloys average grain size analysis

Adăugarea a 3% Mo și efectul asupra dimensiunii și formei boabelor adăugarea molibdenului (Mo) ca material enhancer la aliajele de aluminiu are un impact semnificativ asupra dimensiunilor și formelor boabelor, mai mult decât adăugarea de titan (Ti). În urma observațiilor, se poate concluziona că adăugarea de Mo tinde să reducă dimensiunea boabelor, unde dimensiunea medie a boabelor pentru Al este de aproximativ 16,73 micrometri, iar dimensiunea medie a boabelor după adăugarea a 3% Mo a dus la reducerea dimensiunii medii a boabelor la 14,67 micrometri. Procentul de îmbunătățire este mai semnificativ decât în cazul adăugării de Ti, unde adăugarea acestui enhancer Mo a dus la o reducere a dimensiunii boabelor cu un procent de 7%, ceea ce se va reflecta aproape în proprietățile mecanice, cum ar fi duritatea, ductilitatea, rezistența ultimă la tracțiune și tensiunea de cedare.

De asemenea, adăugarea de Mo la aluminiu afectează forma boabelor și granițele acestora. Colțurile care apar în formele de boabe de Al dispar, forma de arbore a dimensiunii boabelor dispare complet, iar dimensiunea boabelor devine mai rotunjită și mai recunoscută decât în cazul Al. Granițele devin aproape să fie forme ovoidale cu lungimi mai mici, iar în unele zone granițele nu pot fi recunoscute cu limite clare, ceea ce indică îmbunătățiri în proprietățile

mecanice evidente în urma investigațiilor.

Adăugarea de 0,05% titan și 0,1% bor împreună are o influență mult mai bună asupra efectului de rafinare a boabelor decât Al singur sau chiar decât adăugarea de Ti sau Mo singur, rezultând dimensiuni mai mici ale boabelor. Referitor la figura 1, se poate observa că adăugarea de Ti și B reduce dimensiunea boabelor, astfel încât dimensiunea medie a boabelor devine 14,92 micrometri, ceea ce înseamnă că procentul de îmbunătățire este de 16,91%. Din altă perspectivă, s-a observat că adăugarea a 3 elemente enhancer, 0,05% Ti, 0,01% B și 0,1% Mo, reflectă cea mai bună îmbunătățire asupra dimensiunii boabelor și a formelor acestora. Adăugarea de Ti, B și Mo reduce dimensiunea medie a boabelor cu un procent de 19,95%, astfel încât noua dimensiune a boabelor după adăugare devine 11,27 micrometri.

Conform unor studii, cercetările au arătat că unele materiale utilizate ca enhanceri nu acționează ca rafinor eficient de boabe în turnarea de aluminiu. În schimb, pot contribui la creșterea dimensiunilor boabelor în cadrul microstructurii. Pe de altă parte, efectul de rafinare a boabelor al molibdenului, titanului și borului indică potențialul lor ca adiție benefică la turnarea de aluminiu. Molibdenul sau titanul ajută la promovarea formării de boabe mai mici și mai uniforme în timpul solidificării, rezultând o microstructură mai fină. Când se adaugă împreună mai mulți enhanceri, inclusiv titan, bor și molibden, poate exista un efect sinergic asupra rafinării boabelor. Cu toate acestea, este important de notat că combinația specifică de materiale enhancer, concentrațiile lor și condițiile procesului de turnare pot influența rezultatul dimensiunii boabelor. În plus, efectul de otrăvire, care se referă la variația potențială a dimensiunii boabelor, ar trebui luat în considerare și contabilizat în analiza și interpretarea rezultatelor. Este posibil ca unele materiale enhancer, fie singure, fie în combinație, să ducă la o creștere a dimensiunii boabelor în loc de o rafinare.

Concluzii și Implicații Practice

În urma acestei investigații, s-au obținut rezultate semnificative care contribuie la înțelegerea îmbunătățirilor aduse aliajelor de aluminiu prin adăugarea de materiale enhancer. Adăugarea de titan, bor și molibden a demonstrat nu doar o scădere a dimensiunii medii a boabelor, ci și o influență asupra formei acestora și asupra granițelor dintre ele. Acest lucru indică posibile îmbunătățiri în proprietățile mecanice ale aliajelor, precum duritatea și tensiunea superficială.

Testele mecanice, în special cele de tracțiune, au relevat îmbunătățiri semnificative în comportamentul aliajelor, inclusiv o creștere a rezistenței ultime la tracțiune și a ductilității. Aceste îmbunătățiri indică direcții promițătoare pentru optimizarea proceselor de îmbogățire a aliajelor de aluminiu.

Analiza coroziunii a evidențiat, de asemenea, comportamente îmbunătățite pentru aliajele îmbogățite, indicând o mai mare rezistență la deteriorarea cauzată de medii corozive. Aceste rezultate au implicații practice semnificative pentru industria de sudare și producția de aliaje de aluminiu, oferind direcții pentru dezvoltarea de materiale mai performante și durabile.

În concluzie, aceste descoperiri aduc contribuții valoroase la domeniul cercetării aliajelor de aluminiu și deschid drumul către îmbunătățiri semnificative în producție, sudare și alte aplicații industriale care depind de performanța optimă a acestor materiale.

Analiza Testului de Coroziune pentru Aluminii și Aliajele Sale

Table 1. Principalele parametri electrochimici ai procesului de corozie

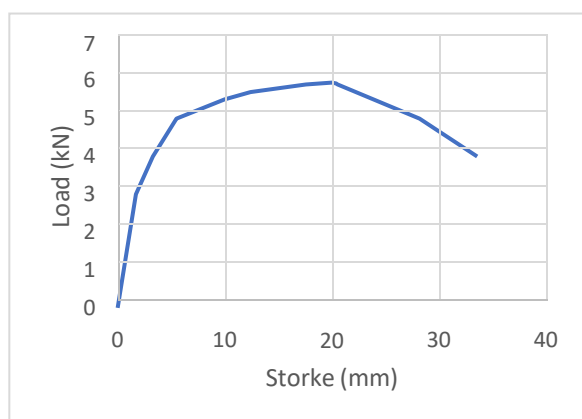
Nr.crt.	Proba	E_{oc} (mV)	E_{corr} (mV)	i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	β_c (mV)	β_a (mV)	R_p ($\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$)	CR ($\mu\text{m}/\text{year}$)
1	Al	-675.59	-650.05	4.951	1098	29.41	2.51	53.8
2	Al-Mo	-687.40	690.43	0.937	188.92	27.95	11.3	10.6
3	Al-Ti	-662.10	645.15	2.075	368.31	38.65	7.32	22.5
4	Al-Ti-B	-716.00	722.39	2.142	245.21	45.12	7.73	23.3
5	Al-Ti-B-Mo	-659.87	645.23	1.792	387.92	23.12	5.29	19.5

Se poate observa că valorile potențialului de circuit deschis (E_{oc}) oferă perspective asupra comportamentului electrochimic al probelor. Valori mai electropozitive (pozitive) ale E_{oc} indică un caracter "nobil" din punct de vedere electrochimic. În acest caz, proba Al-Ti-B-Mo prezintă cea mai electropozitivă valoare E_{oc} (-659,87 mV), urmată aproape de proba Al-Ti (-662,10 mV). Când se iau în considerare valorile potențialului de corozie (E_{corr}), valori mai electropozitive ale E_{corr} sunt în general asociate cu un comportament mai bun în ceea ce privește corozia. Proba Al-Ti arată cea mai electropozitivă valoare E_{corr} (645,15 mV), cu proba Al-Ti prezentând o valoare similară (-645,23 mV). O densitate scăzută a curentului de corozie (i_{corr}) indică o mai bună rezistență la corozie. Proba Al-Mo prezintă cea mai scăzută valoare i_{corr} (0,937 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), sugerând o rezistență superioară la corozie în comparație cu celelalte probe investigate. În plus, toate aliajele prezintă valori mai mici ale i_{corr} în comparație cu Al, indicând un comportament mai bun în ceea ce privește corozia în soluția salină. Rezistența la polarizare (R_p) este un parametru care reflectă comportamentul de corozie al unui material. Valori mai mari ale R_p indică o rezistență mai bună la corozie, în timp ce valori mai mici sugerează un comportament mai slab în ceea ce privește corozia. Dintre probe, proba Al-Mo prezintă cea mai mare valoare R_p (11,3 $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}^2$), semnificând un comportament bun în ceea ce privește corozia. În ceea ce privește rata de corozie, o valoare mai mică semnifică un comportament mai bun în ceea ce privește corozia. Proba Al-Mo demonstrează cea mai mică rată de corozie, înregistrând o valoare de 10,6 $\mu\text{m}/\text{an}$, indicând o rezistență superioară la corozie în comparație cu celelalte probe. Bazat pe măsurătorile electrochimice, se poate deduce că proba Al-Mo prezintă caracteristici superioare, cum ar fi cea mai mică densitate a curentului de corozie (indicând o rezistență mai bună la corozie), cea mai mare rezistență la polarizare (sugerând un comportament bun în ceea ce privește corozia), și cea mai mică rată de corozie (subliniind o rezistență superioară la corozie). Prin urmare, proba Al-Mo demonstrează un comportament mai bun în ceea ce privește corozia în soluția salină în comparație cu celelalte probe investigate.

