

**Atf İçin:** Yaykaşlı, H. ve Gögebakan, M. (2023). AlMgTiB Alaşımının Yapısal, Isısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13(1), 572-581.

**To Cite:** Yaykaşlı, H., & Gögebakan, M. (2023). Investigation of Structural, Thermal and Mechanical Properties of AlMgTiB Alloy. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 13(1), 572-581.

## AlMgTiB Alaşımının Yapısal, Isısal ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Hakan YAYKAŞLI<sup>1\*</sup>, Musa GÖĞEBAKAN<sup>2</sup>

### **Öne Çıkanlar:**

- Hafif Alaşım
- XRD
- Mikrosertlik

### **Anahtar Kelimeler:**

- AlMgTiB
- Alüminyum alaşımı
- Bor
- Mekanik özellikler

### **ÖZET:**

Bu çalışmada,  $Al_{86-x}Mg_{10}Ti_4B_x$  ( $x=1, 2, 3$  ve  $4$ ) alaşımları döküm yöntemi ile üretilerek mikroyapı, ısısal ve mekanik özellikleri kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Alaşımların mikroyapı özellikleri X-ışını difraksiyonu (XRD), Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM), Enerji Dağılımlı X-ışını Spektroskopisi (EDX) ile karakterize edilmiştir. Kompozisyon oranları X-ışını floresans Spektrometresi (XRF) kullanılarak incelenmiştir. Termal davranışları diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) analizi ile değerlendirilmiştir. Mekanik özellikleri Vickers mikrosertlik (HV) ölçümü ve çekme testi yapılarak araştırılmıştır. Alaşımların XRD analizlerinde,  $\alpha$ -Al,  $\beta$ - $Al_3Mg_2$ ,  $Al_3Ti$  ve  $AlB_2$  gibi fazlar tespit edilmiştir. SEM görüntüleri alaşımların mikro yapısının esas olarak, çubuksu ve dentritik yapılar içerdiğini göstermiştir. Alaşımların nominal kompozisyonuna uygun olarak üretildiği ve homojen olduğu tespit edilmiştir. DSC analiz sonuçlarında, sadece alüminyumun ergime sıcaklığını temsil eden  $660$  °C'de endotermik pik gözlenmiştir. Alaşımların çekme mukavemeti ve mikrosertlik sonuçlarında,  $Al_{85}Mg_{10}Ti_4B_1$  alaşımı için en yüksek çekme mukavemeti  $199.96$  MPa ve  $Al_{82}Mg_{10}Ti_4B_4$  alaşımı için en yüksek sertlik değeri  $207.4$  HV olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada, AlMgTiB alaşımlarındaki bor oranının artması sertlik değerlerinin artmasına fakat çekme mukavemetinin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir.

## Investigation of Structural, Thermal and Mechanical Properties of AlMgTiB Alloy

### **Highlights:**

- Light alloy
- XRD
- Microhardness

### **Keywords:**

- AlMgTiB
- Aluminum alloy
- Bor on
- Mekanik properties

### **ABSTRACT:**

In this study,  $Al_{86-x}Mg_{10}Ti_4B_x$  ( $x=1, 2, 3$  and  $4$ ) alloys were produced by casting, and their microstructure, thermal and mechanical properties were investigated extensively. The microstructural properties of the alloys were characterized by X-ray diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), and Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDX). Composition ratios were studied using an X-ray fluorescence Spectrometer (XRF). The thermal behaviors were evaluated by differential scanning calorimetry (DSC) analysis. Mechanical properties were investigated by Vickers microhardness (HV) measurement and tensile test. In the XRD analysis of the alloys, phases such as  $\alpha$ -Al,  $\beta$ - $Al_3Mg_2$ ,  $Al_3Ti$  and  $AlB_2$  were detected. SEM images showed that the microstructure of the alloys mainly consisted of rod-like and dendritic structures. It has been determined that the alloys are produced by their nominal composition and are homogeneous. In the DSC analysis results, an endothermic peak was observed at  $660$  °C, representing aluminum's melting temperature only. In the tensile strength and microhardness results of the alloys, the highest tensile strength was determined as  $199.96$  MPa for the  $Al_{85}Mg_{10}Ti_4B_1$  alloy and  $207.4$  HV for the  $Al_{82}Mg_{10}Ti_4B_4$  alloy. This study determined that the increase in the boron ratio in AlMgTiB alloys caused an increase in hardness values but a decrease in tensile strength.

<sup>1</sup>Hakan YAYKAŞLI (Orcid ID: 0000-0001-5729-9662), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

<sup>2</sup>Musa GÖĞEBAKAN (Orcid ID: 0000-0001-5104-2874), Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Hakan YAYKAŞLI, e-mail: hakan.yaykasli@istiklal.edu.tr

Bu çalışma Hakan YAYKAŞLI'nın doktora tezinden üretilmiştir.

## GİRİŞ

Alüminyum (Al) ve alaşımları, demir dışı metallerden sonra en sık kullanılan metaller arasında olduğundan dolayı endüstride önemli bir rol oynamaktadır (Troeger ve Starke, 2020). Bu alaşımların hafif, yüksek korozyon direnci, mükemmel işlenebilirliği, yüksek mukavemet/yoğunluk oranı, geri dönüştürülebilirliği ve nispeten düşük fiyatları gibi nedenlerden dolayı otomotiv, denizcilik, enerji dağıtım, havacılık ve inşaat sektörü gibi alanlarda kullanımları oldukça yaygındır (Prasad ve Wanhill, 2017). Endüstriyel uygulamalarda bu malzemelere olan ihtiyacın artması, Al alaşımları üzerinde kapsamlı araştırmalar yapılması gereksinimi ortaya çıkarmıştır (Cai ve ark., 2013; Prach ve ark., 2019; Damavandi ve ark., 2021). Alaşımların mekanik ve ısısal özelliklerinin iyileştirilmesinde, 20. yüzyılın başında keşfedilen, alaşıma element ekleme yöntemi, bilim insanlarının dikkatini çekmiş ve bu konuda birçok çalışma yapılmıştır (Gögebakan ve Uzun, 2004; Gögebakan ve Avar, 2010). Yapılan çalışmalarda malzemelere eklenen alaşımlama elementlerinin tane boyutunun küçültülmesinde etkili olduğu ve bunun da mukavemet, sertlik ve ısısal özelliklerde iyileştirmeler sağladığı bilinmektedir. Bu nedenle, son yıllarda tane boyutu büyük olan alaşımlara kıyasla ince taneli mikro yapıya sahip alaşımların üretilmesi, mekanik ve işlevsel özelliklerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapılmaya devam etmektedir (Ji ve ark., 2022; Koç ve ark., 2022). Al alaşımlarında tane inceltme çalışmalarının, başlıca amacı iri taneli mikro yapının ince taneli bir yapıya dönüştürülmesidir (Jia ve ark., 2020). Geçmişten günümüze araştırmacılar, alaşımların özgül mukavemetlerinin iyileştirilmesi amacı ile Al-Mg ikili alaşımına farklı oranlarda elementler ekleyerek çalışmalar yapmıştır. Al-Mg alaşımına Si, Zn veya Ti gibi elementlerin eklenmesi ile alaşımlarda kararlı intermetalik fazların oluşması, alaşımların ısısal özelliklerini iyileştirdiği rapor edilmektedir (Qiu ve ark., 2007).

