

Effects of Al-5Ti-0,2B and Al-5Ti-1B Grain Refiners on the Mechanical Properties of AA 1050 Aluminum Alloy

*^{1,2} Tuğçe Yunak , ¹ Erhan Duru , ² Samet Sevinç , ¹ Serdar Aslan 

¹ Sakarya University, Metallurgical and Materials Engineering, Sakarya, Turkey.

² ASAŞ Alüminyum San. A.Ş., Sakarya, Turkey.

* Corresponding author, e-mail: tugce.yunak1@org.sakarya.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0002-4576-3779>

Submission Date: 24.11.2023

Acceptation Date: 05.12.2023

Abstract - This study investigates the effect of grain refiners on aluminum alloys and reveals important results for various industrial applications. In this work, twin roll casting method was used to produce aluminum sheets. The research then goes into the microstructure and mechanical investigation of 1050 aluminum alloy with two different grain refiners, Al-5Ti-0.2B and Al-5Ti-1B. Optical microscopy, SEM, tensile tests and hardness measurements were carried out in order to compare microstructural and mechanical properties of the alloys. As a result, obvious effects of the higher amount of boron in the Al-5Ti-1B alloy observed. According to the SEM analysis, it was clearly seen that homogeneous intermetallic phase distribution observed in the case of usage Al-5Ti-1B grain refiner. In addition to this reduction in grain sizes determined via optical microscope. This reduction in grain size result in increase in mechanical properties namely yield strength increased from 75MPa to 84 MPa, tensile Strength increased from 97 MPa to 102 MPa, hardness in brinell increased from 27 HB to 30 HB and brinell in Vickers increased from 32,9 HV to 38,2 HV. The observed improvements in mechanical properties and microstructure reveal the applicability of anodizing process to the materials that are produced by TRC casting.

Keywords: Al-5Ti-1B, Twin-Roll Casting, Grain Thinners, Boron

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B Tane İncelticilerin AA 1050 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerine Etkileri

Öz – Bu kapsamlı çalışma, tane incelticilerin alüminyum alaşımlarının üzerindeki etkisini araştırmakta ve çeşitli endüstriyel uygulamalar için önemli çıkarımlar ortaya koymaktadır. Araştırmada, alüminyum levhalar üretimde hassasiyeti ve verimliliği ile tanınan ikiz merdaneli döküm metodundan yararlanılmıştır. Araştırma daha sonra Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B olan iki farklı tane incelticili 1050 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mekanik incelemesine girmektedir. Alaşımların mikroyapısal ve mekanik özelliklerini karşılaştırmak amacıyla optik mikroskop, SEM, çekme testleri ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuçlar, Al-5Ti-1B alaşımında daha fazla bulunan borun belirgin etkisini ortaya çıkarmıştır. Bu alaşımı SEM analizinde incelediğimizde intermetalik yapıların azaldığını ve daha homojen bir yapının ortaya çıktığı net bir şekilde görülmüştür. Bunun ile birlikte optik mikroskop görüntülerinde tane boyutlarının küçüldüğü ve daha tanecikli bir yapı oluşmasına sebebiyet vermesinin yanında akma, çekme ve makro-mikro sertlik değerleri sırasıyla ortalama 75MPa, 97MPa, 27HB ve 32,9 HV ‘den 84MPa, 102MPa, 30HB ve 38,2HV ‘ye yükselmesi Al-5Ti-1B alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerindeki iyileşmelerin net bir göstergesi haline gelmiştir. Mikroyapıda elde edilen bu gelişmeler ile özellikle ikiz merdane döküm tekniği ile üretilen malzemelerde eloksallama yüzey işleminin uygulanabilirliğini ortaya koymuştur.

Anahtar kelimeler: Al-5Ti-1B, İkiz Merdaneli Döküm, Tane İncelticiler, Bor

¹ Corresponding author: Tel: 0 530 664 33 47
e-mail: tugce.yunak1@org.sakarya.edu.tr

1. Giriş

Alüminyum, özellikle hafiflik işlenebilirlik, ısı-elektrik iletkenliği ve korozyona karşı üstün özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık, inşaat ve gıda gibi birçok sektörün vazgeçilmez haline gelmiştir [1].