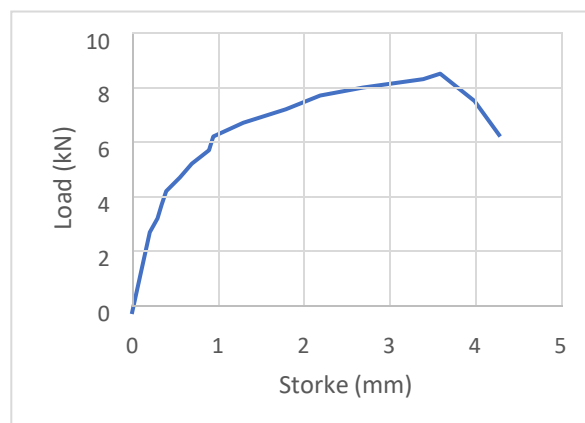
Caracteristicile mecanice ale probelor turnate

Curbele încărcare-deformare reprezintă conexiunea dintre încărcarea aplicată pe un material și deformarea sau cursa rezultată. Aceste curbe servesc la caracterizarea proprietăților mecanice ale materialelor, în principal în domeniul testării materialelor. În mod obișnuit, curba încărcare-deformare cuprinde o serie de puncte de date sau perechi, ilustrând încărcarea impusă materialului în raport cu deformarea ulterioară sau cursa. Această curbă este instrumentală în determinarea principalelor proprietăți mecanice ale materialului, cum ar fi rezistența la cedare, rezistența ultimă la tracțiune și alungirea în punctul de rupere. Forma curbei încărcare-deformare poate prezenta variabilitate din cauza mai multor factori, inclusiv materialul examinat, tipul de test și condițiile de testare. În general, curba încărcare-deformare prezintă un segment inițial liniar cunoscut sub denumirea de regiune elastică, în care materialul se deformează elastic în răspuns la încărcarea aplicată. Pe măsură ce încărcarea crește incremental, materialul ajunge în cele din urmă la rezistența sa la cedare, după care începe deformarea plastică. Această etapă este denumită regiunea plastică și este distinsă printr-o creștere neliniară a deformării odată cu intensificarea încărcării. Odată cu creșterea ulterioară a încărcării, materialul ajunge în cele din urmă la rezistența sa ultimă la tracțiune, moment în care eşuează catastrofal. Punctul în care materialul cedează este cunoscut sub numele de punctul de fractură sau punctul de ruptură. Curbele încărcare-deformare pot fi utilizate pentru a compara proprietățile mecanice ale diferitelor materiale sau pentru a evalua efectele diferitelor condiții de prelucrare asupra unui anumit material. Ele sunt folosite în mod obișnuit în testarea materialelor, controlul calității și dezvoltarea produselor și reprezintă o unealtă importantă pentru înțelegerea comportamentului materialelor în diferite condiții de încărcare. Comportamentul mecanic al metalului de bază și al aliajelor binare pregătite a fost determinat prin teste standard de tracțiune uniaxială efectuate pe o mașină de testare universală, conform standardelor ASTM. Testele s-au desfășurat la o viteză a capului de tragere de 10 mm/min, iar înregistrări autografice au fost obținute. Figura 2 explică curbele care descriu încărcarea până la rupere și alungirea până la rupere a diferitelor aliaje de aluminiu. Se pot observa din datele rezultate:

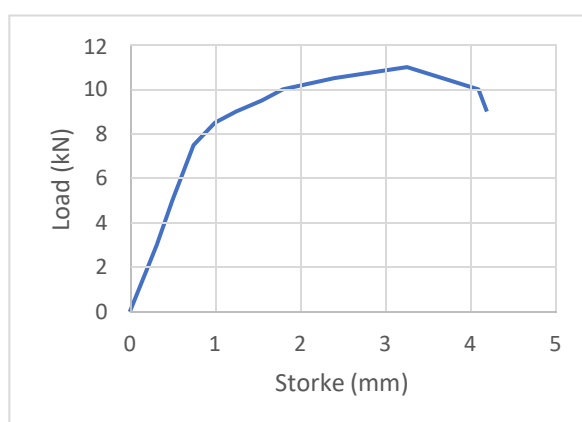
Load vs stroke curves



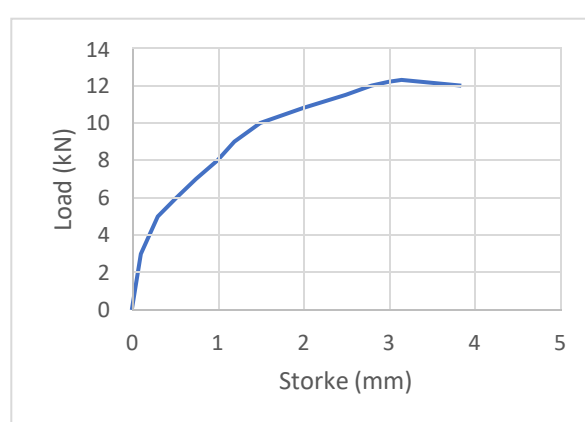
a) Al specimen Tensile Test



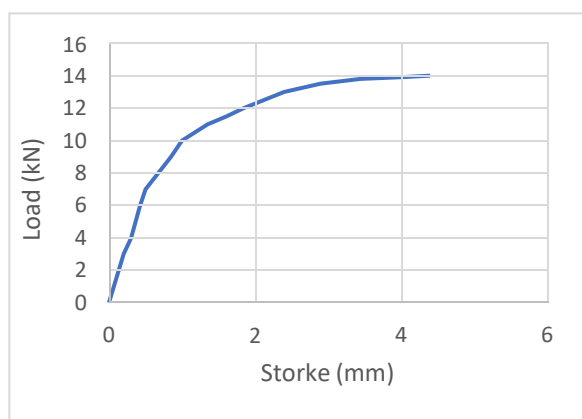
b) Al -Ti Specimen Tensile Test



c) Al -Mo Specimen Tensile Test



d) Al -Ti-B Specimen Tensile Test



e) Al -Ti-B-Mo Specimen Tensile Test

Figure 2. (Load, kN – Stroke, mm) for the Al and its alloys

Încărcare până la fractură:

- Aluminiul necesită o încărcare de 6 kN pentru a se fractura.
- Adăugarea a 3% Mo la aluminiu crește încărcarea până la fractură cu 185%, ceea ce înseamnă că aliajul poate suporta aproape de trei ori încărcarea aluminiului înainte de a se fractura.
- Adăugarea a 0,05% Ti și 0,01% B la aluminiu crește încărcarea până la fractură cu 208%,

ceea ce înseamnă că aliajul poate suporta mai mult de trei ori încărcarea aluminiului înainte de a se fractura.

- Adăugarea a 0,05% Ti, 0,01% B și 0,1% Mo la aluminiu crește încărcarea până la fractură cu 235%, ceea ce înseamnă că aliajul poate suporta aproape de patru ori încărcarea aluminiului înainte de a se fractura.

Întindere până la fractură:

- Adăugarea a 3% Mo la aluminiu crește întinderea până la fractură cu 145%, ceea ce înseamnă că aliajul poate întinde mai mult înainte de a se fractura.

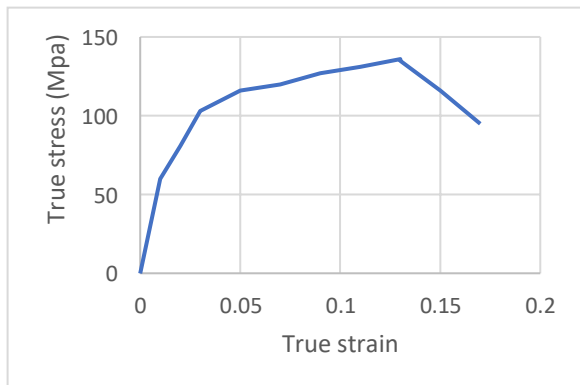
- Adăugarea a 0,05% Ti și 0,01% B la aluminiu crește întinderea până la fractură cu 112%, ceea ce înseamnă că aliajul poate întinde mai mult înainte de a se fractura.

- Adăugarea a 0,05% Ti, 0,01% B și 0,1% Mo la aluminiu crește întinderea până la fractură cu 120%, ceea ce înseamnă că aliajul poate întinde mai mult înainte de a se fractura. În general, se poate descrie că adăugarea de Mo, Ti și B la aluminiu poate îmbunătăți semnificativ capacitatea sa de a suporta încărcătura și întinderea până la fractură. Aceste îmbunătățiri pot avea consecințe importante pentru utilizarea aliajelor de aluminiu în diferite aplicații. De exemplu, aliajele cu proprietăți mecanice îmbunătățite pot fi mai potrivite pentru aplicații cu stres sau încărcare ridicate.