Al-Ti-B ve Al-Mg-Ti-C alaşımlarında Ti ve B tane inceltici olarak kullanılmış ve alaşıma eklenen Ti ve B elementlerinin miktarı ve uygulanan ısıl işlemin mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır (An ve ark., 2016). Döküm yöntemi ile elde edilen Al-Ti-B alaşımında  $Al_3Ti$  ve  $AlB_2$  gibi intermetalik fazlarının oluşumu mikro yapıda tane inceltici etki oluşturarak alaşımların mekanik özelliklerinde iyileştirmeler olduğu belirtilmiştir (Murty ve ark., 2002; Fan ve ark., 2015). Benzer şekilde alaşımların mikro yapısında bulunan  $Al_3Ti$ ,  $Al_3Ni$  gibi intermetalik fazlarının boyutu, malzeme içerisindeki dağılım oranı gibi faktörler Al-esaslı alaşımların aşınmaya karşı yüksek direnç, yüksek sertlik ve spesifik modül ve yüksek sıcaklıklarda iyi kararlılık gibi özelliklerinin iyileşmesinde önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Diğer taraftan, son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda Al-Mg alaşımına yüksek miktarda Zr, Ti ve V gibi elementlerin eklenmesi alaşımların mukavemet özelliklerini olumlu yönde etkilediği rapor edilmiştir (Easton ve StJohn, 2000). Al-Zn-Mg-Cu alaşımları, yüksek özgül mukavemet, yüksek sertlik, yüksek tokluk ve sıcak işlenebilirlikleri gibi önemli avantajları nedeniyle havacılık alanında tercih edilmektedir (Li ve ark., 2016). Li ve ark. (Li ve ark., 2014) eser miktarda Sc ve Zr içeren Al-Zn-Mg-Mn alaşımının, mikro yapısal özelliklerini araştırmış ve Sc ve Zr ilavesinin alaşımların mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda Al esaslı alaşımların hafif olmaları nedeniyle, Al-Si, Al-Mg ve Al-Ti-B gibi alaşımlara farklı elementlerin eklenmesi alaşımların mikro yapısal ve mekanik özelliklerine etkileri yoğun bir şekilde araştırılmıştır (Xu ve ark., 2015; Huang ve ark., 2022). Al-Mg ikili alaşımlarına üçüncü ve dördüncü elementlerin eklenmesi ile mekanik ve termal özellikleri iyileştirebilmekte ve kullanım alanlarının genişlemesi sağlanmaktadır. Ancak eklenmesi planlanan elementin yoğunluğunun düşük olması dikkate alınmalıdır. Literatürde Al-Mg, Al-Ti gibi Al-esaslı alaşımlar fazla çalışılmasına rağmen  $Al_{86-x}Mg_{10}Ti_4B_x$  ( $x=1, 2, 3$  ve  $4$ ) kompozisyonuna sahip benzeri çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu çalışmanın amacı; Al ( $2.70 \text{ g/cm}^3$ ), Mg ( $1.74 \text{ g/cm}^3$ ), Ti ( $4.51 \text{ g/cm}^3$ ) B ( $2.47 \text{ g/cm}^3$ ) gibi yoğunluğu düşük

elementlerle  $Al_{86-x}Mg_{10}Ti_4B_x$  ( $x=1, 2, 3$  ve  $4$ ) alaşımını üretmek ve bor elementinin alaşımın mikro yapısına, mekanik ve ısısal özelliklerine etkisini araştırmaktır. Bunun için alaşım içerisindeki Al'nin oranı sistematik olarak azaltılarak B'nin oranı %1 den %4 de kadar artırılmıştır. Alaşım içerisindeki Mg ve Ti elementlerinin oranları ise Al-Mg ve Al-Ti ikili faz diyagramları ve Mg ve Ti elementlerinin Al içerisinde çözünme miktarları dikkate alarak belirlenmiştir ve tüm alaşımlar için sabit tutulmuştur.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada,  $Al_{85}Mg_{10}Ti_4B_1$ ,  $Al_{84}Mg_{10}Ti_4B_2$ ,  $Al_{83}Mg_{10}Ti_4B_3$  ve  $Al_{82}Mg_{10}Ti_4B_4$  alaşımları normal katılaştırma (döküm) tekniği ile üretilmiştir. Bu alaşımlar içerdikleri bor oranı dikkate alınarak sırasıyla B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> olarak isimlendirilmiştir. Alaşımları üretmek için MTI-SP-15A masaüstü taşınabilir yüksek frekanslı indüksiyon ısıtıcı kullanılmıştır. Alüminyum (Al), magnezyum (Mg), titanyum (Ti) ve bor (B) elementleri yüksek saflıkta (%99) Merck ve Alfa Aesar firmalardan satın alınmıştır. Alaşım elementleri, belirlenen atomik konsantrasyon oranlarında hassas terazide tartımları yapılarak etanol ile su banyosunda 15 dakika temizlenmiştir. AlMgTiB alaşımını oluşturan elementlerin ergime sıcaklıkları birbirlerinde farklı olduğu için ergitme prosesinde ilk olarak Al metali, grafit pota içerisine yerleştirilerek sıvı eriyik duruma getirilmiştir. Daha sonra eriyik Al içerisine Ti ve B elementleri ilave edilerek ergitme işlemi yapılmıştır. Grafit pota içerisindeki eriyik alaşımının sıcaklığı CEM DT 8869H çift lazerli uzaktan sıcaklık ölçer ile takip edilmiştir. Son olarak Al, Ti ve B üçlü elementinin oluşturduğu sıvı eriyiğin içerisine alaşımın sıcaklığı 750 °C' ye düşürülerek Mg elementi ilavesi yapılarak alaşım ergitme işlemi tamamlanmıştır. Al, Mg, Ti ve B elementlerinin ergimesi sırasında oksitlenmeyi önlemek amacı ile grafit pota içerisine yüksek saflıkta argon gazı verilmiştir. Sıvı eriyik alaşımın katılaşması için oda sıcaklığındaki metal kalıp (pik döküm) içerisine dökümü yapılmıştır. Eriyik alaşım oda sıcaklığında soğutularak katılaşmaya bırakılmıştır.