Literatürdeki birçok çalışma, alüminyum bazlı alaşımların dökümünde daha üstün mekanik özellikler elde etmek için tane incelticiler kullanmıştır. Tane incelticiler, özellikle alüminyum alaşımlarında tane yapılarını inceltebilmek için kullanılan katkı maddeleridir. Katılaşma işlemi sırasında kullanılan tane incelticiler ince ve eş eksenli tanelerin oluşumunu sağlayarak, mekanik özelliklerin iyileşmesinde yardımcı olurlar. Ayrıca tane inceltici kullanılmış alüminyum malzemelerde beslenme kabiliyetlerinin yüksek olması ile porozitesiz ve homojen bir yapının oluşması alüminyum malzemeler için avantaj sağlamaktadır [2], [3].

Alüminyum sektöründe Al-Ti, Al-B ve Al-Ti-B tane incelticileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Titanyum partikülleri yeni çekirdeklenme bölgeleri sağlarken, bor ince ve eş eksenli taneciklerin oluşumunu destekler. Borun alüminyum malzeme üzerindeki bu tane inceltici etkisi nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen tane inceltici (Al-Ti-B) olmasını sağlamıştır [2], [3].

Geleneksel döküm yöntemlerinde Al-Ti-B tane incelticileri; alüminyum, titanyum ve borun doğası gereği erime noktalarının farklı olması nedeni ile belirgin düzensizlikler ve topaklanma eğilimi gösterdiği bilinmektedir. Bu nedenle ikiz merdaneli döküm yöntemleri kullanılarak geliştirilmiş homojen yapı oluşumu ve hassas dağılım kontrolü elde etmek için uygun bir yol sunar ve böylece alüminyum alaşımlarının çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanda uygulanabilirliğini arttırılabilir [4]–[7].

İkiz merdaneli döküm yöntemi, yüksek erime sıcaklıklarına olan ihtiyacı ortadan kaldırması, sürekli ve hızlı döküm yöntemine sahip olması nedeniyle geleneksel ergitme yöntemlerinden önemli ölçüde farklıdır. Geleneksel ergitme yöntemleri genellikle yüksek sıcaklıklar, daha uzun işlem süreleri ve kesintili toplu işlemler gerektirir [8]. İkiz merdaneli döküm yöntemi ise daha ince ve daha düzgün bir mikro yapı malzemelerin üretimine olanak sağlar, bu da mekanik özelliklerin ve yüzey kalitesinin iyileşmesine yol açar. Aynı zamanda enerji tüketimini azaltır ve alaşımın kirlenmesi riskini en aza indirir. Bu avantajlar ikiz merdaneli döküm yöntemini geleneksel yöntemlerden ayırarak alüminyumun alaşımlandırılması ve eritilmesi için daha verimli ve kaynakları koruyan bir alternatif haline getirmektedir [8], [9].

Bu çalışmada, alüminyum levhaların mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla iki farklı tane inceltici (Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B) kullanılmış olup, üretim için hassas bir yöntem olan ikiz merdaneli döküm yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada, elde edilen alüminyum alaşımının tane incelticilerinin metalografik, mekanik ve yüzey özelliklerine olan etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Geniş kapsamlı hedef olarak, Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerinin 1050 alüminyum alaşımı üzerindeki etkilerini gözlemleyerek, oluşturulan alaşımların mikroyapısı, mekanik özellikleri ve eloksallama işlemi üzerindeki etkilerini değerlendirilecektir.

2. Materyal ve Yöntem

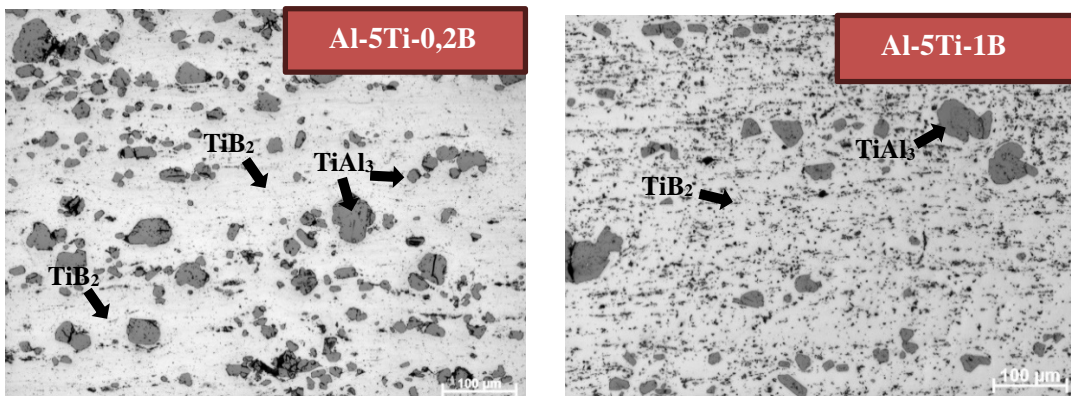
Bu çalışmada ikiz merdane döküm yöntemiyle üretilmiş AA1050 alaşımı kullanılmıştır. Aynı zamanda çalışmada Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B olmak üzere iki farklı tane inceltici kullanılmıştır. Çalışma, 700-750 santigrat derece aralıktaki sıcaklıkta çalışan bir fırında kontrollü bir ergitme işlemine tabi tutulan %99,5 alüminyumdan oluşan alaşımı hazırlamak ile başlamıştır. Daha sonra erimiş alüminyum, tutma fırınlarına kesintisiz bir şekilde aktarılmıştır. Bu belirlenmiş tutma fırınlarından sıvılaştırılmış alüminyum, hassas bir şekilde belirlenmiş bir açıyla merdanelere giden

