



AZ91 Mg Alaşımına Farklı Oranlarda Sb İlavesi İle Katılaşma Hızının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi

Effects of Solidification Rate on Microstructure and Mechanical Properties with Sb at Different Ratio of AZ91 Quality Mg Alloy

Levent Elen¹, Yunus Türen², Erkan Koç²

¹ Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

² Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü 78050 Karabük, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 03/01/2019

Kabul/Accepted: 05/03/2019

Son Versiyon/Final Version: 30/06/2019

Öz

Mevcut kullanım alanları gün geçtikçe artış gösteren Mg alaşımlarının, teknolojik gelişmelere uyum sağlayabilmesi için mekanik özellikler bakımından daha fazla geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Günümüzde çözünebilir biyo-malzeme olarak sağlık alanında da kullanılmaya başlayan Mg ve alaşımlarına kazandırılan fiziksel ve mekanik özellikler malzemenin kullanım ömrünü tayin etmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, AZ91 serisi Mg alaşımına farklı oranlarda (%0.2 - %0.5 ve %1.0) Sb elementi ilavesi ve katılaşma hızının da etkisiyle mekanik özelliklerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yapılan çalışmanın neticesinde sonuçlar incelendiğinde; AZ91 alaşımının genel olarak tane yapısının α -Mg ve tane sınırları boyunca yayılan β -Mg₁₇Al₁₂ fazından oluştuğu saptanmıştır. Hızlı soğumanın tane yapısında küçülmelere sebep olduğu bununla birlikte tane sınırlarında bulunan Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının incelip parçalandığı tespit edilmiştir. Tespit edilen bu etkilerin neticesinde de alaşımın çekme, akma ve uzama değerlerinde artışın olduğu gözlenmiştir. Bununla birlikte AZ91 alaşımına ilave edilen Sb ile yapıda Mg₃Sb₂ fazı oluşmuştur. Bu intermetalik fazın yapıda meydana getirdiği değişiklikler ile alaşımın mekanik özelliklerinde artış izlenmiştir. AZ91 alaşımının çekme dayanımı Sb ilavesi ile 163 MPa seviyelerinden 217 MPa seviyelerine kadar iyileşmiştir. Sb ilavesiyle AZ91 alaşımında sertlik değerleri yaklaşık 57 HV değerlerinden 81 HV değerlerine yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler

“AZ91, Mg alaşımları, soğuma hızı, mekanik özellikler, mikroyapı”

Abstract

The increasing use of Mg alloys in today's applications has necessitated further improvement in mechanical properties in order to adapt to technological developments. The physical and mechanical properties of Mg and its alloys, which are now being used in the field of health as soluble biomaterials, determine the useful life of the material. Therefore, in this study, it was aimed to improve the mechanical properties of AZ91 series Mg alloy at different ratios (0.2% - 0.5% and 1.0%) by the addition of Sb element and the effect of solidification rate. When the results of the study are examined, it has been found that the AZ91 alloy generally consists of α -Mg grain structure and β -Mg₁₇Al₁₂ phase extending along grain boundaries. It has been found that the intermetallic phase of Mg₁₇Al₁₂ in the grain boundaries has been thinned and disintegrated because of rapid cooling causing the grain structure to shrink. As a result of these detected effects, it was observed that the tensile strength of the alloy, the yield strength and the unit (percent) elongation ratios were increased. However, Mg₃Sb₂ phase was formed with Sb added to AZ91 alloy. The mechanical properties of the alloy increased with the changes in the structure of this intermetallic phase. The tensile strength of the AZ91 alloy improved with the addition of Sb from 163 MPa to 217 MPa and with the increasing amount of Sb, the hardness values of the AZ91 alloy increased from about 57 HV to 81 HV.

Key Words

“AZ91, Mg alloys, cooling rate, mechanical properties, microstructure”

1. Giriş

Buharlaştırma özelliği ve yoğunluk bakımından plastikleri andıran Mg, bir metalin sahip olduğu bütün mekanik özelliklere sahiptir. Bununla birlikte mühendislik plastikleri olarak adlandırılan malzeme grubundaki tüm malzemelerden daha rijittir ve aynı zamanda da geri dönüşümü mümkün olan bir malzemedir (Bamberger, 2013; Barber, 2004; Kazdal, 1999; Mordike & Ebert, 2001). Ayrıca Mg ve alaşımları demir dışı metal alaşımları içerisinde, en düşük yoğunluğa sahip olmasının yanı sıra iyi süneklik ve dayanım özelliği ile birlikte iyi bir korozyon direnci özelliğine sahiptir (Polmear, 1989; Westengen & Rashed, 2016). Bununla birlikte farklı döküm yöntemleri kullanılarak ya da alaşımlandırma çeşitliliği artırılarak şekillendirilebilirliği gelişime açık bir metaldir (Çiçek et al., 2013). Dolayısıyla Mg alaşımları günümüzde, sahip olduğu üstün mekanik özelliklerden dolayı endüstride hem konstrüksiyon malzemesi olarak hem de otomotiv endüstrisinde kullanım olarak önceliğe sahiptir (Gaines et al., 1996; Kazdal, 1999; Pekgülyüz & Kaya, 2003). Özellikle düşük yoğunluğa sahip olmasından dolayı dikkatini çektiği ve gözde haline geldiği diğer sektörler ise elektronik, uzay ve uçak sanayiidir. Bununla birlikte yüksek bir derecede çözünürlüğe sahip olmasına rağmen toksik özelliği (hızlı çözünme veya zehirlenme) yoktur. Bu sebeple de sağlık alanında biyomalzeme olarak da kullanıma elverişlidir (Agarwal et al., 2016; Song & Song, 2007; Staiger et al., 2006; Witte et al., 2007; Wolff et al., 2014). İlaveten hegzagonal sıkı paket (HSP) yapılı magnezyumun sahip olduğu tane yapısı, katı eriyik ve çökelti sertleşmesi gibi önemli iki sertleştirme mekanizmasına olanak tanır (Wolff et al., 2014). Ancak magnezyum metali (II A) sütununda bulunan ve dolayısıyla da oksijen ile çok çabuk reaksiyona girme özelliğine sahip toprak alkaliler üyesi olduğu için hem ergitme esnasında ocak içerisinde hem de döküm esnasında kalıp içerisinde sıvı metalin bu reaksiyonunu engelleyici inert gazlar kullanılmalıdır (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Unal, 2008). Bu özelliklerinin yanı sıra dökülebilirliği oldukça iyi olması ve yer kabuğunda oldukça fazla miktarda varlık göstermesi magnezyumu, alüminyum ve çelikten sonra en çok kullanılan alaşım elementi durumuna getirmiştir (Ali et al., 2015; Y. Lee et al., 2000; Suh et al., 2015).