Alaşımların yapısal, ısısal ve mekanik özelliklerinin incelenmesi için metalografik hazırlıklar yapılmıştır. Alaşımlar, struers minitom marka hassas kesme cihazı ile kesilerek numuneler incelenebilir boyutlara getirilmiştir. Daha sonra alaşımlar soğuk kalıplama ile bakalite alınarak, kaba 180 mikron, ince 1200 mikron zımparalama işlemlerinden sonra 1 ve 2 mikronluk parlatma çuhaları ile yüzeyleri parlatılmıştır. Alaşımların mikroyapı analizleri, Panalytical Philips X'Pert PRO marka X-ışını difraksiyonu (XRD) cihazı kullanılarak yapılmıştır. XRD analizleri monokromotik  $CuK_{\alpha}$  radyasyonu ( $\lambda=0.154056nm$ ), 40 kV ve 30 mA şartlarında,  $2\theta$  ( $20^{\circ}$  ile  $100^{\circ}$  arasında)  $0.02^{\circ}$  adım aralığında ve her adımda 1 saniye bekletilerek ölçümler alınmıştır. Alaşımların morfolojik özellikleri ZEISS EVO LS10 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) cihazı kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca SEM cihazında bulunan Bruker Marka EDX dedektörü ve Bruker S8 Tiger marka X-ışını Floresan Spektrometresi (XRF) kullanılarak alaşımların elementel kompozisyonu belirlenmiştir. Alaşımların ısısal özellikleri Perkin-Elmer Sapphire marka, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) cihazı kullanılarak yapılmıştır. DSC analizi  $10^{\circ}C\ min^{-1}$  ısıtma hızında,  $300^{\circ}C$  ile  $700^{\circ}C$  sıcaklık aralığında yapılmıştır. Alaşımların mekanik özellikleri Vickers mikrosertlik testi ve çekme testi yapılarak incelenmiştir. Vickers mikrosertlik testleri Shimadzu HMV-2 model mikrosertlik cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler 98.07 mN (Hv0.01) yük altında ve 10 s bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Vickers mikrosertlik değerleri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmıştır.

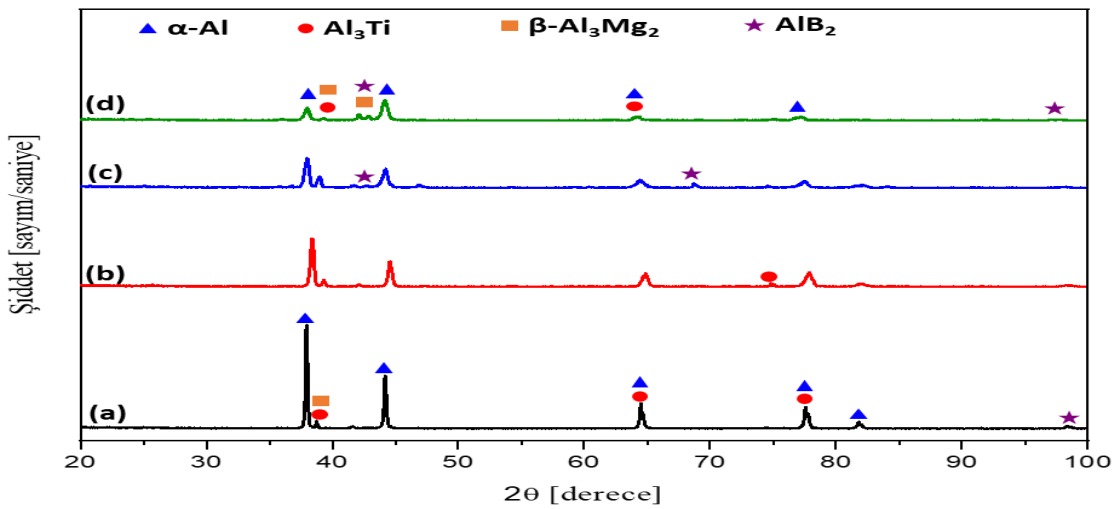
$$HV = \frac{1,854(P)}{d^2}$$

Burada; P uygulanan yük, d uygulanan yükün oluşturduğu izlerin köşegen uzunluklarının ortalaması,  $\theta$  elmas ucun zıt yüzeyler arasındaki açı olup,  $136^{\circ}$ 'dir. Her bir numunenin 10 farklı bölgesinden alınan mikrosertlik değerlerinin ortalaması alınmıştır. Alaşımların çekme testi Zwick

Roell Z100 marka tek eksenli mekanik test cihazında yapılmıştır. Çekme testi için numuneler ASTM B557 M-10 standartlarına uygun boyutlara getirilmiş ve testler 1 mm dak<sup>-1</sup> hızında yapılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