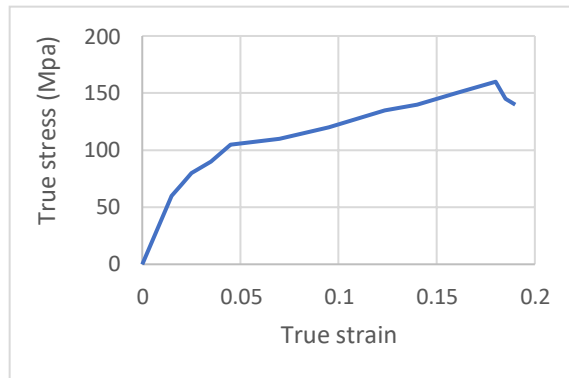
Ductility affection

Ductilitatea, o proprietate mecanică esențială, în special în contextul aliajelor de aluminiu, este strâns legată de microstructura materialului. Analiza metalografică oferă insights valoroase în mecanismul de ductilitate al aliajelor turnate de aluminiu. Adăugarea unor cantități mici de Ti sau Ti-B în topitură înainte de turnare poate îmbunătăți ductilitatea pieselor de aluminiu. Atunci când Ti este adăugat izolat, prezența sa în topitură trebuie să depășească compoziția peritectică, aproximativ 0,15% în greutate, pentru a obține un efect satisfăcător asupra ductilității. Cu toate acestea, în prezența borului, chiar și în cantități infime (ppm), se observă o îmbunătățire semnificativă la concentrații de Ti chiar și la 0,005%. Proprietățile mecanice optime se obțin, în mod raportat, utilizând aliajele master Al-Ti-B cu un raport Ti/B de aproximativ 5. Aliajul master ternar comun Al-Ti-B conține 5% Ti și 1% B în greutate și constă în două compuși intermetallici cristalini: cristale mici de diborură de titan și cristale mai mari de TiAl₃. Raportat la masă, aliajul master ternar Al-5%Ti-1%B este în mod obișnuit de cinci până la șase ori mai eficient decât un aliaj master binar Al-Ti. Mai multe mecanisme par să contribuie la ductilitate, în funcție de aliajul master, aliajul turnat și condițiile de proces. S-au propus mai multe ipoteze

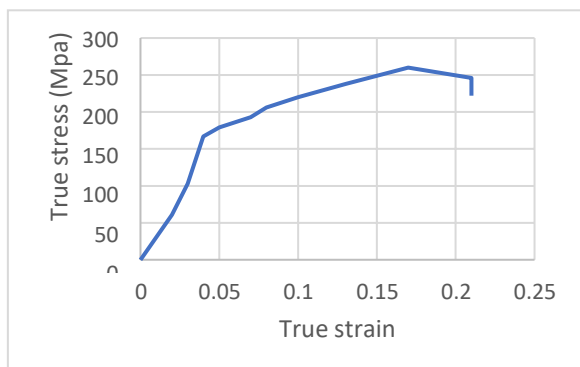
pentru a elucida mecanismul, cum ar fi nuclearea Al facilitată de particulele de aluminid, particulele de borură sau particulele de TiB₂ înconjurate de particulele "duplex" TiAl₃.



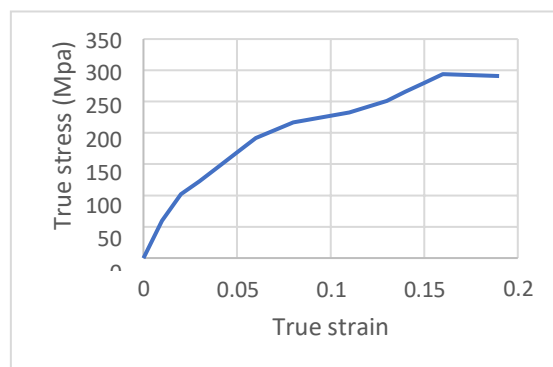
a) True Stress Vs true strain diagram for Al in tension



b) True Stress Vs true strain diagram for Al-Ti in tension

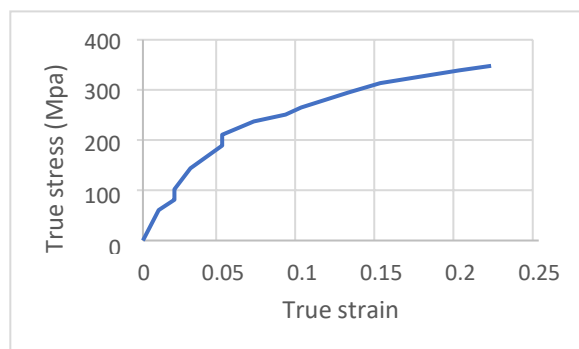


c) True Stress Vs true strain diagram for Al-Mo in tension



d) Stress Vs true strain Al-Ti-B

a) True Stress Vs True Strain diagram for Al-Ti-B-Mo in tension



Dezbaterile recente au subliniat, de asemenea, conceptul de îmbogățire locală cu Ti asociată cu particulele de TiB₂, confirmând site-uri de nucleație de înaltă eficiență pentru boabele de Al. În această investigație, comparăm în mod sistematic proprietățile de ductilitate ale

componentelor turnate din aluminiu atunci când se adaugă Mo la aliajul Al-Ti-B înainte și după introducerea materialelor îmbunătățitoare (Ti, B și Mo) în turnarea aluminiului. Sunt efectuate teste de ductilitate pe piese turnate din aliajele (Al, Al-Ti-B și Al-Ti-B-Mo), includând evaluări de încărcare biaxială tensilă. Curba de stres-deformare reală și locul fracturii sunt analizate pentru a evalua plasticitatea și ductilitatea pieselor turnate. În plus, se efectuează o analiză fractografică a probelor pentru a înțelege mecanismele microscopice de eșec în diverse condiții de stres.

Figure 4. The impact of incorporating Mo into Aluminum, Ti, and Ti-B on their mechanical characteristics

UTS affection

included herein, which showcases the comparison of ultimate tensile strength values for various aluminum alloys with and without the addition of enhancer materials.

In the figure, it can be observed that the base aluminum (Al) exhibits a certain level of ultimate tensile strength. However, the addition of 0.15% Ti, 3% Mo, and a combination of 0.05% Ti, 0.01% B, and 0.1% Mo to aluminum results in a significant increase in ultimate tensile strength.

Specifically, the Al-0.15%Ti alloy demonstrates higher UTS compared to the base aluminum, indicating the positive influence of titanium as an enhancer material. Moreover, the Al-3%Mo alloy exhibits an even more substantial increase in UTS, showcasing the significant impact of molybdenum.

Furthermore, the combination of titanium, boron, and molybdenum in the Al-0.05%Ti-0.01%B-0.1%Mo alloy presents the highest ultimate tensile strength among the investigated alloys. This combination of enhancer materials synergistically enhances the mechanical properties of aluminum, resulting in improved UTS.

These findings highlight the effectiveness of incorporating enhancer materials in aluminum alloys to achieve superior mechanical characteristics, with ultimate tensile strength being a key parameter positively affected by such additions.

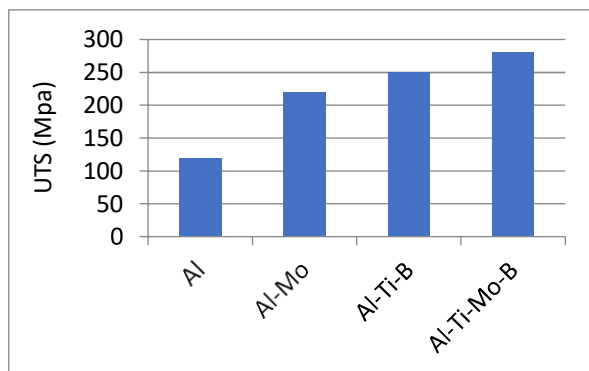


Figure 5. The ultimate tensile strength, UTS, of Al and its alloys

Microhardness analysis

Table 2. Microhardness test for the Al alloys and its alloys.

Specimen	Hv 1	Hv 2	Hv 3	Hv 4	Hv 5	Average Hv
Al	46,50	50,10	47,90	48,30	48,80	48,32
Al-Ti	77,5	76,6	68,4	75,1	73,6	74,24
Al-Mo	89,2	86,5	87	90,6	88,7	88,40
Al-Ti-B	114,40	94,10	107,40	113,80	115,10	108,96
Al-Ti-B-Mo	124,07	124,2	120,30	121,50	120,30	121,54

Se poate observa din tabelul 2 că adăugarea materialelor îmbunătățitoare la aluminiu poate afecta duritatea într-un procent semnificativ, unde adăugarea a 5% Ti poate scădea duritatea cu peste 230%, iar adăugarea a 3% Mo singur scade duritatea cu 135%, aproximativ aceeași valoare fiind înregistrată și pentru adăugarea Ti + B la aluminiu. Cu toate acestea, adăugarea a 4 materiale îmbunătățitoare a fost raportată să îmbunătățească duritatea, crescând valoarea cu aproximativ 5%.