2. Literatür Özeti

Magnezyum alaşımları içerisinde AZ91 çok iyi derecede döküm ve mekanik özelliklere sahip olduğu için en çok kullanılan alaşımdır (Çiçek et al., 2006). Bununla birlikte en iyi sürünme direncinin oda sıcaklığında olması da (Zhang, 2000) AZ91 alaşımının en fazla kullanılan Mg alaşımı olmasına katkı sağlamıştır. Alaşım yapmaya yatkın olmasından dolayı mekanik ve mikroyapı özellikleri geliştirilmeye çok müsaittir. Dolayısıyla birçok element ile yapılan deneysel çalışmalarda literatüre çok önemli bilgiler katılmıştır. Özellikle Sb ile ilgili yapılan çalışmalar çok çarpıcı sonuçlar ortaya koymuştur.

Yüzey aktif bir element olan Sb'un Mg alaşımlarına ilave edilmesi durumunda alaşımın tane yapısını inceltir (Polmear, 1996) ve tane sınırlarında bileşik oluşumunu destekler (Carbonneau et al., 1998). Bu sayede de alaşımın oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta mukavemetini artırır (Park et al., 1994) ve sürünme özelliği ile birlikte akışkanlığının artmasına da yardımcı olur (S. Lee et al., 1998). Pekgülyüz (MÖ, 1992), Mg-Sb ikili alaşımının düşük uzaması nedeniyle Sb'nin Mg alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri, özellikle Zn ve Al içeren Mg alaşımlarına etkileri üzerine daha fazla araştırma yapılması gerektiğini önermiştir. Wang, Q. ve ark. (Wang et al., 2001) AZ91'e Sb ilavesi ile yapmış oldukları çalışmada belirli oranlarda katılan Sb'un AZ91 alaşımının mekanik özellikler üzerine olumlu etkilerinin olduğundan bahsetmiştir. Bir başka çalışmada ise Guangyin, Y. ve ark. (Guangyin et al., 2001) yüksek sıcaklıklarda sürünme direncinin yanı sıra β fazının stabilitesini koruduğu tespiti gibi önemli bir tespit rapor etmiştir. Fakat yapılan çalışmaların hiçbirinde soğuma hızı dikkate alınmamıştır. Bunun sonucunda bu çalışmada farklı oranlarda Sb ilavesinin yanı sıra farklı soğuma hızlarının AZ91 alaşımında mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

3. Malzeme ve Metot

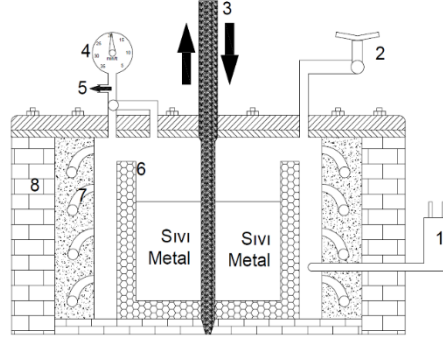
3.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda, AZ91 master alaşımının ve diğer alaşımların hazırlanmasında 99.9 % saflıkta elementler kullanılmıştır. Master alaşım Sb elementi ön alaşımlama prosesi ile ilave edilmiştir. Bu proseste ikinci bir ergitme işlemi ile hazırlanan ön alaşımlar tekrar ergitilip %0.2, %0.5 ve %1.0 Sb alaşım elementi ilavesi ile tekrar dökülmüştür. Sonuç olarak AZ91, AZ91+%0.2 Sb, AZ91+%0.5 Sb ve AZ91+%1.0 Sb alaşımları hazırlanmıştır.

3.2. Metot

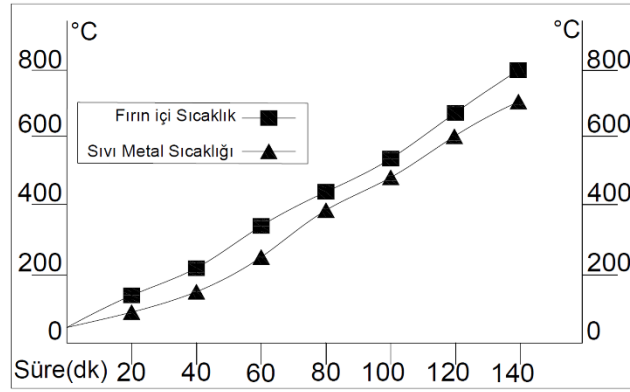
3.2.1. Ergitme, döküm ve kalıp

Ergitme işlemlerinin yapıldığı fırının (Şekil 1) iç yüzeyi refrakter tuğla ile kaplanmış ve ergitme işleminde kapasitesi yaklaşık olarak 2 Kg olan mobil çelik döküm pota kullanılmıştır. Ergitme esnasında da ocak atmosferinin kontrolü için koruyucu gaz olarak Argon kullanılmıştır. Ocak içerisinde ve metalde sıcaklık değeri 750 °C olacak şekilde takip edilmiştir.



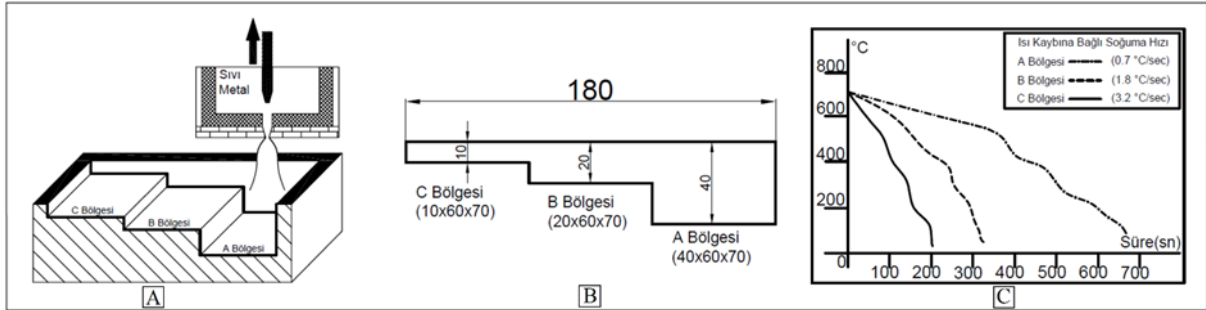
Şekil 1. Ergitme fırınının şematik gösterimi (1- Termokupl, 2- Ar girişi, 3- Seramik tıkaç, 4- Ar göstergesi, 5- Ar çıkışı, 6- Ergitme potası, 7- Rezistans, 8- Refrakter malzeme).

Ergime sıcaklığına ulaşıldıktan sonra 10-15 dakika bekletilerek alaşımın döküm sıcaklığına ulaşması sağlanmıştır. Ocağın ve sıvı metalin sıcaklık dengesi Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Fırın-Eriyik sıcaklık diyagramı (Sıcaklık kalibrasyonu).