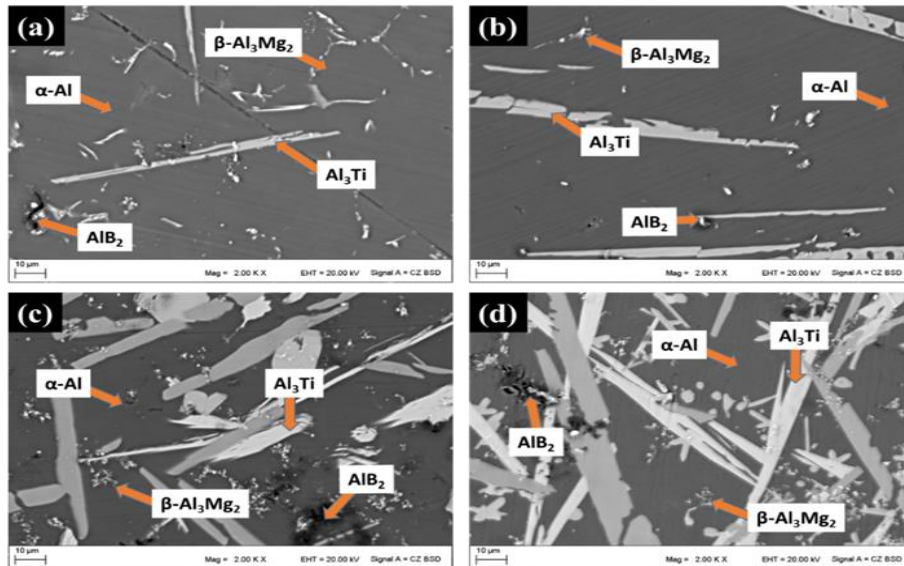
B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> alaşımlarının XRD grafiği Şekil 1'de görülmektedir. Tüm alaşımların XRD grafiğinde;  $\alpha$ -Al,  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> gibi fazları gözlenmiştir. B<sub>1</sub> alaşımında  $\alpha$ -Al fazından yansıyan piklerin şiddeti oldukça yüksek iken, alaşımdaki B oranının artması ile bu fazdan yansıyan piklerin şiddetlerinde azalma olmuştur. Ayrıca, Şekil 1'de görüldüğü gibi AlB<sub>2</sub> fazından yansıyan piklerin şiddeti de oldukça düşüktür. Mg, Ti ve B içeren Al-esaslı çalışmalarda da benzer fazlar gözlenmiştir (Chen ve ark., 2018; Long ve ark., 2018). Alaşımların XRD analizinde gözlenen;  $\alpha$ -Al,  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> fazları, Al-Mg, Al-Ti ve Al-B ikili faz diyagramları ile uyumludur (Okamoto, 2010). Diğer taraftan, alaşım içerisindeki B oranının %1'den %4'e çıkması faz varlığını etkilememiştir. Bunun nedeni B'nin Al içerisindeki çözünme miktarının %1'den daha az olmasıdır. Mg, Ti ve B elementleri Al içerisinde sınırlı miktarda çözünebilmektedir. Hızlı katılaştırma (rapid solidification) ve mekanik alaşımlama (mechanical alloying) gibi bazı alaşım üretme teknikleri ile bu miktar artırılabilir. Mg'nin Al içerisindeki çözünme miktarı Ti ve B'den oldukça yüksektir. Ötektik sıcaklıkta Mg, Al içerisinde %18'den fazla çözülebilirken, bu miktar oda sıcaklığında %1.2 değerine düşmektedir (Okamoto, 2010). B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> alaşımlarının XRD grafiğinde gözlenen  $\alpha$ -Al fazı, saf Al fazından farklı olup belli miktarlarda Mg, Ti ve B içermektedir. Literatürde bu faz aşırı doymuş katı çözeltili fazı olarak adlandırılmaktadır ve  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B) şeklinde ifade edilmektedir. Dolayısıyla, alaşımı oluşturan Mg, Ti ve B elementlerinin belirli miktarı Al içerisinde çözülerek  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B) fazını oluşturmuş, bu elementlerin geri kalan kısmı ise Al ile reaksiyona girerek  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> gibi intermetalik fazlarını oluşturmaktadır. Al-Mg faz diyagramından  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> fazının peritektik reaksiyon sonucu oluştuğu anlaşılmaktadır (Wang ve ark., 2013). Bir malzemenin mikro yapısında bulunan intermetalik fazların boyutu, miktarı, malzeme içerisindeki dağılımı gibi etkenler malzemenin başta mekanik özellikleri olmak üzere bazı özelliklerini etkilemektedir (Hu ve ark., 2013). Bazı durumlarda intermetalik fazlar malzemenin sertlik değerini artırırken, malzemeyi kırılgan hale getirmektedir. Bu nedenle malzeme içerisindeki intermetalik fazların analizi önemlidir.



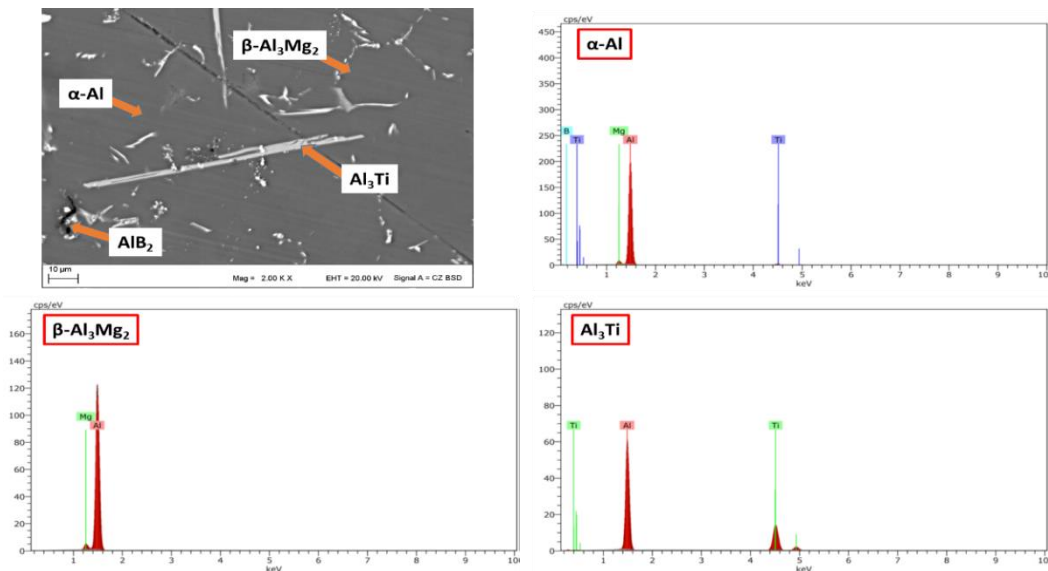
Şekil 1. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının XRD grafiği