Rezultatele și discuțiile privind sudarea aliajelor de aluminiu

Sudura aliajelor de aluminiu este un proces provocator din cauza tendinței acestor materiale de a crapa și de a dezvolta alte defecte în timpul solidificării. Cu toate acestea, adăugarea anumitor elemente aliajante precum Titan (Ti), Bor (B) și Molibden (Mo) poate îmbunătăți proprietățile de sudură ale aliajelor de aluminiu. Ti poate forma compusi intermetalici stabili cu aluminiul, ceea ce poate îmbunătăți rezistența, ductilitatea și rezistența la impact a sudurii. Ti poate de asemenea acționa ca un rafinator de granule, rezultând într-o microstructură mai uniformă și proprietăți mecanice îmbunătățite. Borul poate îmbunătăți duritatea și rezistența la uzură a aliajelor de aluminiu, dar poate avea și un efect negativ asupra mărimii granulelor și procesului de turnare. Prin urmare, cantitatea de bor adăugată aliajului trebuie luată în considerare cu atenție pentru a evita efectele adverse asupra proprietăților materialului. Molibdenul poate îmbunătăți rezistența și rezistența la impact a aliajelor de aluminiu, rezultând într-o sudură mai ductilă și mai rezistentă la crăpare. Mo poate de asemenea

reduce formarea de defecte precum porozitatea și poate îmbunătăți microstructura sudurii. Când sunt adăugați împreună, Ti, B și Mo pot avea un efect sinergic asupra proprietăților de sudură ale aliajelor de aluminiu. Combinația precisă a acestor elemente poate duce la o microstructură rafinată, la îmbunătățirea proprietăților mecanice și la reducerea formării de defecte. Cu toate acestea, este important de menționat că adăugarea acestor elemente de aliere trebuie controlată cu atenție pentru a evita efecte negative asupra procesului de turnare sau a altor proprietăți ale materialului. Sunt necesare cercetări suplimentare pentru a înțelege pe deplin impactul acestor elemente de aliere asupra proprietăților de sudură ale aliajelor de aluminiu.

În ansamblu, adăugarea lui Ti, B și Mo la aliajele de aluminiu poate îmbunătăți procesul de sudură prin creșterea calității sudurii, reducerea formării defectelor și îmbunătățirea proprietăților mecanice ale materialului.

Conclusions, elements of originality and future perspectives

În cadrul acestei cercetări, efectul adăugării de materiale potențatoare, cum ar fi titan (Ti), bor (B) și molibden (Mo), asupra proprietăților aliajelor de aluminiu a fost investigat în detaliu. Accentul s-a pus în principal pe ductilitate, capacitatea de încărcare, proprietățile mecanice și caracteristicile de sudare ale aliajelor. Rezultatele obținute din teste standard de tracțiune efectuate conform standardelor ASTM au oferit insight-uri valoroase asupra impactului acestor materiale potențatoare asupra aliajelor de aluminiu.

Investigația a relevat că adăugarea de Ti, B și Mo individual sau împreună la aluminiu a condus la îmbunătățiri semnificative ale proprietăților mecanice ale aluminiului. S-a demonstrat că procentul maxim de alungire și procentul maxim de reducere a zonei au crescut odată cu includerea lui Ti, B și Mo. Creșterea tensiunii de curgere și a tensiunii ultime de tracțiune a fost de asemenea îmbunătățită semnificativ, semnificând efectul benefic al lui Ti, B și Mo asupra îmbunătățirii ductilității generale a aliajului, dar această îmbunătățire a valorilor ductilității nu poate fi conectată direct cu afectarea potențatorilor și se poate acorda mai multă atenție cercetării ulterioare pentru a se concentra asupra acestui rezultat, adică cum a crescut ductilitatea în timp ce granulele au devenit mai fine.

În plus, adăugarea ulterioară de Mo la aliajul de aluminiu rafinat cu Ti-B a prezentat rezultate chiar mai promițătoare. Procentul maxim de alungire a crescut cu 26,53%, în timp ce procentul maxim de reducere a zonei transversale a crescut cu 25%. Acest lucru a demonstrat efectul sinergic al combinării mai multor materiale potențatoare pentru a îmbunătăți în continuare ductilitatea aliajului de aluminiu.

În plus, investigația a cercetat influența acestor materiale potențatoare asupra rezistenței ultime la tracțiune (UTS) și durității aliajelor de aluminiu. S-a constatat că adăugarea de Ti a

avut un efect pozitiv asupra UTS. Cu toate acestea, cantitatea de Ti adăugată trebuie să depășească compoziția peritectică de aproximativ 0,15% în greutate pentru a obține un efect satisfăcător asupra ductilității. Includerea B în cantități mici, în special în combinație cu Ti, a dus, de asemenea, la o creștere semnificativă a UTS, îmbunătățind-o cu aproximativ 210%.

În plus, s-a observat că adăugarea de Mo la aliajul de aluminiu a dus la o creștere a UTS cu până la 185%. Efectul exact al lui Mo asupra UTS părea să fie influențat de diferiți factori, inclusiv concentrațiile altor elemente de aliere și condițiile specifice de prelucrare utilizate.

În mod interesant, adăugarea combinată a lui Ti, B și Mo în cantități specifice a avut un efect remarcabil asupra UTS, crescând valoarea cu aproximativ 240%. Acest lucru a demonstrat potențialul de optimizare a proprietăților mecanice ale aliajelor de aluminiu prin controlul atent al compoziției materialelor potențatoare.

În ceea ce privește duritatea, investigația a relevat că adăugarea de Ti, Mo și Ti-B individual a condus la o creștere a durității. Adăugarea lui Mo sau Ti singură a dus la o îmbunătățire mică a durității; totuși, atunci când toate cele trei materiale potențatoare au fost adăugate împreună, s-a observat o creștere semnificativă (aproape dublă) a valorilor de duritate.

Concluziile acestei cercetări nu doar aruncă lumină asupra proprietăților mecanice ale aliajelor de aluminiu, ci explorează și impactul materialelor potențatoare asupra caracteristicilor lor de sudare. S-a observat că adăugarea lui Ti, B și Mo avea potențialul de a îmbunătăți proprietățile de sudare ale aliajelor de aluminiu, care sunt adesea susceptibile la defecte și crăpături în timpul procesului de solidificare.

În ceea ce privește dimensiunile granulelor, investigația a relevat că adăugarea lui Ti, Mo și Ti-B individual sau împreună a dus la scăderea dimensiunilor granulelor și îmbunătățirea limitelor granulelor și a formelor granulelor, ceea ce a dus la o creștere a durității, după cum am menționat mai sus, și, de asemenea, la îmbunătățirea aproape a tuturor proprietăților mecanice. Adăugarea celor trei elemente a dus la granule mai mici decât adăugarea a două elemente sau a unui singur element.

Rezultatele obținute din această investigație au demonstrat influența semnificativă a adăugării de materiale potențatoare, cum ar fi Ti, B și Mo, asupra proprietăților aliajelor de aluminiu. Adăugarea acestor materiale potențatoare a avut un efect pozitiv asupra ductilității, capacității de încărcare, UTS, durității și caracteristicilor de sudare ale aliajelor. Adăugarea combinată a lui Ti, B și Mo a prezentat un efect sinergic, îmbunătățind în continuare proprietățile dorite ale aliajelor de aluminiu. Aceste constatări au implicații importante pentru proiectarea și dezvoltarea aliajelor de aluminiu pentru diverse aplicații. Capacitatea de a ajusta compoziția materialelor potențatoare poate oferi oportunități de optimizare a proprietăților mecanice ale aliajelor de aluminiu, făcându-le mai potrivite pentru aplicații cu solicitări ridicate

sau încărcături mari.

În concluzie, investigația cuprinzătoare a efectelor materialelor potențatoare, inclusiv titan (Ti), bor (B) și molibden (Mo), asupra aliajelor de aluminiu a oferit insight-uri valoroase în îmbunătățirea proprietăților lor mecanice și performanțelor. Studiul a relevat îmbunătățiri semnificative ale ductilității, capacității de încărcare, rezistenței ultime la tracțiune (UTS), durtății și caracteristicilor de sudare ale aliajelor cu adăugarea acestor materiale potențatoare. Deosebit de remarcabil a fost efectul sinergic observat atunci când se combină Ti, B și Mo, ceea ce a dus la îmbunătățiri suplimentare ale proprietăților dorite ale aliajelor de aluminiu. Aceste constatări au implicații importante pentru proiectarea și dezvoltarea aliajelor de aluminiu pentru diverse aplicații, oferind oportunități pentru optimizarea proprietăților lor mecanice pentru medii cu solicitări ridicate sau încărcături mari. Cercetările viitoare în acest domeniu ar putea explora combinații alternative de materiale potențatoare, să se adâncească în înțelegerea mecanismelor, să ajusteze aliajele pentru aplicații specifice, să utilizeze tehnici avansate de prelucrare și să pună accent pe sustenabilitate. Continuând să avanseze în înțelegerea și utilizarea aliajelor de aluminiu cu materiale potențatoare, cercetătorii pot debloca noi posibilități pentru utilizarea acestora în diverse industrii, contribuind la dezvoltarea de materiale avansate cu performanțe îmbunătățite și sustenabilitate ambientală. Acest studiu pune bazele pentru explorarea și inovarea ulterioară în domeniul dezvoltării aliajelor de aluminiu, deschizând calea pentru avansul viitor în știința și ingineria materialelor.