Dökümler yerçekimi kuvvetinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığına varan eriyik; pota ortasında bulunan döküm yolunun açılması ve yerçekimi etkisi ile Şekil 3(A)’da kesiti görülen kalıba aktarılmıştır. Kalıp malzemesi olarak AISI 1040 kalite çelik malzeme kullanılmış ve kalıp iç yüzeyi Ra 2.5 hassasiyetinde işlenmiştir. Döküm öncesi kalıp ani soğuma hatalarını en aza indirmek adına 250 °C sıcaklığa kadar klasik bir fırında ön ısıtma işlemine tabi tutulmuştur. Dökümü yapılan üç kademeli deney numunesi Şekil 3(B)’de gösterilmiştir. Döküm sonrası Şekil 3(B)’de verilen kademeli kalıbın her bir kademesinin soğuma hızı bütünlük bir program (ADAM-4018 thermocupl input modul) yardımı ile ölçülmüştür. Programdan elde edilen sıcaklık-zaman eğrileri ve soğuma hızları Şekil 3(C)’de verilmiştir.



Şekil 3. Kalıp, Döküm parça ölçüleri ve Soğuma hızı grafiği (A) Kalıp kesit resmi, (B) Döküm parça, (C) Soğuma hızı grafiği.

AZ91 alaşımlarının ve deneysel çalışmalarda ilave edilen alaşım elementlerinin % miktarları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. AZ91 ve alaşımlarının % element miktarları

Alaşımlar	% Element					
	Al	Zn	Mn	Sb	Diğer	Mg
AZ91	9,11	0,76	0,16	-	0,021	Kalan
AZ91 + 0.2Sb	9,21	0,76	0,18	0,19	0,017	Kalan
AZ91 + 0.5 Sb	9,15	0,69	0,19	0,57	0,0012	Kalan
AZ91 + 1.0 Sb	9,11	0,76	0,16	1,02	0,021	Kalan

3.2.2. Mikroyapı analizi

Mikroyapı incelemeleri için numune yüzeyleri klasik metalografik yöntemler kullanılarak hazırlanmıştır. İncelenecek yüzeyler 1 µm alümina (Al₂O₃) kullanılarak parlatılmış ve alkolle yüzeyleri durulanıp kurutulmuştur. Metalografik işlemlerin ardından optik mikroskopta inceleme için yüzeyler son olarak %75 etilen glikol, %24 saf su, %1.0 HNO₃ karışımı ile dağlanmıştır. Daha sonra SEM çalışmaları için 70 ml etanol, 10 ml su, 20 ml asidik asit ve 4.2 g pikrik asit ile dağlanmıştır. İncelenen alaşımların mikro yapıları, bir Leica DM ILM metalürjik optik mikroskop (OM), bir Leica DFC290 kamera sistemi ve donanımlı bir Jeol6060 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılarak analiz edilmiştir. Yapıda bulunan bölgesel veya noktasal elementler miktarlarını incelemek adına EDS analizi yapılmış ve bu aşamada SEM fotoğrafları kullanılmıştır.

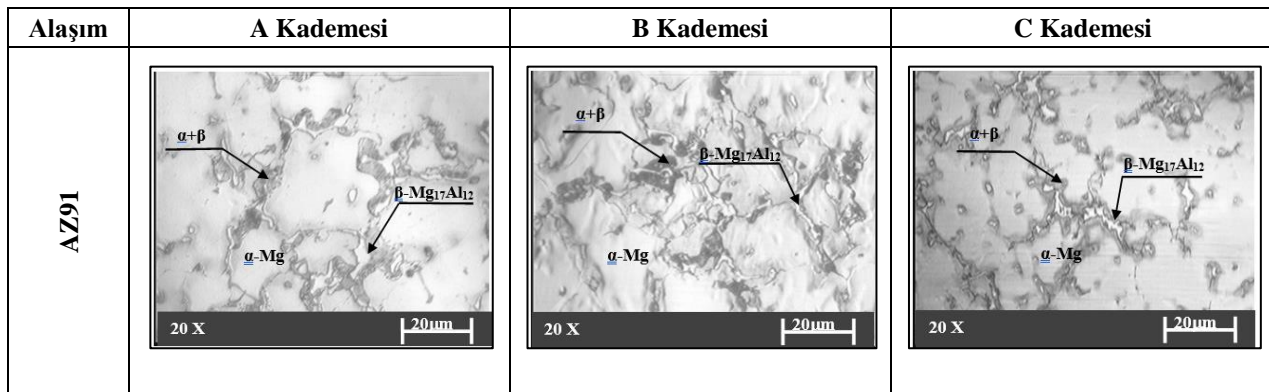
3.2.3. Mekanik test

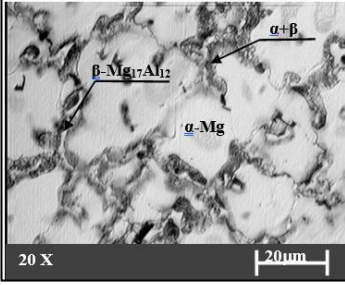
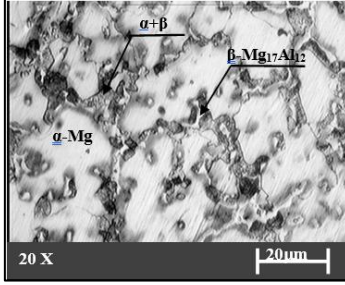
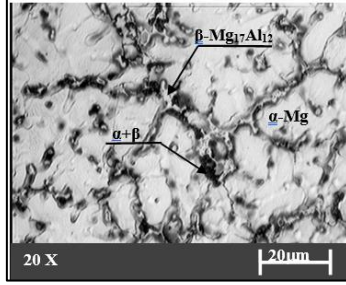
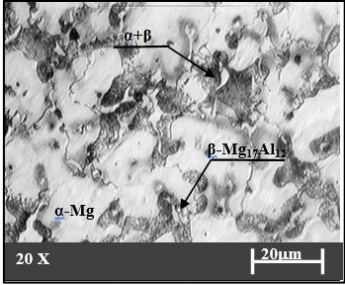
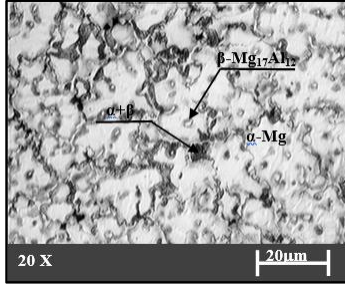
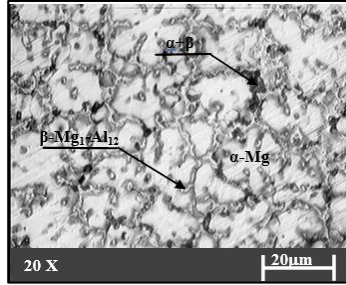
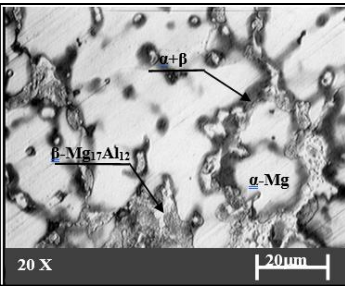
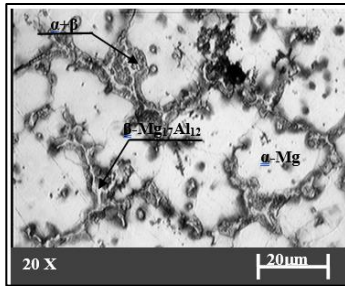
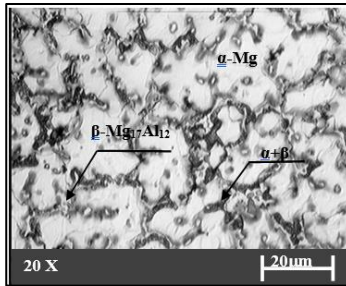
Şekil 3(B)'de verilen döküm parçasının her bir bölgesinden (A-B-C) 3 adet çekme testi numunesi ilgili standart şartlarında (ASTM B557) hazırlanmıştır. Çekme testleri Instron marka çekme cihazında 3mm/dk hızında uygulanmıştır. Çekme testi sonucunda akma-çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri tespit edilmiştir. İnceleme bölgelerinden ayrı ayrı çıkarılan küp (10 mm) şeklindeki numuneler üzerinden sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değerleri ölçümünde Vickers (HV) cinsinden ölçüm yapılmış ve 200 gr basma yükü kullanılmıştır. Küp numunenin her yüzeyinden birbirine yakınlığı min. 2.5 mm olan 3'er ölçüm yapıldıktan sonra ortalama değer grafiklerde gösterilmiştir.