yolluklara doğru yönlendirilmiştir. Tane incelticinin (Al-5Ti-0,2 / Al-5Ti-1B) ilavesi, hidrojen giderimi ve mekanik filtrelemelerden geçen sıvı alüminyum yolluklar vasıtasıyla tundish sistemine aktarılıp tip vasıtasıyla merdanelere beslenmiştir. Merdaneler arasına transfer edilen sıvı alüminyum birbirine zıt halde hareket eden su soğutmalı merdane yüzeylerine temas eder etmez katılma meydana gelerek levha üretimi gerçekleşmiştir [8]–[11].

Üretilen levhaların kimyasal bileşimlerin tespiti için elementel analiz yapılmıştır. Elementel analiz Thermo Scientific marka ARL 4460 OES model optik emisyon spektrometre cihazı ile yapılmıştır. Daha sonra levhadan alınan numunelerin yüzey morfolojisi ve mikroyapı görüntüleri için ZEISS marka Scope.A1 model optik mikroskobu ve ZEISS marka EVO MA 15 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Morfoloji açısından daha iyi görünüm elde edebilmek için zımparalama ve parlatma öncesi numuneler EpoFix Resin soğuk bakalite alınmış 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Bakalite alınan numuneler Herzog marka freze makinesi ile frezelendikten sonra sırasıyla 500, 1200 ve 2400 SiC zımparalama kağıtları kullanılarak zımparalanmış, parlatma işlemi için de Struers marka Tegamin-30 cihaz üzerinde silika, kaydırıcı ve elmas süspansiyon kullanılarak parlatma işlemi gerçekleştirilmiştir. Struers marka elektrolitik dağlama cihazı ile tetreflora borik asit kullanılarak dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Makro-sertlik ölçümü 62,5 kgf' luk kuvvet uygulanarak çapı 2,5 mm olan çelik bilye ile yapılmıştır. Mikro-sertlik ölçümü için Leica marka VMHT MOT model sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Mikrosertlik ölçümleri için hazırlanan kesit numunelerine 10 sn boyunca 50 gf yük uygulanmış olup, bu yük daha doğru sonuç elde edebilmek için numunenin 5 farklı bölgesine uygulanmış, ortalama sertlik değeri asıl sertlik değeri olarak belirlenmiştir. Çekme testi, ZwickRoell marka 50 kN kapasiteli cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler için test hızı 10 mm/min olarak belirlenmiş olup, ölçme boyu 50 mm olarak ayarlanmıştır. Tüm numune ölçümleri DIN EN ISO 6892-1 test standartlarına uygun olarak 0° ve 90° yönlerinde her bir inceltici için ikişer adet olmak üzere toplamda dört numune üzerinde gerçekleştirilmiştir.

3. Bulgular ve Tartışmalar

Şekil 1'de alüminyum alaşımlarında kullanılan Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerin ışık mikroskobu kesit mikroyapı görüntüleri yer almaktadır. İki tane inceltici arasında kompozisyondan da anlaşılacağı gibi içerdikleri bor elementi oranları farklıdır. Dolayısıyla mikroyapıda yer alan TiB₂ partikül miktarlarında resimlerden görüleceği üzere bazı farklılıklar göstermektedir. Al-5Ti-1B tane inceltici çok sayıda TiB₂ partikül içerirken Al-5Ti-0,2 B daha az sayıda TiB₂ içermekle birlikte TiAl₃ partiküllerinin nispeten çok sayıda ve büyük boyutlu olduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltme mekanizmasında TiB₂ partiküllerinin heterojen çekirdeklenme mekanizması ile tane inceltmede daha etkin olduğu bilinmektedir. Çalışmada kullanılan Al-5Ti-1B tane incelticinin mikroyapıda diğer incelticiye göre çok daha küçük tane yapısı sağladığı Şekil 1'de açık bir şekilde görülmektedir [12], [13].