B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> alaşımlarının mikro yapıları SEM ile incelenmiştir. Alaşımların SEM görüntüleri Şekil 2'de verilmiştir. Tüm SEM görüntüleri 2000x kat yüksek büyütme ile alınmıştır. Alaşımların SEM fotoğraflarında belirgin olarak dört farklı mikro yapı gözlenmektedir. Bunlar; siyah

renkli ana matris, beyaz/gri renkli çubuksu yapı, kısmi dentritik yapı ve farklı şekillerde olan siyah yapılardır. SEM fotoğrafında belirgin olarak gözlenen beyaz/gri renkli çubuksu yapıların alaşımın oda sıcaklığında katılaşmasından dolayı düzlemsel büyüme nedeniyle oluştuğu tahmin edilmektedir. Literatürde Al-esaslı alaşımların mikro yapısında benzer çubuksu yapılar gözlenmiştir (Tian ve ark., 2018). Alaşımların SEM fotoğraflarında belirgin olarak gözlenen mikro yapıların hangi fazlara karşılık geldiği EDX ile kimyasal içerikleri incelenerek belirlenmiştir. Alaşımların EDX sonuçları Şekil 3’de verilmiştir. EDX analizi ile SEM fotoğrafında siyah renkli olarak gözlenen ve ana matrisi oluşturan bölgenin  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B) fazını, beyaz/gri çubuksu yapıların  $\text{Al}_3\text{Ti}$  fazını, dentritik yapıların  $\beta$ - $\text{Al}_3\text{Mg}_2$  fazını, az miktarda ve farklı şekillerde bulunan siyah yapıların ise  $\text{AlB}_2$  fazını temsil ettiği tespit edilmiştir. Benzer mikro yapılar daha önceki çalışmalarda da gözlenmiştir (Wang ve ark., 2016). Diğer taraftan, AlMgTiB alaşımındaki Al oranının azalıp B oranının artması ile  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B) fazı oranında azalma olduğu ve buna karşın  $\beta$ - $\text{Al}_3\text{Mg}_2$ ,  $\text{Al}_3\text{Ti}$  ve  $\text{AlB}_2$  fazlarında artış olduğu ve beyaz/gri çubuksu yapıların boyutlarında büyümeler gözlenmiştir. Bu durum  $B_3$  ve  $B_4$  alaşımlarında daha belirgin olarak görülmektedir (Şekil 2. (c) ve (d)). Aynı zamanda bu alaşımların Şekil 1’deki XRD grafiğinde B oranının artması ile  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B) fazına ait pik şiddetinin azalması ile uyum içerisindedir.

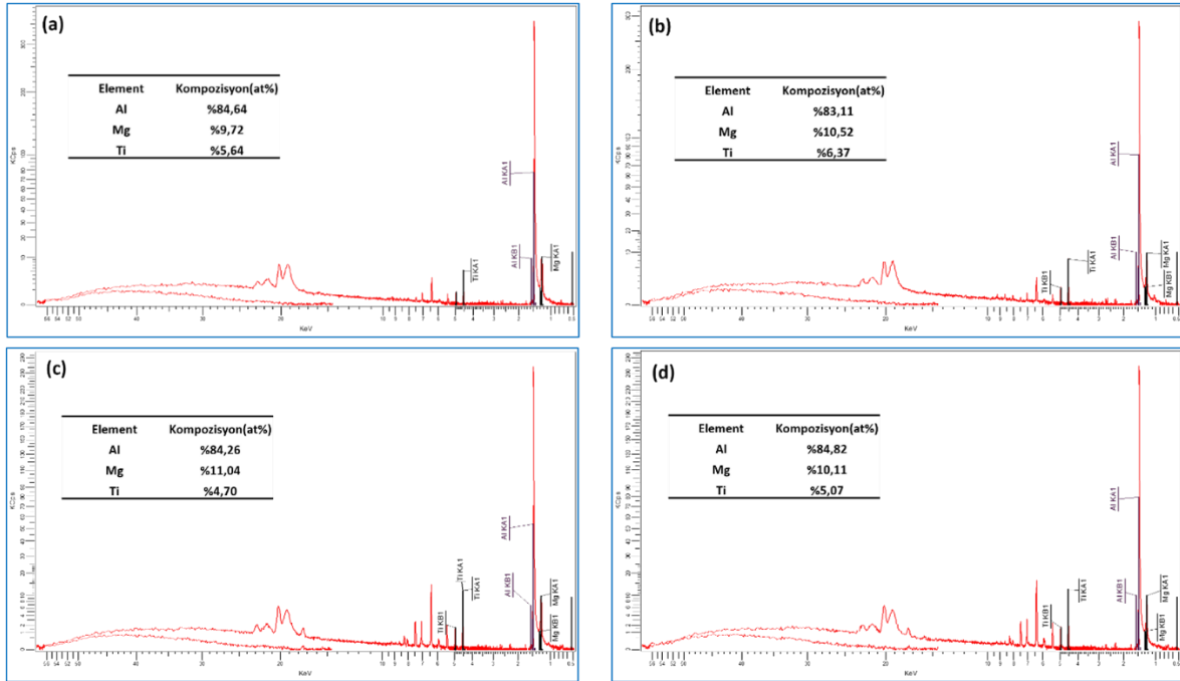


Şekil 2. (a)  $B_1$ , (b)  $B_2$ , (c)  $B_3$  ve (d)  $B_4$  alaşımlarının SEM görüntüleri



Şekil 3.  $B_1$  alaşımının EDX analizi

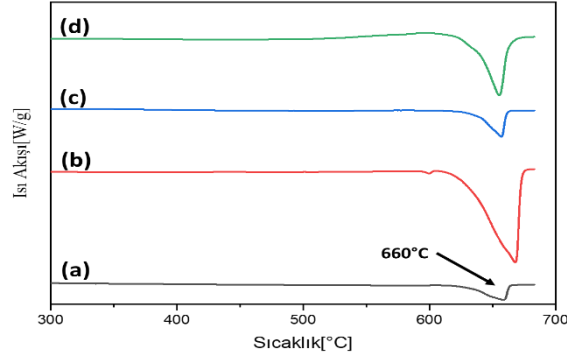
B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> olarak isimlendirilen Al<sub>85</sub>Mg<sub>10</sub>Ti<sub>4</sub>B<sub>1</sub>, Al<sub>84</sub>Mg<sub>10</sub>Ti<sub>4</sub>B<sub>2</sub>, Al<sub>83</sub>Mg<sub>10</sub>Ti<sub>4</sub>B<sub>3</sub> ve Al<sub>82</sub>Mg<sub>10</sub>Ti<sub>4</sub> alaşımlarını oluşturan elementlerin Al (660.5 °C), Mg (650 °C), Ti (1668 °C) ve B' un (2200 °C) ergime sıcaklıkları arasındaki farktan dolayı alaşımları üretimi sırasında ergime ve katılaşma sırasında kimyasal kompozisyonlarda değişimler olabilmektedir. Dolayısıyla, nominal olarak belirlenen kimyasal kompozisyonunun, üretim sonrası kimyasal kompozisyonundaki değişimin belirlenmesi gerekmektedir. Bundan dolayı, alaşımı oluşturan elementlerin nitel ve nicel yüzdelik miktarının belirlenmesi için X-ışını Floresan Spektrometresi (XRF) analizi yapılmıştır. Şekil 4'de bu alaşımların XRF sonuçları ile alaşımı oluşturan elementlerin alaşım içerisindeki yüzdelik oranları Şekil 4'de, grafikler içerisinde tablolar halinde verilmiştir. Şekil 4' de görüldüğü gibi XRF sonuçlarında tüm alaşımlar için Al, Mg ve Ti elementlerinin yüzdelik oranları tespit edilmiştir, ancak bor oranı tespit edilememiştir. Bor oranının tespit edilememesi, XRF cihazının yarı kantitatif çalışma prensibinden kaynaklanmaktadır. XRF analiz sonuçları, alaşımın hazırlanan kompozisyonu ile ölçülen kompozisyonlarının uyumlu olduğunu göstermiştir.