4. Sonuç ve Değerlendirme

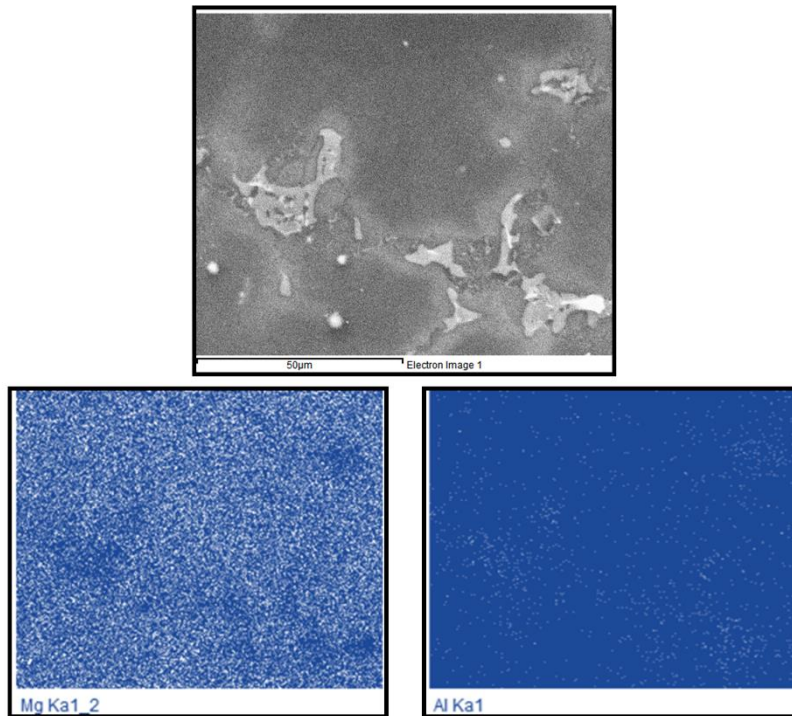
4.1. Mikroyapı Analizi

Master alaşım olarak üretilen AZ91 ve Sb ilavesiyle dökümü yapılan alaşımlara ait OM görüntüleri Şekil 4'te verilmiştir. Mg-Al ikili alaşımlarında tane sınırlarında Al metalinin yığılması ve Mg-Al arasında oluşabilecek fazlar literatürde de tespit edilen bir sonuçtur (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Ding & Ju, 2018; Falcon et al., 2011; Gray & Luan, 2002). SEM görüntülerinde verilen (Şekil 5) EDS sonuçlarına göre Mg taneleri arasında tane sınırında bulunan fazların Mg-Al intermetalik fazı olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4-8 incelendiğinde AZ91 ve alaşımlarının genel olarak mikro yapısı α-Mg ve tane sınırları boyunca yayılan β-intermetalik fazından meydana geldiği tespit edilmiştir (Jiang et al., 2010). Benzer çalışmalara bakıldığında Mg-Al ikili faz diyagramlarında görülen β-Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı α-Mg tanelerinin sınırlarında bulunmaktadır (Çiçek et al., 2013; Çiçek & Sun, 2012; Ding & Ju, 2018; Falcon et al., 2011; Gray & Luan, 2002). Tane sınırlarında bulunan intermetalik yapı içerisinde farklı faz bileşimleri olan Mg₁₇Al₁₂, Al₃Mg₂ ve Mg₂₄Al₁₇ gibi fazlar aynı tane sınırı içerisinde oluşabilmektedir (Ding & Ju, 2018).

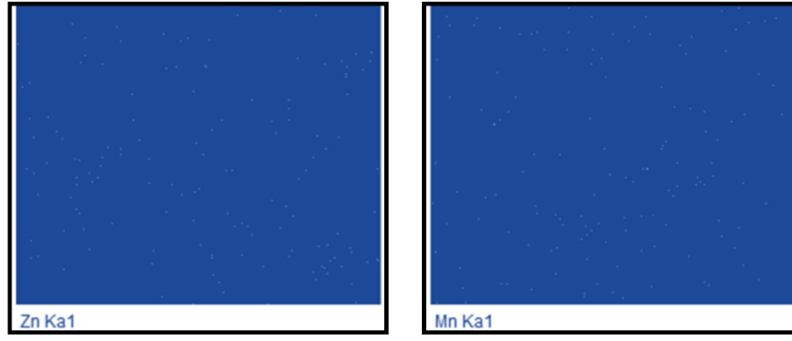
**Şekil 4.** AZ91 ve alaşımlarının mikroyapı görüntüleri.

Alaşım	A Kademesi	B Kademesi	C Kademesi
AZ91+0.2 Sb			
AZ91+0.5 Sb			
AZ91+1.0 Sb			

Şekil 4 (devam). AZ91 ve alaşımlarının mikroyapı görüntüleri.