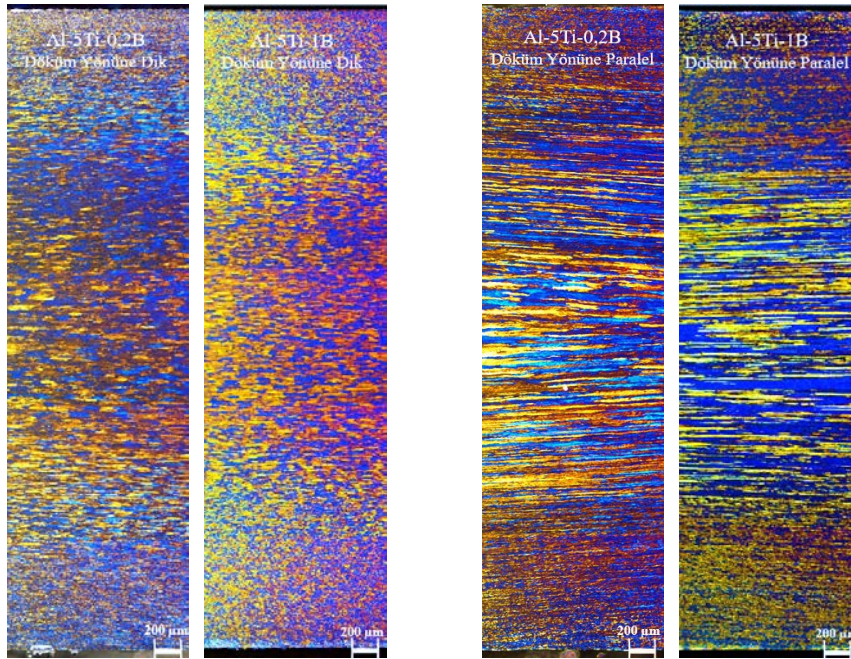
Şekil 1. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerin mikroyapısal analizi.

Alüminyum alaşımlarının kimyasal bileşimini tespit edebilmek için kapsamlı bir spektrometrik analiz yürütülmüştür. Ardından gelen kimyasal bileşim verileri dikkatli bir şekilde derlenmiş ve Tablo 1'de metodik olarak açıklanmıştır. Tablo 1.'de görüldüğü gibi Al- 5Ti-1B tane inceltici kullanılan alaşımın Al- 5Ti-0,2B tane inceltici kullanılan alaşıma göre içerdiği B miktarı yaklaşık 5 kat daha fazladır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimi.

İnceltici Türü	Al (%)	Ti (%)	B (%)
Al - 5 Ti - 0,2 B	99.552	0.023 -0.025	0.0005 -0.0010
Al - 5 Ti - 1 B	99.515	0.023 -0.025	0.0025 -0.0035

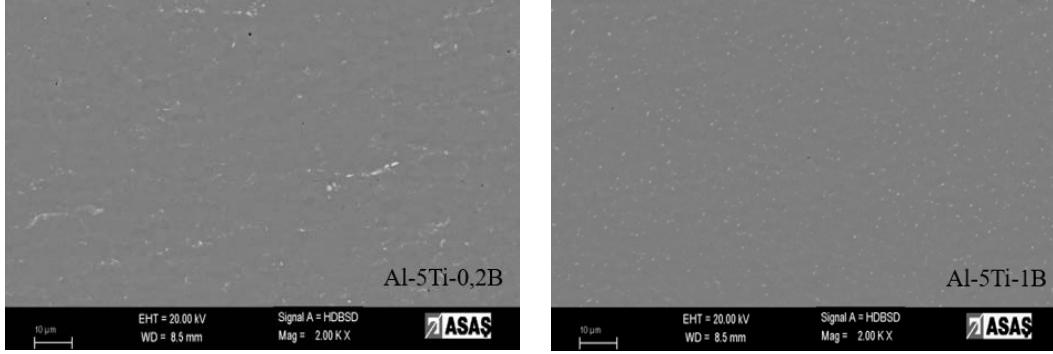
Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının mikro yapısal analizi ve tane büyüklüklerini karşılaştırmak amacıyla optik mikroskop kullanılarak mikroyapıları görüntülenmiştir (Şekil 2). İncelemelerde farklı tane inceltici kullanımı ile mikroyapıda daha ince ve eş eksenli yapı oluşumu elde edilmiştir. Bu tekdüzelik, tane dağılımı, metallar arası yapılar ve yüzey düzensizlikleri ile ilgili potansiyel sorunların önlenmesinde çok önemlidir. Böylesine homojen bir mikroyapı, olağanüstü yüzey kalitesi ve dayanıklılıkla karakterize edilen sağlam ürünlerin yaratılması için temel oluşturur [14], [15].