Şekil 4. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının XRF sonuçları

B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> alaşımlarının ısısal özellikleri, diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) analizi ile incelenmiştir. Alaşımların DSC analizi 300 °C ile 700 °C arasında, 10 °C dak<sup>-1</sup> ısıtma hızında yapılmıştır. Alaşımların DSC sonuçları Şekil 5'de verilmiştir. Mevcut çalışmada incelenen tüm alaşımların DSC sonuçlarında 660°C civarında bir endotermik pik gözlenmiştir. 660 °C civarında gözlenen bu endotermik pik α-Al (Mg, Ti, B) fazının ergime sıcaklığına (660.5 °C) karşılık gelmektedir. Bu alaşımların mikro yapısında gözlenen β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> fazlarının ergimesini temsil eden herhangi bir endotermik pik gözlenmemiştir. Benzer sonuçlar literatürde rapor edilmiştir (Binesh ve Aghaie-Khafri, 2016; Deng ve ark., 2020). Bunun sebebi, Al<sub>3</sub>Ti fazının 1300 °C ve AlB<sub>2</sub> fazının erime sıcaklığının 1600 °C'de gibi yüksek değerlerde olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> fazının erime sıcaklığı 450 °C olmasına rağmen bu fazı ergimesine karşılık gelen herhangi bir endotermik pik gözlenmemiştir. Bunun nedeni β-Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub> fazının oranının düşük olması olarak tahmin edilmektedir.

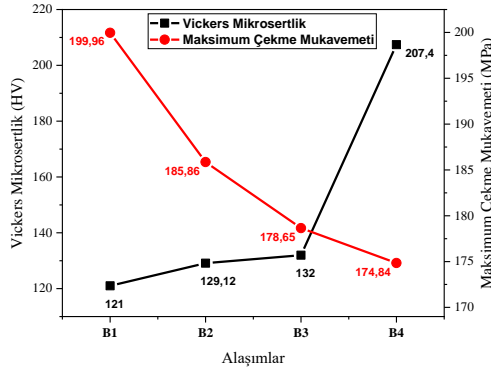
Bir malzemenin mekanik özelliklerinin iyi olması kadar hafif olması da önemlidir. Malzemelerin mekanik özellikleri, sertlik testi ve çekme testi gibi testlerle belirlenebilmektedir.



Şekil 5. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının DSC grafikleri

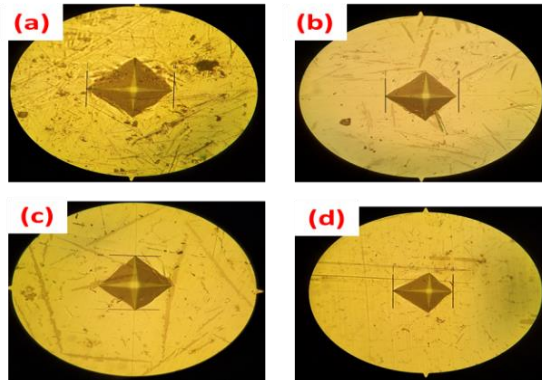
Bu çalışmada B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub> ve B<sub>4</sub> alaşımlarına oda sıcaklığında Vickers mikrosertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testi, ASTM B557 M-10 standartlarına uygun numune boyutlarında ve 1 mm dak<sup>-1</sup> çekme hızında yapılmıştır. Alaşımların Vickers mikrosertlik değerleri ile maksimum çekme mukavemet değerleri Şekil 6'da verilmiştir. Alaşımların mikrosertlik değerlerinin bor oranının artması ile arttığı görülmektedir. Bor oranı %1 iken mikrosertlik değeri 121 HV, bor oranı %4 olduğunda mikrosertlik değeri 207.4 HV olarak ölçülmüştür. Bor oranının %3'den %4'e çıkması ile sertlik değerindeki artış daha yüksek oranda olmuştur. Bunun nedeni alüminyum esaslı alaşımlarda bor elementinin tane inceltici özellik göstererek mikro yapıda tanelerin boyutlarında küçülme etkisi oluşturmasıdır. Bor oranının artmasıyla, kristal boyutta gerilme enerjisi yükselerek, alaşımların mikro sertlik değerini artırmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmada, AlMgTiB alaşımındaki B miktarının artması alaşımların sertlik değerini artırdığı belirlenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda saf Al'nin sertlik değerinin 40 HV civarında olduğu rapor edilmiştir (Hosseini ve ark., 2015). Dolayısıyla bu çalışmada incelenen alaşımların sertlik değerleri saf Al'nin sertlik değerinden oldukça yüksektir. Alaşımların mekanik özelliklerine etki eden en önemli faktörlerden biri alaşımların yapısal özellikleri ve mikro yapıdaki fazlardır. Al, Mg, Ti ve B elementlerinin ilavesi alaşımda  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> gibi intermetalik fazların oluşmasına neden olmuş ve bu durum alaşımların katı çözelti sertleşmesini artırmıştır. Şekil 2'deki SEM fotoğraflarında görüldüğü gibi AlMgTiB alaşımındaki B oranının artması,  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> gibi intermetalik bileşiklerin oranında artışa neden olmuştur. Dolayısıyla alaşımların mikro yapısındaki intermetalik fazların oranındaki artış, alaşımların mikro sertlik değerinin artmasına neden olmuştur. Diğer taraftan Şekil 6'da görüldüğü gibi alaşımdaki B oranının artması çekme mukavemetinde düşüşe neden olmuştur. B<sub>1</sub> alaşımlarının maksimum mukavemet değerleri 199.6 MPa iken bu değer B<sub>4</sub> alaşımı için 174.84 MPa olarak ölçülmüştür. Bunun nedeni alaşımdaki B oranının artması ile mikro yapıdaki  $\beta$ -Al<sub>3</sub>Mg<sub>2</sub>, Al<sub>3</sub>Ti ve AlB<sub>2</sub> intermetalik bileşiklerinin oranındaki artıştır. Alaşımların mikro yapısında bulunan intermetalik fazlar, alaşımların çekme mukavemetlerini zayıflattığı daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Abdelhakim ve Shalaby, 2021). Diğer taraftan literatürde, Al'nin maksimum çekme mukavemeti 64.2 MPa olarak rapor edilmiştir (Rangel-Ortiz ve ark., 2005). Bu çalışmada üretilen alaşımlar, Al ile karşılaştırıldığında mukavemet değerleri yaklaşık üç kat arttığı gözlenmiştir. Bir malzemenin mikro yapısındaki intermetalik fazlar, o malzemenin sertliğini artırırken malzemeyi kırılgan ve gevrek olmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada incelenen alaşımlarda bor oranının artması intermetalik fazların oranlarında artışa neden olmuş ve bu artış alaşımların kırılganlığını artırarak çekme mukavemetlerinin zayıflamasına yol açmıştır.