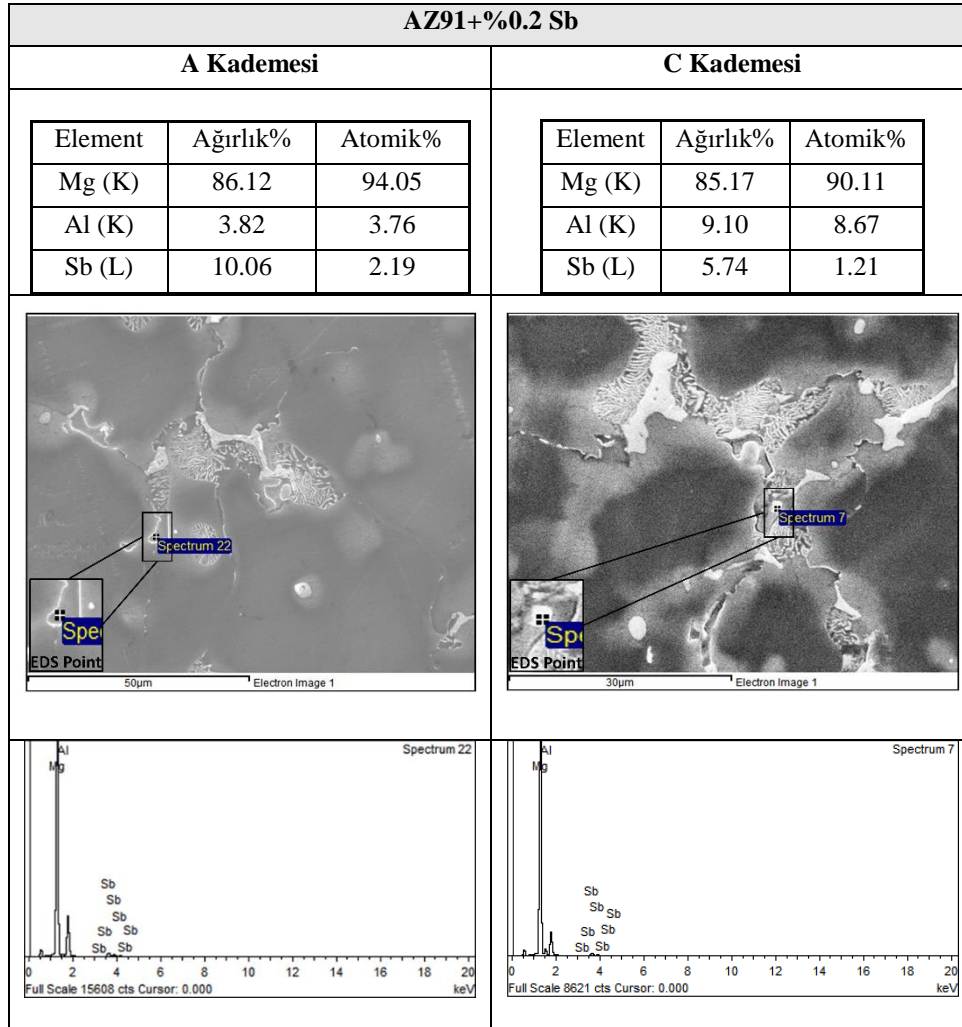


Şekil 5. AZ91 EDS-MAP görüntüsü.



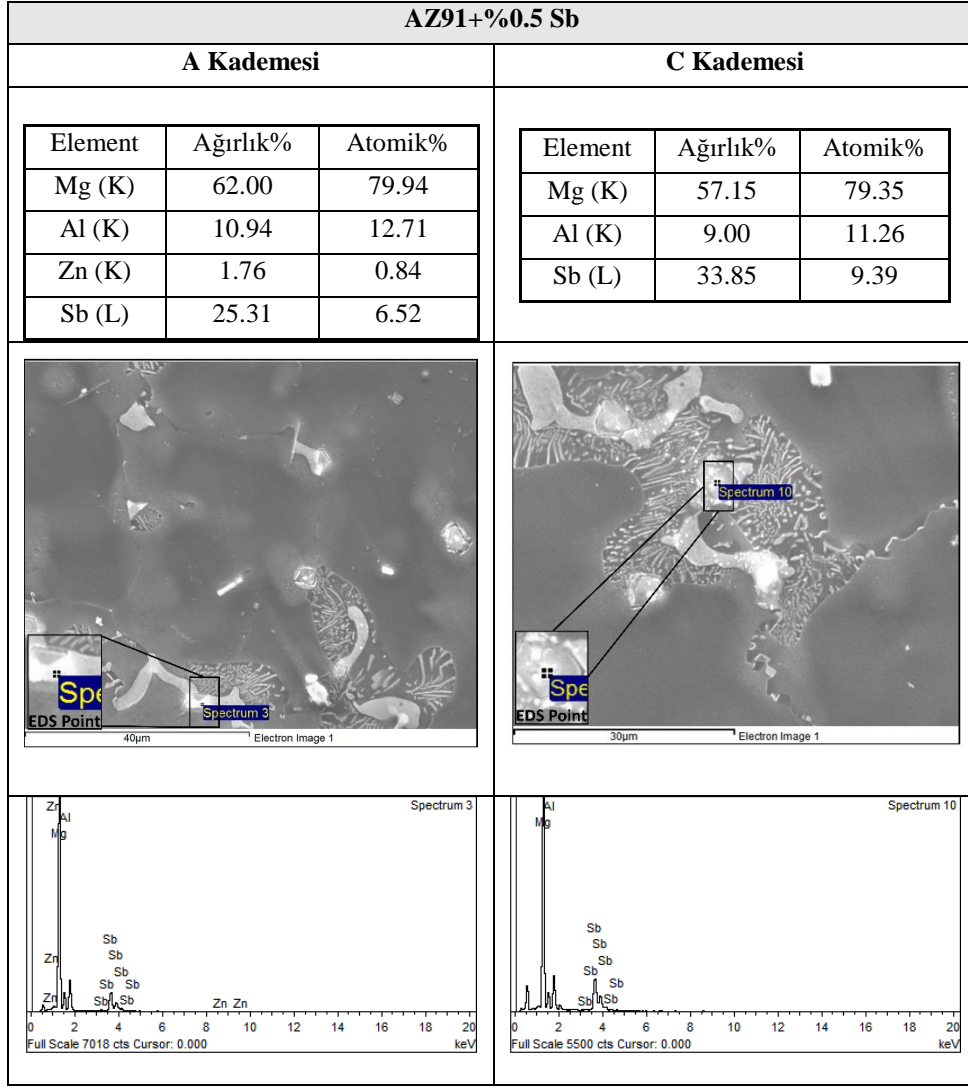
Şekil 5 (devam). AZ91 EDS-MAP görüntüsü.

Mg-Al-Zn üçlü bileşimi ile oluşturulan AZ91 alaşımı için element dağılım analizleri (EDS) sonucunda Mg metalinin yapıda homojen dağılım gösterdiği, Al metalinin tane sınırlarında ikincil bir faz (β) içerisinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. AZ91+%0.2 Sb alaşımının EDS analiz sonuçları.