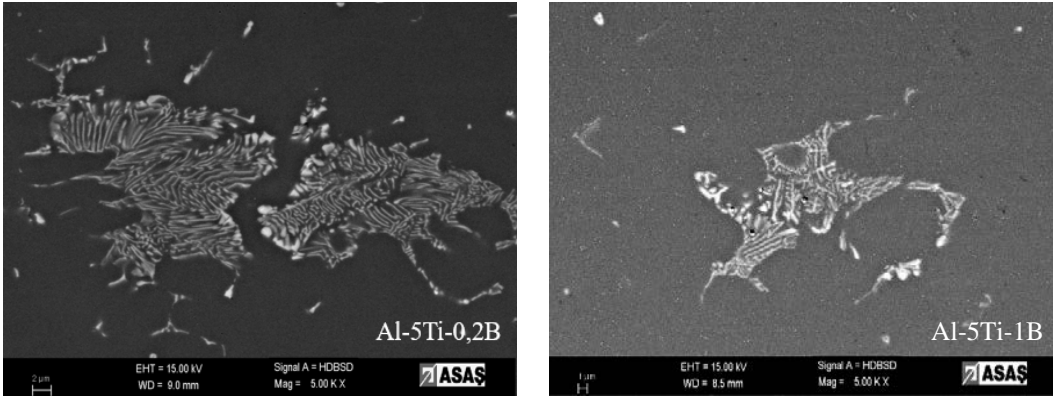
Şekil 2. Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhannın kesit mikroyapı görüntüleri.

Al-5Ti-0,2 B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının yüzey ve intermetalik incelemeleri için SEM cihazı kullanılmıştır. İnceleme sonucunda; optik mikroskoptaki görüntüyü destekler nitelikte malzemenin homojen dağılımı net bir şekilde gözler önüne serilmiştir. Hem optik mikroskop görüntüleri hem de SEM görüntüleri Al-5Ti-1B alaşımının daha ince taneli olduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 3.'de Al-5Ti-0,2B alaşımının içerisindeki beyaz olarak görülen intermetalik faz bölgelerinin homojen bir şekilde dağılmadığı ve lokal bölgelerde toplandığı görülmektedir. Böylece; Al-5Ti-1B alaşımının üstün çekirdeklenebilme yeteneği ile homojen bir dağılım sağlaması sayesinde intermetalik yapısı ve tane yapısındaki bu gelişim eloksallama gibi bu tür mikroyapısal etmenlere bağlı olan bir proses için olumlu bir etki yaratmaktadır. Şekil 4'te ayrıca levha kesit merkez hattında gözlemlenen merkez hattı segregasyonlarına ait SEM görüntüleri yer almaktadır. Resimde görülen merkez hattı segregasyonu

ötektikvari morfolojide Fe-Si-Al esaslı intermetalik fazlardan oluşmaktadır. Al-5Ti-1B tane incelticisinin katılma ve tane yapısında yarattığı etki nedeniyle merkez hattı segregasyonunun şiddetinin azaldığı görülmektedir. Daha etkin tane oluşumu ile matriste hapsolan elementler daha geç katılan merkez hattına difüze olamadan yapıda yer alıp merkez hattı segregasyonunun şiddetinin azalmasına neden olmuştur [16], [17].