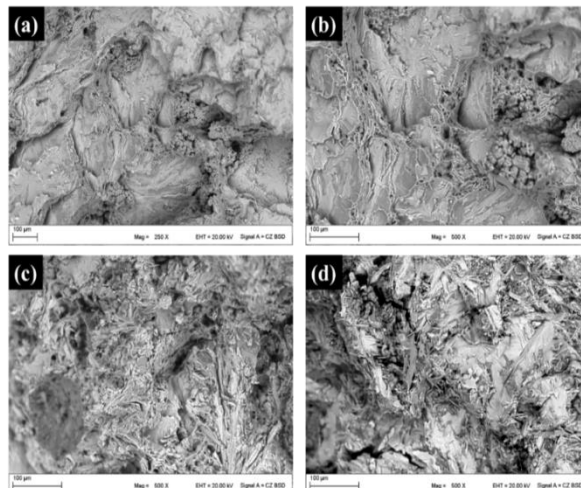
Şekil 6. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının vickers mikrosertlik ve çekme testleri sonuçları

Alaşımın mikrosertlik değerleri ölçülürken numuneye uygulanan kuvvet numune üzerinde iz oluşturmaktadır. Bu izin büyüklüğü ile mikrosertlik değeri ters orantılıdır. Alaşımların mikro sertlik değerlerinin hesaplanmasında bu izlerin köşegen uzunlukları kullanılmaktadır. Şekil 7’de alaşımların, Vickers testinde oluşan izleri incelendiğinde, Şekil 6’daki mikrosertlik sonuçları ile uyumlu olduğu görülmektedir. Mikrosertlik değeri en düşük olan B<sub>1</sub> alaşımına karşılık gelen piramit izinin en büyük olduğu ve mikrosertlik değeri en yüksek olan B<sub>4</sub> alaşımına karşılık gelen piramit izinin en küçük olduğu görülmektedir.



Şekil 7. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının Vickers mikrosertlik test sonucu yüzeyde oluşan izlerin görüntüsü

Çekme testi sonrası numunelerin kopma bölgelerinin SEM görüntüleri alınmıştır. Kopma bölgelerinin SEM görüntüleri Şekil 8’de verilmiştir. Kopma yüzeyinin SEM görüntülerinde çukursu ve çubuksu yapılar gözlenmiştir. Kopma yüzeylerinin görüntülerinden alaşımın uzama oranının düşük ve gevrek (kırılgan) bir yapıda olduğu anlaşılmaktadır (Huang ve ark., 2020).



Şekil 8. (a) B<sub>1</sub>, (b) B<sub>2</sub>, (c) B<sub>3</sub> ve (d) B<sub>4</sub> alaşımlarının çekme testi sonrası kopma bölgelerinin SEM görüntüleri



## SONUÇ

Bu çalışmada,  $Al_{86-x}Mg_{10}Ti_4B_x$  ( $x=1, 2, 3$  ve  $4$ ) alaşımları döküm yöntemiyle başarılı bir şekilde üretilmiştir. Alaşımların mikroyapı, mekanik ve termal özellikleri sırasıyla XRD, XRF, SEM, EDX, Vickers mikrosertlik, çekme testi ve DSC analizi ile incelenmiştir. XRD analizlerinde alaşımların mikroyapısında;  $\alpha$ -Al (Mg, Ti, B),  $\beta$ - $Al_3Mg_2$ ,  $Al_3Ti$  ve  $AlB_2$  fazları tespit edilmiştir. Alaşımların morfolojik yapısının belirgin olarak, çubuksu yapılar, kısmi dentritik mikroyapılardan oluştuğu gözlenmiştir. XRF analizi, alaşımın üretimi sırasında kompozisyonunda önemli bir değişikliğin olmadığını doğrulamıştır. Alaşımlar DSC analizinde sadece alüminyumun ergime sıcaklığını temsil eden bir endotermik pik gözlenmiştir. Alaşımdaki bor oranının artması sertlik değerlerini arttırırken çekme mukavemetini azalttığı tespit edilmiştir. En yüksek çekme mukavemeti  $Al_{85}Mg_{10}Ti_4B_1$  alaşımı için 199.96 MPa ve en yüksek sertlik değeri  $Al_{82}Mg_{10}Ti_4B_4$  alaşımı için 207.4 HV olarak belirlenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından (Proje No: 2017/2-42 D) desteklenmiştir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## Yazar Katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan eder.