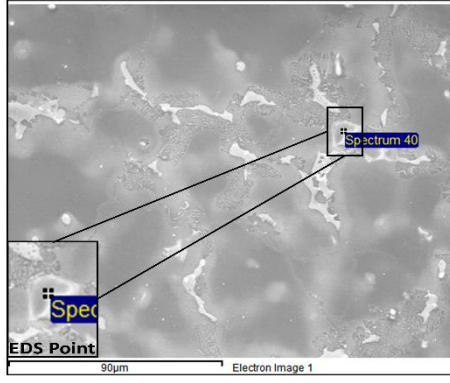
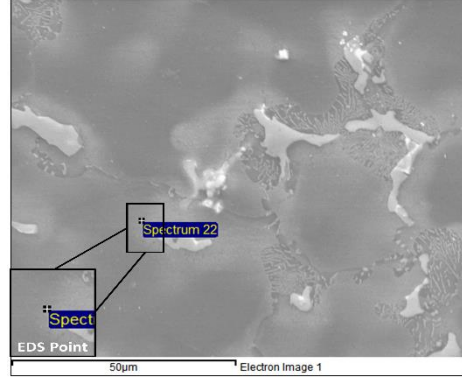
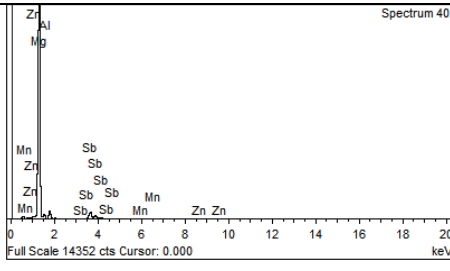
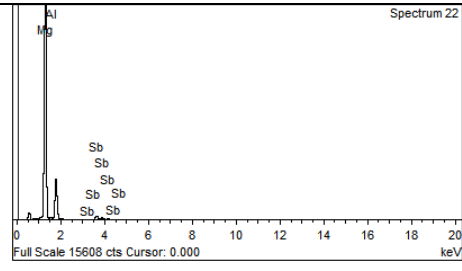
AZ91 alaşımına %0.2 Sb ilavesi ile Şekil 6. α matris fazının ve β intermetalik fazının hem yakın çevrelerinde hem de içlerinde küçük miktarlarda Mg_3Sb_2 intermetalik fazının oluştuğu gözlenmiştir (Boby et al., 2015). Ayrıca, Guangyin ve ark. (Guangyin et al., 2000) TEM'de XEDS ve SAD modeli kullanılarak 0.15, 0.35 ve 0.7 Sb (ağr. %) ile AZ91 alaşımında Mg_3Sb_2 fazı oluşumunu rapor etmişlerdir. Çalışmamızda da Mg_3Sb_2 fazı hızlı soğumanın (C kademesi) etkisiyle çok daha ince bir yapıya dönüştüğü tespit edilmiştir.



Şekil 7. AZ91+%0.5 Sb alaşımının EDS analiz sonuçları.

AZ91'e ilave edilen Sb element miktarı %0.5 oranına çıkartıldığında ise Şekil 7'de Mg_3Sb_2 intermetalığının belirginleştiği fakat ince bir hal aldığı gözlenmiştir. Ayrıca β intermetalik fazının oldukça ince bir hal almasıyla birlikte β fazının tane ve ötektik fazın sayısını arttırdığı gözlenmiştir (Wang et al., 2001).

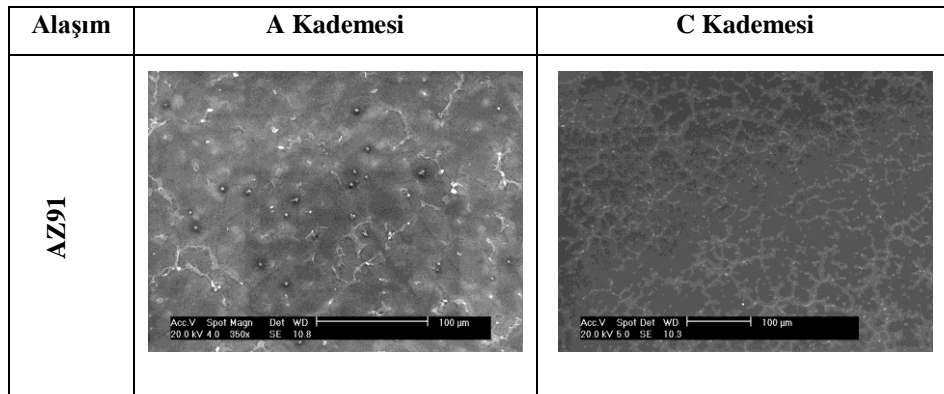
AZ91+%1.0 Sb					
A Kademesi			C Kademesi		
Element	Ağırlık%	Atomik%	Element	Ağırlık%	Atomik%
Mg (K)	80.18	91.42	Mg (K)	78.54	87.58
Al (K)	4.84	4.97	Al (K)	10.69	10.43
Mn (K)	0.00	0.00	Sb (L)	10.77	1.99
Zn (K)	1.03	0.44			
Sb (L)	13.95	3.18			

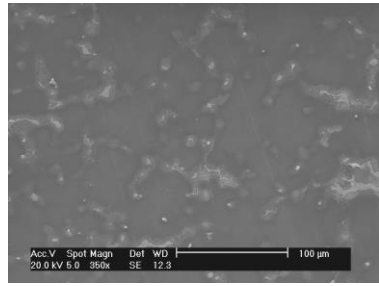
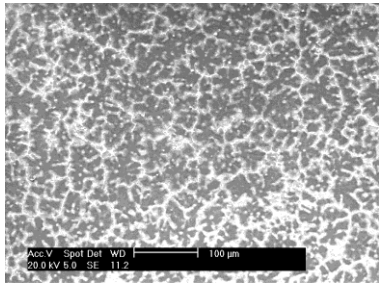
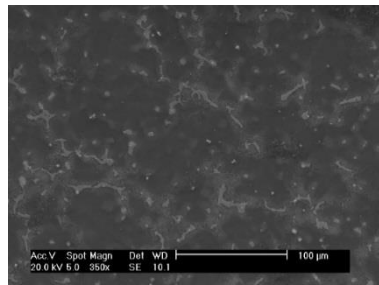
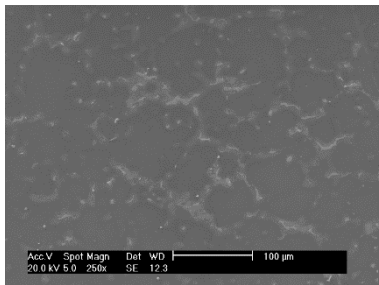
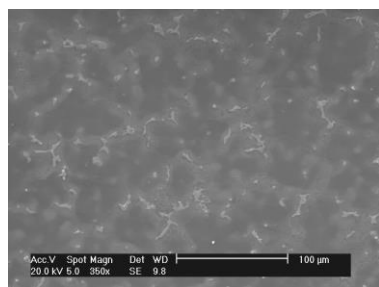
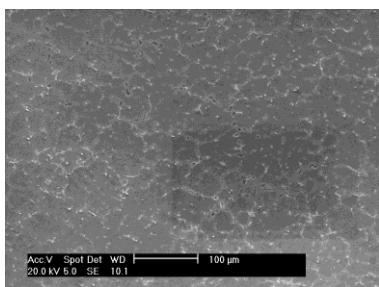
Şekil 8. AZ91+%1.0 Sb alaşımlarının EDS analiz sonuçları.

Sb ilavesi %1.0 oranına ulaştığında ise Şekil 8'de Sb ilavesinin 0.2 ve 0.5 oranındaki ilaveler sonucu yapıda görülen değişiklikler daha belirgin hale geldiği gözlenmiştir (Wang et al., 2001). Dolayısıyla β intermetalik fazının ve ötektik fazının etrafında meydana gelen Mg_3Sb_2 fazı daha ince bir hal aldığı tespit edilmiştir (Wang et al., 2001).