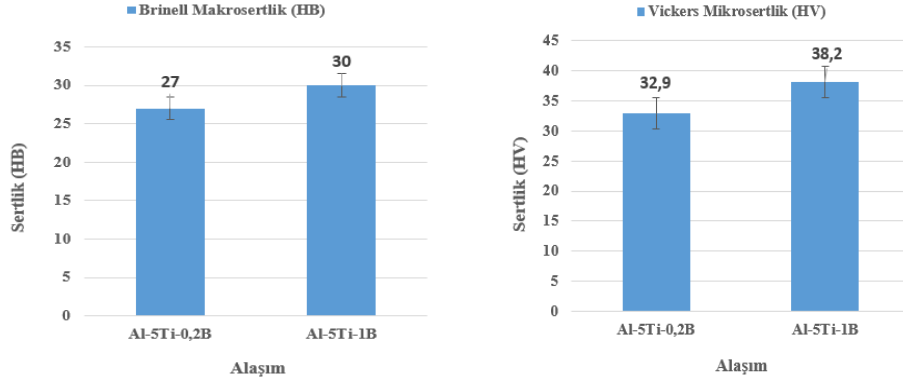


Şekil 3. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha kesit SEM görüntüleri.



Şekil 4. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levha merkez hattı SEM görüntüleri.

Şekil 5'te iki alaşımın makro ve mikro sertlikleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin yüzeyden Brinell makrosertlik ölçümleri yapıldığında; Al-5Ti-0,2B alaşımının ortalama yüzey sertlik değeri 27 HB iken, Al-5Ti-1B alaşımının ortalama yüzey sertliği 30 HB olarak ölçülmüştür. Numunelerin kesitten Vickers mikrosertlik ölçümleri yapıldığında ise Al-5Ti-0,2B alaşımının ortalama sertlik değeri 32,9 HV iken, Al-5Ti-1B alaşımının ortalama sertliği 38,2 HV olarak ölçülmüştür. Al-5Ti-1B tane inceltici kullanılan alaşımda çekirdeklenmenin artması, tane yapısının homojen ve ince bir morfolojiye bürünmesi ile birlikte alaşımın sertliğinin artmasında çok büyük rol oynadığı görülmektedir [18]–[20]

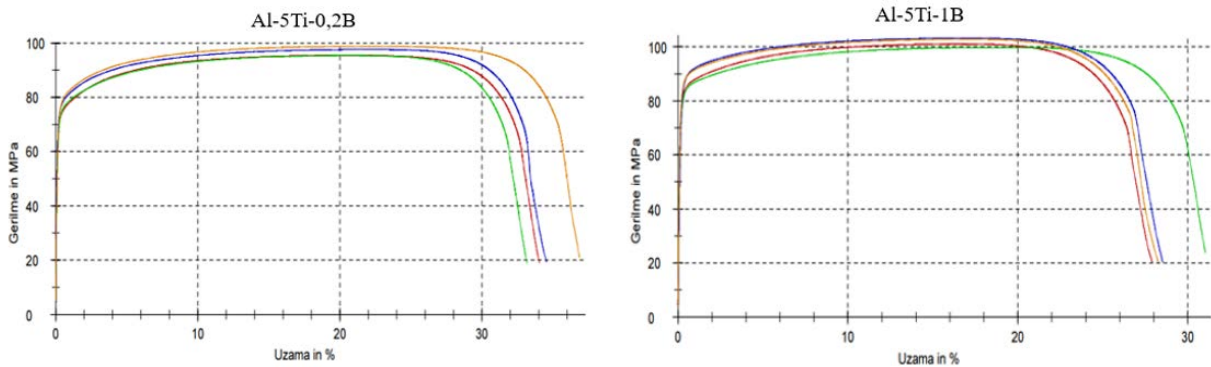


Şekil 5. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların makro-sertlik ve mikro-sertlik değerleri.

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımlarının çekme testi sonuçları Şekil 6'de verilmiştir. Bu alaşımların sırasıyla 0° ve 90° yönündeki akma ve çekme mukavemetleri Tablo 2'de verilmiştir. Al-5Ti-1B tane inceltici içeren alaşımın ince taneli olması, dolayısıyla daha fazla tane sınırı içermesi anlamına gelmektedir. Tane sınırları dislokasyon hareketini sınırladığı için daha fazla tane sınırı içeren alaşımın mukavemetinin ve sertliğinin daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir. Hall-Petch bağıntısı da malzemelerin tane inceliği ile mukavemetleri arasındaki ilişkiyi açıklamaktadır [21], [22].

Tablo 2. Çekme testi sonuçları.

Numune Adı	Numune Yönü	Akma Dayanımı %0,2 (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama A50 (%)
Al-5Ti-0,2B	0°	72	95	34
Al-5Ti-0,2B	0°	73	95	33,1
Al-5Ti-0,2B	90°	76	98	34,5
Al-5Ti-0,2B	90°	77	99	36,8
Al-5Ti-1B	0°	83	101	27,9
Al-5Ti-1B	0°	81	100	31
Al-5Ti-1B	90°	86	103	28,5
Al-5Ti-1B	90°	87	103	28,2



Şekil 6. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticilerden üretilmiş olan levhaların çekme testi grafikleri.

Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B alaşımları arasındaki temel fark borun (B) varlığında yatmaktadır. Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B arasındaki farklar şunlardır:

- Mikroyapıya Etkisi: Al-5Ti-1B'un alüminyum alaşımına dahil edilmesi, alaşımın mikroyapısının homojenliğine yol açmıştır. Ayrıca; sertleşebilirliği geliştirmiş ve tane yapısını iyileştirerek intermetaliklerin oluşumu en aza indirilerek diğer mikroyapısal ve mekanik özellikleri de geliştirilmiştir. Al-5Ti-0,2B bor eksikliğinden dolayı aynı mikroyapısal değişiklikleri göstermemektedir.
- Mekanik Özellikler: Al-5Ti-1B 'de borun varlığı potansiyel olarak artan mukavemet ve sertlik gibi gelişmiş mekanik özelliklerle sonuçlanmıştır. Al-5Ti-0,2B ise bu özelliklerde aynı seviyede bir gelişme göstermemektedir.

4. Sonuçlar

- Bu çalışmada farklı bor içeriğine sahip Al-5Ti-0,2B ve Al-5Ti-1B tane incelticileri 1050 alüminyum alaşımı içerisine dahil edilerek başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- SEM ve optik mikroskop görüntülerinden Al-5Ti-1B tane inceltici kullanılarak üretilen levha mikroyapısının ince taneli, homojen olduğu ve bunun yanında daha az şiddette merkez hattı segregasyonu oluşumuna katkı sağladığı belirlenmiştir.
- Daha yüksek bor içeriğine sahip Al-5Ti-1B tane inceltici içeren alaşımın diğer incelticiye göre AA 1050 alaşımı için daha fazla yeni çekirdekleyici bölgelerin oluşumu destekleyerek tane boyutunu incelttiği ve bu nedenle sertlik ve mukavemet özelliklerini daha fazla geliştirdiği kanıtlanmıştır.
- Al-5Ti-1B tane inceltici kullanımıyla tane yapısı ve intermetalik boyut ve dağılımlarında meydana gelen gelişimler eloksallama yüzey işleminin istenen yüzey kalitede elde edilmesine olanak sağlamıştır.

Kaynaklar

- [1] E. Bayseçkin, "Sürekli döküm yöntemiyle alüminyum levhalarda döküm ve homojenleştirme sürecinde mikro yapısal değişimin incelenmesi.," 2002.
- [2] M. B. YAMAN, E. KOCAMAN, and B. AVAR, "Al7075 Alaşımına İlave Edilen Al-5Ti-1B Tane İncelticinin Yaşlanma, Mikroyapı, Sertlik ve Korozif Özellikleri Üzerindeki Etkisi," *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, vol. 10, no. 4, pp. 870–883, Dec. 2022, doi: 10.29109/GUJSC.1165103.
- [3] M. Çolak *et al.*, "ALÜMİNYUM DÖKÜMLERİNDE TANE İNCELTME," *Sakarya University Journal of Science*, vol. 13, no. 1, pp. 11–17, Jun. 2009, doi: 10.16984/SAUFBED.70075.
- [4] F. XIAO *et al.*, "Effect of trace boron on grain refinement of commercially pure aluminum by Al-5Ti-1B," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, vol. 32, no. 4, pp. 1061–1069, Apr. 2022, doi: 10.1016/S1003-6326(22)65855-2.
- [5] A. Paşa Hekimoğlu, Y. E. Turan, İ. İ. İsmailoğlu, E. Akyol, and E. Şen, "Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy," *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 34, pp. 523–534, 2019, doi: 10.17341/gazimmfd.416512.
- [6] E. Kocaman and S. Şirin, "Effect of Al5Ti1B Grain Refiner and Al10Sr Modifier on Mechanical Properties and Corrosion Behavior of A360 Alloy," *International Journal of Automotive Science And Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 30–36, Apr. 2023, doi: 10.30939/IJASTECH..1237345.
- [7] L. Lu, M. O. Lai, and H. Y. Wang, "Synthesis of titanium diboride TiB2 and Ti-Al-B metal matrix composites," *J Mater Sci*, vol. 35, no. 1, pp. 241–248, 2000, doi: 10.1023/A:1004789910279/METRCS.