## KAYNAKLAR

- Abdelhakim, N. A. ve Shalaby, R. M. (2021). Microstructures and Mechanical Properties of Al-Zn-Sn Bearing Alloys for High Performance Applications. *World Journal of Engineering and Technology*, 9(3), 637-652.
- An, X. G., Liu, Y., Ye, J. W., Wang, L. Z., Wang, P. Y. (2016). Grain refining efficiency of SHS Al-Ti-B-C master alloy for pure aluminum and its effect on mechanical properties. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 29(8), 742-747.
- Binesh, B. ve Aghaie-Khafri. M. (2016). Phase evolution and mechanical behavior of the semi-solid SIMA processed 7075 aluminum alloy. *Metals*, 6(3), 42.
- Cai, Y., Wang, C., Zhang, J. (2013). Microstructural characteristics and aging response of Zn-containing Al-Mg-Si-Cu alloy. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 20(7), 659-664.
- Chen, B., Wang, Y., Xiao, C., Zhang, M, Ni, G., Li, D. (2018). The formation mechanism of intermetallic compounds in Al/Mg friction-stir weld joint. *Materials Science and Technology*, 34(6), 703-711.
- Damavandi, E., Nourouzi, S., Rabiee, S. M., Jamaati, R., Szpunar, J. A. (2021). EBSD study of the microstructure and texture evolution in an Al-Si-Cu alloy processed by route A ECAP. *Journal of Alloys and Compounds*, 858, 157651.
- Deng, J., Shen, J., Li, H., Chen, H., Xie, F. (2020). Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Sc-contained Al-7075 alloys after solution-aging treatment. *Materials Research Express*, 7(9), 96512.
- Easton, M. A. ve StJohn, D. H. (2000). Partitioning of titanium during solidification of aluminium alloys. *Materials Science and Technology*, 16(9), 993-1000.
- Fan, Z., Wang, Y., Zhang, Y., Qin, T., Zhou, X. R., Thompson, G. E., Pennycook, T., Hashimoto, T. (2015). Grain refining mechanism in the Al/Al-Ti-B system. *Acta Materialia*, 84, 292-304.
- Gogebakan, M. ve Avar, B. (2010). Quasicrystalline phase formation during heat treatment in mechanically alloyed  $Al_{65}Cu_{20}Fe_{15}$  alloy. *Materials Science and Technology*, 26(8), 920-924.

- Gögebakan, M. ve Uzun, O. (2004). Thermal stability and mechanical properties of Al-based amorphous alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 153: 829-832.
- Hosseini, S. H., Abrinia, K., Faraji, G. (2015). Applicability of a modified backward extrusion process on commercially pure aluminum. *Materials & Design*, 65, 521-528.
- Hu, Z., Wan, L., Wu, S., Wu, H., Liu, X. (2013). Microstructure and mechanical properties of high strength die-casting Al–Mg–Si–Mn alloy. *Materials & Design*, 46, 451-456.
- Huang, B., Liu, Y., Zhou, Z., Cheng, W., Liu, X. (2022). Selective laser melting of 7075 aluminum alloy inoculated by Al–Ti–B: Grain refinement and superior mechanical properties. *Vacuum*, 200, 111030.
- Huang, J., Feng, L., Li, C., Huang, C., Li, J., Friedrich, B. (2020). Mechanism of Sc poisoning of Al-5Ti-1B grain refiner. *Scripta Materialia*, 180, 88-92.
- Ji, C., Ma, A., Jiang, J. (2022). Mechanical properties and corrosion behavior of novel Al-Mg-Zn-Cu-Si lightweight high entropy alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 900, 163508.
- Jia, Y., Wang, S., Shu, D. (2020). Grain size prediction and investigation of 7055 aluminum alloy inoculated by Al–5Ti–1B master alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 821, 153504.
- Koç, E., Incesu, A., Saud, A. N. (2022). Comparative Study on Dry and Bio-Corrosive Wear Behavior of Mg-xAl-3Zn Alloys (x= 0.5-1-2-3 wt. %). *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(1), 613-621.
- Li, B., Pan, Q., Huang, X., Yin, Z. (2014). Microstructures and properties of Al–Zn–Mg–Mn alloy with trace amounts of Sc and Zr. *Materials Science and Engineering: A*, 616, 219-228.
- Li, X., Cai, Q., Zhao, B., Xiao, Y., Li, B. (2016). Effect of nano TiN/Ti refiner addition content on the microstructure and properties of as-cast Al-Zn-Mg-Cu alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 675, 201-210.
- Long, L., Liu, W., Ma, Y., Wu, L., Liu, C. (2018). A Novel Process for Joining Ti Alloy and Al Alloy using Two-Stage Sintering Powder Metallurgy. *High Temperature Materials and Processes*, 37(5), 437-444.
- Murty, B.S., Kori, S.A., Chakraborty, M. (2002). Grain refinement of aluminium and its alloys by heterogeneous nucleation and alloying. *International Materials Reviews*, 47(1), 3-29.
- Okamoto, H. (2000). Phase diagrams for binary alloys. *ASM International Materials Park, Ohio* (Vol. 44).
- Prach, O., Trudonoshyn, O., Randelzhofer, P., Körner, C., Durst, K. (2019). Effect of Zr, Cr and Sc on the Al–Mg–Si–Mn high-pressure die casting alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 759, 603-612.
- Prasad, N.E., Wanhill, R.J.H. (2017). *Aerospace materials and material technologies* (Vol. 3). Springer.
- Qiu, D., Taylor, J. A., Zhang, M. X., Kelly, P. M. (2007). A mechanism for the poisoning effect of silicon on the grain refinement of Al–Si alloys. *Acta Materialia*, 55(4), 1447-1456.
- Rangel-Ortiz, T., Alcalá, F. C., Hirata, V. M. L., Frias-Flores, J., Araujo-Osorio, J. E., Dorantes-Rosales, H. J., Saucedo-Muñoz, M. L. (2005). Microstructure and tensile properties of a continuous-cast Al–Li–Hf alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 159(2), 164-168.
- Tian, L., Guo, Y., Li, J., Xia, F., Liang, M., Duan, H., Wang, P., Wang, J. (2018). Microstructures of three in-situ reinforcements and the effect on the tensile strengths of an Al-Si-Cu-Mg-Ni alloy. *Applied Sciences*, 8(9), 1523.
- Troeger, L. P. ve Starke, Jr. E. (2000). Microstructural and mechanical characterization of a superplastic 6xxx aluminum alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 277(1–2), 102-113.
- Wang, F., Eskin, D., Connolley, T., Mi, J. (2016). Effect of ultrasonic melt treatment on the refinement of primary Al<sub>3</sub>Ti intermetallic in an Al–0.4 Ti alloy. *Journal of Crystal Growth*, 435, 24-30.
- Wang, F., Liu, Z., Qiu, D., Taylor, J. A., Easton, M. A., Zhang, M. X. (2013). Revisiting the role of peritectics in grain refinement of Al alloys. *Acta Materialia*, 61(1), 360-370.
- Xu, C., Xiao, W., Zheng, R., Hanada, S., Yamagata, H., Ma, C. (2015). The synergic effects of Sc and Zr on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloy. *Materials & Design*, 88, 485-492.