Soğuma hızının etkisiyle AZ91 ve alaşımlarının A kademesinden C kademesine doğru tane yapısının küçüldüğü ve tane sınırlarının incelendiği görülmüştür (Şekil 9). Sb katkısının ise alaşımların mikro yapısında tane sınırlarının ağ örgüsü şeklinde ki yapısını parçaladığı gözlenmiştir. Dolayısıyla yavaş soğuma (A kademesi) şartlarında düzenli bir yapının geliştiği ve hızlı soğuma şartlarında (C kademesi) ise daha düzensiz bir yapının oluştuğu gözlenmiştir. Farklı literatür çalışmalarında da Mg alaşımlarının döküm sıcaklığı, et kalınlığı ve soğuma eğrisi gibi parametrelerinin farklı olması ile mikro yapılarda tane boyutu ve tane yapısı değerlerinde farklılık olduğu bulunmuştur (Hu et al., 2016; Laukli et al., 2003; Nave et al., 2000; Unal, 2014).



Şekil 9. AZ91 ve alaşımlarının SEM görüntüleri.

Alaşım	A Kademesi	C Kademesi
AZ91+%0.2 Sb		
AZ91+%0.5 Sb		
AZ91+%1.0 Sb		

şekil 9 (devam). AZ91 ve alaşımlarının SEM görüntüleri.

Mg_3Sb_2 fazı esas olarak Sb'nin Mg 'deki düşük katı znrlğ ve katılaşma sırasında Al ile Sb taşıyan fazın olmaması nedeniyle meydana gelmiştir (Boby et al., 2015). Balasubramani ve diğ. (Balasubramani et al., 2007), Mg_3Sb_2 fazının znme sıcaklığının, AZ91 alaşımının sıvılaşma sıcaklığının üstündeki 615oC olduğunu bildirmişlerdir. Bu, Mg_3Sb_2 fazının termal olarak daha kararlı olduğunu, dolayısıyla heterojen bir ekirdekleme merkezi olarak işlev gördüğünü ve tane boyutunu iyileştirmeye yardımcı olduğunu doğrulamaktadır (Boby et al., 2015).

5. Mekanik Test Sonuçları

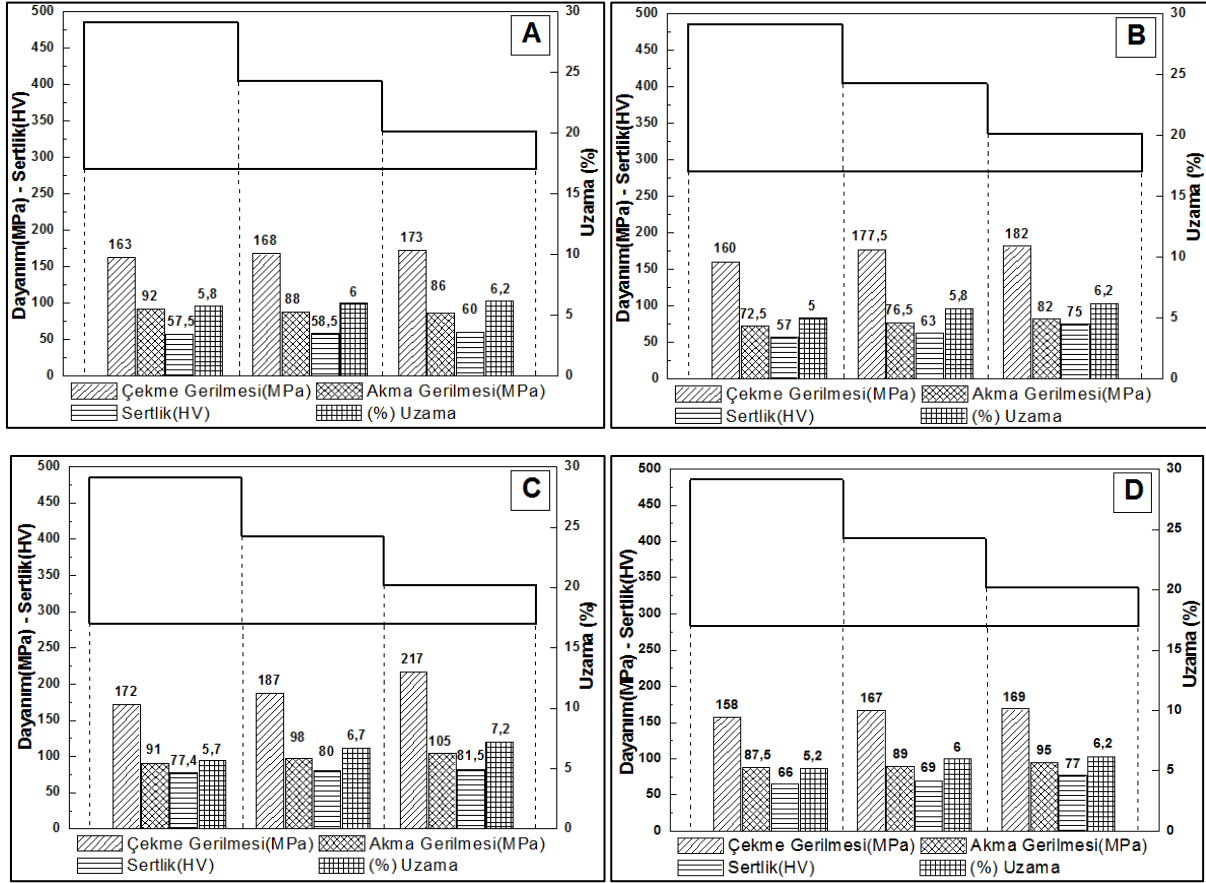
Master alaşım ve diğer alaşımlar üzerine yapılan çekme ve sertlik testleri sonuçları birleşik şekilde şekil 10'da sırasıyla verilmiştir. Mekanik özelliklerde şekil 10 (A) incelendiğinde AZ91 alaşımının kademeli döküm parçanın kesit kalınlığına bağlı olarak hızlı soğuması (A kademesinden C kademesine) ile çekme geriliminin ve sertliğin kademeli olarak arttığı gözlemlenmektedir.

AZ91 alaşımına Sb ilavesi ile yapı içerisinde Mg_3Sb_2 fazı oluşmuştur. Ayrıca Sb ilavesi β - $Mg_{17}Al_{12}$ fazının dağılımını, gelişimini ve sürekli liğini de azalttığı gözlenmiştir. Boby ve ark. (Boby et al., 2015) Sb ilavesiyle önemli tane inceltme işlemi yapan, Mg matrisi için etkili bir ekirdekleme merkezi olarak hareket eden Mg_3Sb_2 fazının varlığına bağlı olduğunu rapor etmişlerdir. Bu bağlamda Sb ilavesi ile küçülen tane yapısından dolayı taneler arası çekim kuvvetinin yüksek olmasından dolayı da özellikle çekme değerliğinin Sb ilavesinin artışıyla kayda değer bir artış gösterdiği saptanmıştır.