- [8] © Metallurgical and M. Industry, “Twin-roll Casting of High-strength Age-hardened Aluminium Alloys,” vol. 3, no. 7, 2011.
- [9] F. Karakoyun, “THE EFFECTS OF ALLOYING ELEMENTS ON THE MICROSTRUCTURE AND ANNEALING BEHAVIOR OF THE TWIN-ROLL CAST AA1050 STRIP,” 2004.
- [10] O. Mutlu, “AA1050 ALÜMİNYUMUN HACİMSSEL VE YÜZEYSSEL AŞIRI PLASTİK DEFORMASYON YÖNTEMLERİ İLE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ 2019 YÜKSEK LİSANS TEZİ MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ”.
- [11] A. Kadri Can, “The Effects of Solidification Conditions on The Formability of The Twin-Roll Cast AA1050 Strip “,” *Mechanical Engineering Thesis , Boğaziçi University , Istanbul , Turkey*, 2007.
- [12] İ. ARSLAN, E. GAVGALI, and M. ÇOLAK, “Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde AL5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi,” *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, no. 2, pp. 237–244, May 2019, doi: 10.21541/APJES.424920.
- [13] Hu, M., Wang, F., Jiang, B., Wang, H., Liu, Y., & Ji, Z. (2022). Fabrication of Al–Ti–B Grain Refiner Using Machining Ti Chips, Reaction Mechanisms and Grain Refinement Performance in Pure Al. *Metals and Materials International*, 1-9, 2021, doi: 10.1007/s12540-021-01011-9
- [14] S. Lin, C. Aliravci, and M. O. Pekguleryuz, “Hot-Tear Susceptibility of Aluminum Wrought Alloys and the Effect of Grain Refining,” *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol. 5, no. 38, pp. 1056–1068, 2007, doi: 10.1007/S11661-007-9132-7.
- [15] Y. Luo *et al.*, “Effect of Warm Rolling on the Grain-Refining Performance of Al-5Ti-1B Grain Refiner in Al,” *JOM*, vol. 74, no. 3, pp. 1210–1217, Mar. 2022, doi: 10.1007/S11837-021-05137-4.
- [16] S. Basak, P. Biswas, S. Patra, H. Roy, and M. K. Mondal, “Effect of TiB₂ and Al₃Ti on the microstructure, mechanical properties and fracture behaviour of near eutectic Al-12.6Si alloy,” *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 28, no. 7, pp. 1174–1185, Jul. 2021, doi: 10.1007/S12613-020-2070-8/METRICS.
- [17] H. Ashassi-Sorkhabi, M. Moradi-Haghighi, and M. G. Hosseini, “Effect of rare earth (Ce, La) compounds in the electroless bath on the plating rate, bath stability and microstructure of the nickel-phosphorus deposits,” *Surf Coat Technol*, vol. 202, no. 9, pp. 1615–1620, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.surfcoat.2007.07.019.
- [18] R. Can *et al.*, “Toz Metalurjisi Yöntemi ile Tane İnceltici Üretimi ve Döküm Performansının İncelenmesi,” *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 15, no. 1, pp. 151–163, Jan. 2023, doi: 10.29137/UMAGD.1167854.
- [19] Izcankurtaran, D., Tunca, B., & Karatay, G. (2021). Investigation of the effect of grain refinement on the mechanical properties of 6082 aluminium alloy. *Open Journal of Applied Sciences*, 11(6), pp. 699-706, Jun. 2021, doi: 10.4236/ojapps.2021.116051
- [20] A. B. Pattnaik, S. Das, B. B. Jha, and N. Prasanth, “Effect of Al–5Ti–1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 171–179, Apr. 2015, doi: 10.1016/J.JMRT.2014.10.017.
- [21] Y. Wen, Y. Wu, Y. Wu, T. Gao, Z. Wei, and X. Liu, “Effect of Al-5Ti-0.25C-0.25B and Al-5Ti-1B Master Alloys on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-9.5Si-1.5Cu-0.8Mn-0.6Mg Alloy,” *Materials 2023, Vol. 16, Page 1246*, vol. 16, no. 3, pp. 1246, Feb. 2023, doi: 10.3390/MA16031246.
- [22] M. Alipour, “The Comparison of Effects of Ultrasonic Treatment, SIMA Process and Al-5Ti-1B Grain Refiner on the Microstructure and Mechanical Properties of Al–15%Mg₂Si in-situ Composite,” *Iranian Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 97–114, Mar. 2023, doi: 10.22068/IJMSE.2957.