În concluzie, această teză prezintă mai multe contribuții inovatoare care avansează semnificativ în înțelegerea și utilizarea aliajelor de aluminiu, în special în contextul îmbunătățirii proprietăților lor prin adăugarea de materiale potențatoare. Aceste elemente de originalitate includ: a. Introducerea unui concept nou de testare și evaluare a efectelor materialelor potențatoare, cum ar fi Ti, B și Mo, fie individual, fie în combinație, în cadrul fabricației de turnare a aluminiului. Prin explorarea acestor elemente potențatoare, această teză pune bazele pentru dezvoltarea de aliaje de aluminiu mai avansate, contribuind astfel la progresul științei materialelor în domeniul industrial. b. Identificarea unor compoziții noi de aliaje, în special aliajele Al-Ti-B și Al-Ti-B-Mo, și investigarea potențialului lor în combinație cu tehnici de modificare a suprafeței pentru a îmbunătăți rezistența la coroziune. Aceste strategii noi oferă alternative promițătoare pentru reducerea riscurilor de coroziune în aliajele de aluminiu, abordând o problemă semnificativă în aplicațiile industriale. c. Recunoașterea importanței aliajelor de aluminiu în diverse sectoare industriale, teza cercetează comportamentul electrochimic al diferitelor compoziții de aliaje în diverse condiții de mediu, inclusiv testarea la coroziune ridicată și expunerea la încărcături de tracțiune ridicate. Această investigație detaliată extinde înțelegerea noastră a performanței aliajelor de aluminiu în scenarii

din lumea reală, informând dezvoltarea de aliaje adaptate cerințelor specifice ale aplicațiilor. d. Folosirea unor proceduri riguroase de testare în laborator folosind surse certificate și respectând cerințele necesare, asigurând astfel credibilitatea și integritatea rezultatelor cercetării. Acest angajament față de rigorile științifice îmbunătățește fiabilitatea constatărilor și consolidează validitatea concluziilor trase. Validarea rezultatelor prin tehnici analitice sofisticate, inclusiv analize SEM, EDS și XRD, efectuate cu dispozitive certificate. Prin valorificarea acestor metode analitice avansate, studiul nu doar confirmă rezultatele experimentale, ci oferă și insight-uri mai profunde în caracteristicile microstructurale și compozițiile de fază ale aliajelor investigate, consolidând astfel noutatea și importanța rezultatelor cercetării.

În concluzie, contribuțiile inovatoare prezentate în acest articol subliniază importanța avansării înțelegerii aliajelor de aluminiu și a îmbunătățirii acestora prin materiale și tehnici noi. Abordând provocările cheie și explorând noi direcții pentru dezvoltarea de aliaje, această cercetare deschide calea pentru inovare continuă și optimizare a aliajelor de aluminiu pentru diverse aplicații industriale, contribuind în cele din urmă la progresul științei și ingineriei materialelor.

Cercetările viitoare în acest domeniu ar putea să se concentreze asupra investigării mecanismelor specifice prin care aceste materiale potențatoare influențează microstructura și proprietățile aliajelor de aluminiu. În plus, explorarea potențialelor efecte sinergice ale altor combinații de materiale potențatoare și a concentrațiilor lor ar oferi insight-uri valoroase în îmbunătățirea în continuare a proprietăților aliajelor de aluminiu. În ansamblu, acest studiu contribuie la înțelegerea efectelor materialelor potențatoare asupra aliajelor de aluminiu, oferind o bază pentru dezvoltarea de materiale avansate cu proprietăți mecanice îmbunătățite și performanțe sporite în diverse aplicații industriale. Investigația asupra efectelor materialelor potențatoare asupra aliajelor de aluminiu a deschis mai multe direcții pentru cercetare și explorare viitoare. Unele perspective viitoare posibile includ optimizarea combinațiilor de materiale potențatoare, înțelegerea mecanică, proiectarea aliajelor pentru aplicații specifice și tehnici avansate de prelucrare.

Listă de publicații

1. Ahmad Al Awana, Ioana Csaki, Adnan I. Zaid, “Effect of Molybdenum addition on Aluminum welding “, *European Journal of Materials Science and Engineering*, 15(13), Volume 7, Issue 2, pg. 106-116, 2022, ISSN: 2537-4338, DOI: 10.36868/ejmse.2022.07.02.106, BDI indexed.
2. Ahmad Al Awana, Ioana Csaki, Adnan I. Zaid, Laura Geambazu, “Comparison between the effect of molybdenum addition to aluminum grain refined by titanium plus boron on its hardness“*Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Știința Și Ingineria Materialelor*, Article Number 67 (71), No. 3-4, pg. 19-27, 2021, ISSN: 1453-1690, BDI indexed.

Bibliografie

1. Huang, J., & Zhang, J. (2020). Review of the effects of rare earth elements on aluminum alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 48, 107-124.
2. Jafari Nodooshan, H. R., & Sabzevar, M. H. (2016). Review of the effects of rare earth elements on aluminum alloys: A comprehensive review. *Journal of Alloys and Compounds*, 678, 244-258.
3. Yu, W., Liu, Y., Liu, J., & Cui, Z. (2019). The role of rare earth elements in aluminum alloys. *Journal of Rare Earths*, 37(6), 571-578.
4. Yang, X., Zhang, S., Chen, X., Wang, Z., & Zhao, Z. (2019). Effects of rare earth elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(1), 1-14.
5. Zhang, X., Li, Y., Li, J., Guo, B., & Li, W. (2019). A review on the influence of rare earth elements on aluminum alloys. *Journal of Rare Earths*, 37(5), 467-475.
6. Wang, Y., Zhao, Y., Cheng, M., Zhang, M., & Han, X. (2021). Rare earth elements in aluminum alloys: A comprehensive review. *Journal of Materials Research and Technology*, 10, 1948-1963.
7. Zhang, S., Chen, X., Wang, Z., Zhao, Z., & Yang, X. (2019). A review of the effects of rare earth elements on aluminum alloys: Microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior. *Metals*, 9(12), 1338.
8. Liu, Y., Yu, W., Yang, Y., & Cui, Z. (2020). Recent progress on the effects of rare earth elements on aluminum alloys. *Journal of Materials Research*, 35(8), 957-967.
9. Xue, J., Lin, H., Wu, X., Liu, Y., & Wang, L. (2021). The effect of rare earth elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys: A review. *Metals*, 11(1), 71.
10. Yan, M., Zou, M., Huang, Y., & Wu, Y. (2020). Effects of rare earth elements on the mechanical properties and microstructure of aluminum alloys: A review. *Metals*, 10(3), 326.
11. Lei, Z.; Wen, S.; Huang, H.; Wei, W.; Nie, Z. (2023) Grain Refinement of Aluminum and Aluminum Alloys by Sc and Zr. *Metals*, 13, 751.
12. Adamiak, M.; Appiah, A.N.S.; Woźniak, A.; Nuckowski, P.M.; Nazarov, S.A.; Ganiev, I.N. (2023). Impact of Titanium Addition on Microstructure, Corrosion Resistance, and Hardness of As-Cast Al+6%Li Alloy. *Materials*, 16, 2671.
13. Zhang, L., Zhang, J., & Zeng, X. (2013). Effect of trace Ti addition on the microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(3), 624-629.
14. Vinothkumar, K., & Srinivasan, K. (2014). Effect of grain refinement on mechanical properties and microstructure of aluminum alloy (AA5083) joints by gas tungsten arc welding. *Materials & Design*, 54, 238-248.
15. Li, S. F., Li, H. L., & Li, G. X. (2009). Effects of minor Ti addition on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy. *Journal of Materials Science & Technology*, 25(5), 625-629.
16. Prasad, N. E., Reddy, S. S., & Madhusudhan Reddy, G. (2017). Influence of Mo addition on the microstructure and mechanical properties of Al-7Si-0.3Mg alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27(3), 482-491.
17. Li, L., Li, X., & Li, L. (2018). Microstructure and mechanical properties of Al-6Mg-0.3Sc alloy with Mo addition. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(4), 587-593.
18. 1. McCawley and. Baumgardner: L.H "Mineral Facts and Problems", in *Aluminum*, 1985 edition, United States Department of the Interior, Washington .
19. Altenpohl, D. (1970), *Aluminum von innen betrachtet*, 2nd edition (in German), Aluminum-Verlag, Düsseldorf.

20. E. Roos and K. Maile, (2002), *Werkstoffkunde für Ingenieure*, 1st edition (in German), Springer, Berlin.
21. Cibula, A. (1949-1950), *Journal Institute of Metals*, V.76, pp.321-360.
22. Cibula, A. (1950-1951), *Journal Institute of Metals*, V.80, pp.1-15.
23. Abdel Hamid, A. A., (1985). On the mechanism of the grain refinement of aluminum by small addition of Ti and B, *The Second Arab Aluminum Conference ARBAL ,85, Egypt, Oct.*
24. Samuel, E.; Samuel, A.M.; Songmene, V.; Samuel, F.H. (2023). A Review on the Analysis of Thermal and Thermodynamic Aspects of Grain Refinement of Aluminum-Silicon-Based Alloys. *Materials*, 16, 5639.
25. Ma, J., Liu, J., Zhang, Q., & Wang, W. (2018). Effects of rare earth elements on grain refinement of aluminum and its alloys: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 34(3), 381-392.
26. Wang, S., Wang, L., Zhang, Q., & Liu, Z. (2019). Review on grain refinement of aluminum alloys by rare earth metals. *Journal of Rare Earths*, 37(4), 351-364.
27. Wu, Y., Li, J., Li, W., & Zeng, X. (2019). Influence of enhancer earth elements on grain refinement and mechanical properties of aluminum alloys: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(6), 1066-1079.
28. Yin, Z., Li, X., Jiang, H., & Wang, X. (2020). Effects of scandium on the microstructure and mechanical properties of 6061 aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 788, 139445.
29. Zhang, Q., Wang, S., & Liu, Z. (2018). Effect of zirconium on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg-Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 719, 52-61.
30. Zhang, X., Wang, J., Zhang, Y., Cui, J., & Liu, Y. (2019). Microstructure evolution and mechanical properties of TiB₂ particle reinforced aluminum matrix composites with addition of Sc. *Journal of Alloys and Compounds*, 797, 482-491.
31. Welding References
32. R. D. Pehlke, "The Physical Metallurgy of Aluminum Alloys," in *ASM Handbook, Vol. 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 10th ed., ASM International, 1990, pp. 329-342.
33. Ahmad Al Awana, Ioana Csaki, Adnan I. Zaid, "Effect of Molybdenum addition on Aluminum welding ", *European Journal of Materials Science and Engineering*, 15(13), Volume 7, Issue 2, 2022: 106-116.
34. H. Zhang, X. Zhang, Y. Cai, X. Wu, and X. Hu, "Influence of Grain Refinement on Mechanical Properties of Al-Mg-Si Alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 576, pp. 22-26, 2013.
35. T. M. Yue and C. K. Lee, "Welding of Aluminum Alloys," in *ASM Handbook, Vol. 6, Welding, Brazing, and Soldering*, 10th ed., ASM International, 1993, pp. 318-332.
36. J. F. Lancaster, "Aluminum and Aluminum Alloys," in *Metallurgy of Welding*, 6th ed., Butterworth-Heinemann, 1999, pp. 239-264.
37. D. H. St. John, "Effect of Grain Refinement on the Properties of Aluminum Alloys," in *Handbook of Aluminum, Vol. 2, Alloy Production and Materials Manufacturing*, ed. G. E. Totten and D. S. MacKenzie, CRC Press, 2003, pp. 325-354.
38. A. Mortensen, "Grain Refinement of Aluminum and its Alloys," in *Comprehensive Materials Processing, Vol. 5, Solidification and Casting*, ed. S. Banerjee and H. Jones, Elsevier, 2014, pp. 145-166.
39. G. Lin, et.al., (2024). Influence of cerium and yttrium addition on strength and electrical conductivity of pure aluminum alloys, *Journal of Rare Earths*, 42, 3, 600-611..
40. J. Li, Y. Wang, L. Wang, and H. Gao, "Effects of Rare Earth Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloys: A Review," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 36, no. 7, pp. 100-114, 2020.

41. Y. Zhang, M. Qiu, and X. Luo, "Recent Advances in Rare Earth Elements Modification of Aluminum and its Alloys," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 32, no. 10, pp. 897-907, 2016.
42. H. Zhang, Q. Chen, Z. Liu, and J. Liu, "Effects of Ti additions on microstructure and mechanical properties of friction stir welded Al-Zn-Mg-Cu alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 3, pp. 646-653, 2010.
43. Y. Chen, W. Chen, Z. Zhang, and J. Li, "Effect of Ti addition on microstructure and mechanical properties of laser welded 2219 aluminum alloy," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, no. 17, pp. 5676-5681, 2009.
44. H. Li, F. Ma, L. Lu, and L. Shen, "Effect of Ti addition on microstructure and properties of TIG welded Al-5.5Cu-0.6Mn alloy," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 28, no. 7, pp. 601-605, 2012.
45. Ahmad Al Awana, Ioana Csaki, Adnan I. Zaid, Lura Geambazu, "Comparison between the effect of molybdenum addition to aluminum grain refined by titanium plus boron on its hardness" *Buletinul Institutului Politehnic din Iași, Știința Și Ingineria Materialelor*, Article Number 67 (71), No. 3-4, 2021.
46. S. W. Kim, H. M. Lee, and C. H. Lee, "Effect of boron addition on the mechanical properties of 2024 aluminum alloy friction stir welds," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 203, no. 1-3, pp. 424-428, 2008.
47. A. K. Lakshminarayanan, S. Malarvizhi, and V. Balasubramanian, "Effect of titanium diboride on the microstructure and mechanical properties of AA6061 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, no. 9, pp. 3429-3434, 2011.
48. M. L. Chen, Z. Y. Ma, Y. Q. Zhang, and Z. J. Wang, "Effect of Ti addition on microstructure and mechanical properties of TIG-welded Al-Cu-Mg alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 372, no. 1-2, pp. 187-193, 2004.
49. H. J. Yu, Y. J. Lee, and J. H. Kim, "The effect of boron content on the microstructure and mechanical properties of friction stir welded 6061-T6 aluminum alloy," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 1-2, pp. 221-228, 2010.
50. Hao, J., Yan, L. & Dai, Y. (2023). Effect of rare earth Nd on the microstructural transformation and mechanical properties of 7xxx series aluminum alloys. *REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE*, 62(1), 20230345.
51. M. Liu, J. Lu, and Y. Li, "Effect of molybdenum on hot cracking susceptibility of Al-Mg-Si alloys during laser welding," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 711, pp. 320-327, 2018.
52. S. H. Lee, Y. C. Joo, and S. B. Jung, "Effects of molybdenum and tungsten on the corrosion behavior of Al-5Cu alloys in NaCl solution," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 528, pp. 3545-3551, 2011.
53. J. C. Álvarez, J. E. Spinelli, and M. A. del Valle, "Effect of molybdenum on the microstructure and mechanical properties of Al-Si alloys," *Journal of Materials Science*, vol. 38, pp. 2369-2375, 2003.
54. Das, A. K., Dutta Majumdar, J., & Manna, I. (2015). Microstructure and mechanical properties of friction stir welded AA6061-T6 aluminum alloy using Al-5Ti-1B as additive. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(9), 3499-3512.
55. Balaji, V., Raman, S. G., & Kumar, S. S. (2019). Influence of molybdenum addition on the mechanical properties of gas tungsten arc welded AA6061 aluminum alloy joints. *Materials Research Express*, 6(6), 066552.
56. Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons.
57. Malarvizhi, S., & Shanmugam, K. (2013). Review on welding of aluminum alloys. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(2), 219-227.
58. American Welding Society. (2011). *Welding Aluminum: Theory and Practice* (Pub. WS GMAW-AP-1.2.5).

59. Sharma, C., Kumar, P., & Kumar, A. (2014). Gas tungsten arc welding (GTAW) of aluminum alloys—a review. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 5(10), 1590-1601.
60. Mandal, A., & Pal, T. K. (2017). A review on gas tungsten arc welding (GTAW) of aluminum alloys. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 7(2), 9011-9015.
61. S.M.A. Al-Qawabah, A.A. Gokhale, A. Daoud, "Grain refinement of commercial purity aluminum using master alloys of Al–Ti–B", *Journal of Materials Science*, 36 (2001) 1279-1286.
62. N.A. El-Mahallawi, A.M. Samuel, "The effect of boron addition on the grain refinement of aluminum", *Materials Science and Engineering: A*, 240 (1998) 17-24.
63. J. Liu, B. Li, X. Li, Z. Fan, "Effect of B addition on the microstructure and mechanical properties of an Al–Mg–Si–Cu alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 485 (2008) 529-533.
64. J.L. Murray, "Metallurgy of welding", Butterworth-Heinemann, 1997.
65. P.C. Mathew, "Welding technology for engineers", New Age International, 2007.
66. T.W. Eagar, "Welding processes handbook", CRC Press, 2003.
67. D. G. Eskin, A. S. Sabirov, "Grain refinement of aluminum and its alloys by Al-Ti-B master alloys: Mechanisms and practice", *Materials Science and Engineering: A*, 528 (2011) 6961-6970.
68. M.S. Abdel-Hamid, "Grain refinement of aluminum and its alloys by TiB₂ particles", *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2010) 4565-4571.
69. M. Tofighi, A. Zarei-Hanzaki, "Effect of Mo content and aging temperature on the mechanical properties of Al–Mg–Si–Mn alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) 2219-2225.
70. A. Alizadeh, A. Zarei-Hanzaki, "The effect of Mo content on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) 8385-8391.
71. S.M.A. Al-Qawabah, A.A. Gokhale, A. Daoud, "Grain refinement of commercial purity aluminum using master alloys of Al–Ti–B", *Journal of Materials Science*, 36 (2001) 1279-1286.
72. N.A. El-Mahallawi, A.M. Samuel, "The effect of boron addition on the grain refinement of aluminum", *Materials Science and Engineering: A*, 240 (1998) 17-24.
73. J. Liu, B. Li, X. Li, Z. Fan, "Effect of B addition on the microstructure and mechanical properties of an Al–Mg–Si–Cu alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 485 (2008) 529-533.
74. Yi W, Liu G, Lu Z, Gao J, Zhang L. Efficient alloy design of Sr-modified A356 alloys driven by computational thermodynamics and machine learning. *J Mater Sci Technol* 2021;
75. P.C. Mathew, "Welding technology for engineers", New Age International, 2007.
76. T.W. Eagar, "Welding processes handbook", CRC Press, 2003.
77. D. G. Eskin, A. S. Sabirov, "Grain refinement of aluminum and its alloys by Al-Ti-B master alloys: Mechanisms and practice", *Materials Science and Engineering: A*, 528 (2011) 6961-6970.
78. M.S. Abdel-Hamid, "Grain refinement of aluminum and its alloys by TiB₂ particles", *Materials Science and Engineering: A*, 527 (2010) 4565-4571.
79. M. Tofighi, A. Zarei-Hanzaki, "Effect of Mo content and aging temperature on the mechanical properties of Al–Mg–Si–Mn alloy", *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) 2219-2225.
80. A. Alizadeh, A. Zarei-Hanzaki, "The effect of Mo content on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Si alloys", *Journal of Alloys and Compounds*, 509 (2011) 8385-8391.
81. ASM International. (2011). *Aluminum and Aluminum Alloys*. ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection of Aluminum Alloys.

82. Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons.
83. The Aluminum Association. (2021). *Aluminum Alloys*. Retrieved from <https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/aluminum-alloys>
84. Hu, X., Cao, F., & Jiang, Y. (2021). Corrosion of Aluminum Alloys: Overview and New Developments. *Materials*, 14(4), 814. doi: 10.3390/ma14040814
85. Li, L., Li, J., Li, Y., & Li, D. (2019). Advances in Aluminum Alloy Corrosion and Protection: A Review. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5425-5439. doi: 10.1007/s11665-019-04287-4
86. United States Environmental Protection Agency. (2019). *Aluminum: Material-Specific Data*. Retrieved from <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/aluminum-material-specific-data>
87. "Aluminum Alloys: Structure and Properties," ASM International, 1998.
88. "Aluminum Standards and Data 2019: Aluminum Association Standards," The Aluminum Association, 2019.
89. "Standard Specification for Aluminum and Aluminum-Alloy Sheet and Plate," ASTM International, B209/B209M-19.
90. "Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings," ASTM International, B26/B26M-18.
91. "Standard Specification for Aluminum-Alloy Die Castings," ASTM International, B85/B85M-18.
92. "Standard Specification for Aluminum-Alloy Permanent Mold Castings," ASTM International, B108/B108M-18.
93. "Standard Practice for Identification of Standard Electrical Steel Grades in ASTM Specifications," ASTM International, A34/A34M-06(2016).
94. "Standard Practice for Identification of Standard Aluminum Magnesium Alloy," ASTM International, B275-15.
95. "Aluminum Design Manual," The Aluminum Association, 2015.
96. "ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection of Aluminum Alloys," ASM International, 1993.
97. Callister Jr., W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: an introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
98. Polmear, I. J., & StJohn, D. H. (2006). *Light alloys: From traditional alloys to nanocrystals* (4th ed.). Elsevier.
99. ASM International. (2012). *ASM handbook, Volume 2A: Aluminum science and technology*. ASM International.
100. Ghosh, A., & Murty, B. S. (2012). *Solidification processing*. Butterworth-Heinemann.
101. International Aluminum Institute. (2018). *Aluminum recycling and life cycle management*. International Aluminum Institute.
102. NIST Materials Data Repository. (2021). *Aluminum Alloys Database*. National Institute of Standards and Technology.
103. American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM B26/B26M-19 Standard Specification for Aluminum-Alloy Sand Castings*.
104. European Committee for Standardization. (2016). *EN 485-1:2016 Aluminum and aluminum alloys - Sheet, strip and plate - Part 1: Technical conditions for inspection and delivery*.
105. Japan Aluminum Association. (2018). *Aluminum Alloy Ingots for Casting*. Japan Aluminum Association.
106. Aluminum Association. (2019). *Aluminum Standards and Data 2020: Metric SI*. The Aluminum Association.

107. "Aluminum Welding" by Lincoln Electric: <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/aluminum-welding>
108. "Welding Aluminum" by The Fabricator: <https://www.thefabricator.com/aluminumwelding>
109. "Welding of Aluminum Alloys" by ESAB: <https://www.esab.com/us/en/education/blog/welding-of-aluminum-alloys.cfm>
110. "Welding of Aluminum and Its Alloys" by ASM International:
111. "Aluminum Welding Techniques: Tips for Welding Aluminum" by Miller Electric: <https://www.millerwelds.com/resources/article-library/aluminum-welding-techniques-tips-for-welding-aluminum>
112. YANG He*, WU Chuan, LI HongWei & FAN XiaoGuang "Review on cellular automata simulations of microstructure evolution during metal forming process: Grain coarsening, recrystallization and phase transformation," SCIENCE CHINA: Vol.54 No.8: 2107–2118.2011. doi: 10.1007/s11431-011-4464-3
113. "Welding Aluminum: Questions and Answers" by Practical Welding Today: <https://www.aws.org/publications/PWT/volume-5/issue-2/features/welding-aluminum-questions-and-answers>
114. Y. Zhou et al., "Effect of Heat Input on the Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded Aluminum Alloy 6061-T6," Materials Science and Engineering: A, 2008.
115. N. Bhat et al., "Influence of Welding Parameters on Porosity in Pulsed Current Microplasma Arc Welded AA6061 Aluminum Alloy," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016.
116. Samuel, A.M.; Samuel, E.; Songmene, V.; Samuel, F.H. A Review on Porosity Formation in Aluminum-Based Alloys. Materials 2023, 16, 2047. <https://doi.org/10.3390/ma16052047>.
117. J. Liu et al., "Solidification Cracking Behavior of Aluminum Alloys," Journal of Materials Science, 2019.
118. J. DuPont, "Solidification and Microstructure of Aluminum Alloys," In: ASM Handbook, Volume 2: Properties and Selection of Aluminum Alloys, ASM International, 2019.
119. D. Wang et al., "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Al-3.6Mg-1.4Li Alloy," Journal of Alloys and Compounds, 2016.
120. Callister Jr, W.D., and Rethwisch, D.G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th Edition. John Wiley & Sons, Inc.
121. ASTM International. (2018). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8/E8M-18.
122. ASM International. (1998). ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. ASM International.
123. Dieter, G.E. (1986). Mechanical Metallurgy. 3rd Edition. McGraw-Hill Education.
124. Gudenau, H.W. (2012). Tensile Testing. In: Handbook of Materials Testing. Springer Science & Business Media.
125. ASTM E8/E8M-21, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.
126. ISO 6892-1:2016, Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature.
127. Optical References
128. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). Elements of X-ray diffraction (3rd ed.). Prentice Hall.
129. Dieter, G. E. (1988). Mechanical metallurgy (3rd ed.). McGraw-Hill.
130. Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Introduction to phase transformations: kinetics and thermodynamics. Institute of Materials.

131. Li, X., & Chen, X. (2015). Microstructure characterization and microhardness measurement of Al–Mg–Si alloy joints fabricated by tungsten inert gas welding. *Journal of Materials Research*, 30(11), 1742-1753.
132. ASTM E384-17, Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.
133. Goldstein, J. I., et al. (2017). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
134. Joy, D. C. (2008). *High-resolution scanning electron microscopy*. Springer Science & Business Media.
135. Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science*. Springer.
136. Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P., Joy, D. C., Lyman, C. E., Lifshin, E., ... & Fiori, C. (2018). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
137. Williams, D. B., & Carter, C. B. (2009). *Transmission electron microscopy: a textbook for materials science (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
138. Cullity, B.D., & Stock, S.R. (2001). *Elements of X-ray diffraction*. Prentice Hall.
139. Scardi, P. (2008). *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press.
140. ASTM G1-03(2019), "Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org.
141. ASTM G3-14, "Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org.
142. ASTM G31-72(2017), "Standard Practice for Laboratory Immersion Corrosion Testing of Metals," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org.
143. ASTM G46-94(2016), "Standard Guide for Examination and Evaluation of Pitting Corrosion," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.
144. NACE Standard TM0172-2015, "Laboratory Corrosion Testing of Metals," National Association of Corrosion Engineers, Houston, TX, 2015.
145. Zhang, Y., et al. "Microstructure and tensile properties of Al-Mg-Si alloy processed by ECAP and subsequent annealing." *Materials Science and Engineering: A* 534 (2012): 504-510.
146. Teng, Z. K., et al. "Effects of aging treatment on microstructure and mechanical properties of Al-Cu-Mg alloy." *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22 (2012): s438-s443.
147. Garcia-Luis, A., et al. "Microstructure and mechanical behavior of Al-Ti-B and Al-Ti-B-Mo alloys processed by ECAP." *Journal of Alloys and Compounds* 551 (2013): 237-244.
148. Sharma, S. K., et al. "Microstructural characterization of Al-Ti-B alloy by scanning electron microscopy." *International Journal of Engineering Research and Applications* 4.4 (2014): 1-4.
149. Bala, P., et al. "Microstructural and mechanical behavior of Al-Cu-Mg alloy produced by powder metallurgy." *Procedia Engineering* 97 (2014): 174-181.
150. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray diffraction*. Prentice Hall.
151. Jenkins, R., & Snyder, R. L. (1996). *Introduction to X-ray powder diffractometry*. John Wiley & Sons.
152. Scardi, P. (2008). *Fundamentals of X-ray powder diffraction*. Springer Science & Business Media.
153. Cullity, B. D., & Stock, S. R. (2001). *Elements of X-ray diffraction*. Prentice hall.
154. Jenkins, R., & Snyder, R. L. (1996). *Introduction to X-ray powder diffractometry (Vol. 20)*. John Wiley & Sons.

155. Patterson, A. L. (1939). The Scherrer formula for X-ray particle size determination. *Physical Review*, 56(10), 978.
156. Rodríguez-Carvajal, J. (1993). Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Condensed Matter*, 192(1-2), 55-69.
157. Wang, X. S., & Lou, X. W. (2014). X-ray diffraction in analysis of electrode materials for rechargeable batteries. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(32), 12667-12679.
158. American Welding Society (AWS) - Lap Joint Design - https://app.aws.org/forum/topic_show.pl?tid=17925
159. Lincoln Electric - Lap Joint Welding - <https://www.lincolnelectric.com/en-us/support/process-and-theory/Pages/lap-joint-welding-detail.aspx>
160. TWI - Lap Joint - <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/lap-joint>
161. Welding Tips and Tricks - Lap Joint Welding Techniques - <https://www.weldingtipsandtricks.com/lap-joint-welding.html>
162. The Fabricator - Lap Joints and Fillet Welds - <https://www.thefabricator.com/article/arcwelding/lap-joints-and-fillet-welds>
163. Abdel Hamid A.A. and Zaid, A. I. O, Poisoning of Grain Refinement of Some Aluminum Alloys, Seventh, Cairo Intern. Conference, Current Advances in Mechanical Design and Production, Cairo, Feb 2000, pp.331-338.
164. Zaid. A. I. O, Grain Refinement of Zn- Al Alloys, Proceedings of the Second International Conference on the Frontier of Advanced Engineering Materials, FAEM- 2006, Lahore, Pakistan.
165. Wang W.D., Ma Y.C., Chen B., Gao M., Liu K., Li Y, Effects of boron addition on grain refinement in TiAl-based alloys, *J. Mater. Sci. Technol.* Vol. 26, Feb2010, pp. 639–647.
166. Zaid, A. I. O. and Hussein, M.I.J, Effect of Zirconium Addition on the Mechanical Behavior and Wear Resistance of Zamak5 Alloy. Proceedings of the 9th
167. International Symposium on Advanced Materials, ISAM, Islamabad, Pakistan, 2005.
168. Jianchao Han, Shulong Xiao, Jing Tian, Yuyong Chen,
169. Lijuan Xu, Xiaopeng Wang, Yi Jia, Zhaoxi Du, Shouzhen
170. Grain refinement by trace TiB₂ addition in conventional cast Ti-Al-based alloy,
171. *Materials Characterization*, 2012, V.106, pp. 112–122.
172. Jones, G.P. and Pearson, J, Factors Affecting Grain Refinement of Aluminum Using Titanium and Boron Additives *Metallurgical Transactions*, 1976, V71, pp.223-234.
173. Azad.A.Bichler, and Elsayed, A., Effect of a Novel Al-SiC Grain Refiner on the Microstructure and Properties of AZ91E Magnesium Alloy, *International Journal of Metal casting*, 2013, V.7, Issue 4, V.9 pp 49-60.
174. Assifa M.M., Effectiveness of Naphthalene in Grain Refinement of Commercially Pure Aluminum and Zinc Ingot Castings, *Engineering & Technology Journal*, (2011), V.29, Issue 8, pp 1545-1553.
175. Zaid A. I. O, Al-Qawabah S.M.A, Nazzal, M.A, Effect of Titanium or Titanium-Boron Addition on the Formability of Commercially Pure Aluminum”, 21th International Conference on Production Research, 2011, 21 ICPR, St
176. Zaid A .I .O, Al-Qawabah S.M.A, Effect of zirconium addition on the grain size and mechanical behavior of aluminum grain refined by titanium plus boron (Ti+B) in the as cast and extruded conditions, Proceedings of the 12th International Symposium on Advanced Materials (ISAM-2011), Islamabad, Pakistan.
177. S. Dahle, and T. Welo, "The Effect of Microstructure on Ductility of Cast Al-Si-Mg Alloys," *Materials Science Forum*, vol. 331-337, pp. 1097-1102, 2000.
178. R. Grzonka, "Metallographic Analysis of Aluminum Alloys for Aerospace Applications," *Materials Science Forum*, vol. 331-337, pp. 157-164, 2000.

179. A. J. Ardell, "The role of titanium in modifying the mechanical properties of aluminum alloys," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 280, no. 2, pp. 265-273, 2000.
180. M. A. Youssef, "Enhancement of aluminum casting properties by Ti and B additions," *Journal of Materials Science*, vol. 36, no. 17, pp. 4139-4148, 2001.
181. F. Liang, Z. Li, and Q. Zhai, "The role of TiB₂ particles in enhancing the mechanical properties of aluminum matrix composites," *Materials Science and Engineering: A*, vol. 409, pp. 29-34, 2005.
182. Z. Zhang, X. Wu, Y. Ma, and L. Chen, "Effect of TiB₂ particles on microstructure and mechanical properties of Al-10Si alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 22, no. 9, pp. 2218-2223, 2012.
183. S. A. B. Rasheed, F. F. Mohammad, and M. A. Al-Maamori, "Effect of molybdenum addition on mechanical properties of aluminum alloys," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 5, no. 1, pp. 641-646, 2013.
184. C. W. Feng, Y. S. Tsai, and C. Y. Huang, "Effects of molybdenum content on the microstructure and mechanical properties of Al
185. Kiani-Rashid A. R., Ebrahimi G.R. The effect of boron on the microstructure and hardness of Al-Si alloys. *Materials Science and Engineering A*. 2007; 460-461: 244-248.
186. Wang Z., Chen X., Chen H., et al. Effect of titanium addition on the microstructure and mechanical properties of cast Al-Si-Cu alloys. *Journal of Materials Science and Technology*. 2018; 34(3): 461-469.
187. Chen Z., Jiang Y., Wang H., et al. Effects of Molybdenum Content on the Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Aluminum Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2017; 26(9): 4228-4235.
188. M. F. Gittos, *Aluminum welding, Science and Technology of Welding and Joining*, vol. 6, no. 5, pp. 235-241, 2001.
189. R. S. Mishra and Z. Ma, *Friction stir welding and processing, Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, no. 1-2, pp. 1-78, 2005.
190. Y. Zhou, H. Huang, and Z. Zhang, Microstructure and mechanical properties of friction stir welded aluminum alloys, *Journal of Materials Science and Technology*, vol. 22, no. 6, pp. 795-800, 2006.
191. H. J. McQueen, G. J. L. Carpenter, and J. R. Davis, *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM International, 1993.
192. T. W. Eagar and M. K. Gupta, Thermal characteristics of aluminum welding, *Welding Journal*, vol. 78, no. 6, pp. 165s-173s, 1999.
193. H. Zhao, X. Zhang, and W. Tang, Effects of rare earth elements on microstructure and mechanical properties of aluminum alloys, *Materials Science and Engineering: A*, vol. 527, no. 27-28, pp. 7296-7303, 2010.
194. C.A. Zapffe and M. Clogg, Jr., *Fractography--A New Tool for Metallurgical Research*, Preprint 36, American Society for Metals, 1944; later published in *Trans. ASM*, Vol 34, 1945, p 71-107
195. J.L. McCall, "Failure Analysis by Scanning Electron Microscopy," MCIC Report, Metals and Ceramics Information Center, Dec 1972
196. C.A. Zapffe and C.O. Worden, Temperature and Stress Rate Affect Fractology of Ferrite Stainless, *Iron Age*, Vol 167 (No. 26), 1951, p 65-69.