şekil 10(B) incelendiğinde, AZ91'e %0.2 Sb ilavesi ile yapı içerisinde Mg_3Sb_2 intermetalik fazını oluşturmuş fakat ince keltiller halinde yapıya dağılmıştır. Yapıya dağılmış olan bu fazın dislokasyon hareketlerini engellediği ve de buna bağlı olarak çekme değerliğinde artışa sebep olduğu tespit edilmiştir ve literatür de (Boby et al., 2015) benzer durumlar rapor edilmiştir. Ayrıca Sirinivasan ve ark. (Srinivasan et al., 2005; Srinivasan et al., 2010) yapmış oldukları çalışmalarda Sb ilaveli AZ91 alaşımlarının hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıkta gerilme özelliklerinin iyi olduğu ve plastik deformatsyonu arttırdığını rapor etmiştir.

AZ91 alaşımına %0.5 Sb ilavesinin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 10(C) incelendiğinde, çok yüksek bir çekme dayanımının yanı sıra aynı şekilde optimum akma ve sertlik değerliklerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Wang ve ark. (Wang et al., 2001) yapmış oldukları çalışmada %0.5 Sb içeriğine sahip AZ91 alaşımının yüksek gerilme mukavemeti ve uzamasına sahip olduğunu rapor etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise (Boby et al., 2015), Sb ilavesi ile tane boyutu 106 μm 'den 76 μm 'ye düştüğü ve bu sayede ağırlıkça %0.5 Sb ilavesi olan AZ91 alaşımı için optimum gerilme özellikleri elde edildiği, mekanik özelliklerindeki artışlar temel olarak tane küçültme ve çökeltme kuvvetlendirmesinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (Srinivasan et al., 2010). Dolayısıyla yapılan bu çalışmada elde edilen sonuçlar literatürle paralellik göstermektedir.

Sb oranının %1.0'e ulaşması ile AZ91 alaşımının mekanik özellikleri üzerine etkisi incelendiğinde Şekil 10(D), Sb miktarının artmasıyla (%1.0 ve üzerinde) daha belirgin hale gelen Mg_3Sb_2 fazının miktarı da belirgin bir şekilde artış göstererek matrisin dağılmasını sağlar ve buda gerilme mukavemeti ile uzama değerinin düşmesine sebep olur (Polmear, 1989; Westengen & Rashed, 2016). %0.5 Sb ilaveli alaşıma göre daha düşük değerlerde gerilme mukavemeti ve uzamaya sahip olduğu tespit edilmiştir ve yapılan diğer çalışmalar ile paralellik göstermektedir (Unal, 2014; Wang et al., 2001).



Şekil 10. AZ91 ve alaşımlarının mekanik özellikleri (A) AZ91, (B) AZ91+%0.2 Sb, (C) AZ91+%0.5 Sb, (D) AZ91+%1.0 Sb.

6. Bulgular ve Değerlendirme

Yapılan çalışmanın neticesinde, AZ91 alaşımında soğuma hızı taneler ve tane sınırları için önemli bir durum olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla soğuma hızının artması ile ince kademede tanelerin küçüldüğü ve tane sınırlarının da daha ince bir hal aldığı tespit edilmiştir. Böylelikle mikro yapıda görülen bu değişim neticesinde AZ91'in mekanik özelliklerinde bir artışın olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır. Deneysel sonuçlar neticesinde AZ91'in özellikle çekme değerlerinde soğuma hızına bağlı olarak (A kademesinden C kademesine), çekme dayanımında 163 MPa'dan 173 MPa'a bir artışın söz konusu olduğu tespit edilmiştir.

AZ91 alaşımına ilave edilen %0.2 değerinde Sb alaşımında ise mekanik özelliklerde dikkate değer bir artış sergilediği deneysel olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla çekme değeri soğuma hızına da bağlı olarak (A kademesinden C kademesine) 160 MPa dan 182 MPa'a, akma değeri 72,5 MPa dan 82 MPa'a, sertlik değeri 57 HV'dan 75 HV'a kadar ulaşmıştır. Uzama değeri ise yaklaşık olarak %25 artış gösterdiği tespit edilmiştir.

Mekanik özelliklerde en iyi sonuçları AZ91'e %0.5 oranında Sb ilave edilen alaşım vermiştir. Soğuma hızına da bağlı olarak (A kademesinden C kademesine) çekme dayanımı 172 MPa'dan 217 MPa'a, akma değeri ise 91 MPa'dan 105 MPa'a ulaşırken, sertlik değeri 77,4 HV'dan 81,5 HV'a, %uzama değeri de 5,7'den yaklaşık %27'lik bir artışla 7,2 ye ulaşmıştır.

İlave edilen Sb miktarı %1.0 oranına çıkartıldığında ise mekanik özelliklerde, %0.5 Sb ilavesine kıyasla bir düşüşün olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak hızlı soğumanın da (A kademesinden C kademesine) etkisi ile çekme değeri 158 MPa ile 169 MPa

aralığında seyretmiştir. Akma dayanımı ise 87,5 MPa dan 95 MPa'a ulaşabilmiştir. Sertlik değeri 66 HV'tan 77 HV'a çıkmış ve son olarak %uzama değeri ise 5,2'den yaklaşık olarak %20'lik bir artış göstererek 6,2 değerine ulaşmıştır.

7. Sonuç ve Öneriler

Genel olarak AZ91 mikro yapısının α -Mg ana matrisi ve β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazlarından oluştuğu gözlenmiştir. Soğuma hızının artması mikroyapı morfolojisinde önemli değişimlere sebep olmuştur. Hızlı soğumada tane yapısı incelirken yavaş soğuma şartlarında ise daha kaba bir hal aldığı gözlenmiştir. Sb ilavesinin sonucunda ise, %1.0 oranına kadar optimum mekanik değerler elde edildiği ve özellikle de %0.5 Sb ilaveli alaşımda mekanik özellikleri oldukça yüksek değerlere taşıdığı gözlenmiştir ve Sb miktarının artışı ile birlikte mekanik özelliklerde gerilemenin başladığı gözlenmiştir.

Kullanım alanı olarak, özellikle %0.5 Sb ilaveli AZ91 alaşımı iyi mekanik özelliklere sahip olması nedeniyle hava araçlarının dayanım gerektiren muhtelif yerlerinde kullanımının uygun olabileceği önerilebilir. Bununla birlikte otomobillerde de güç aktarma parçaları gibi spesifik ve dayanım gerektiren kısımlarında kullanılabileceği önerilebilir.

AZ91 alaşımının Sb ile olan alaşımlama sayıları daha fazla artırılabilir. Yapılmış olan çalışma sonucunda elde edilen numunelere homojenleştirme ve çökelti sertleşmesi sonrası gibi işlemler ile mekanik özelliklerin değişimi incelenmesi önerilebilir.

Referanslar

Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 948-963. doi:10.1016/j.msec.2016.06.020

Ali, Y., Qiu, D., Jiang, B., Pan, F., & Zhang, M.-X. (2015). Current research progress in grain refinement of cast magnesium alloys: a review article. *Journal of Alloys and Compounds*, 619, 639-651. doi:10.1016/j.jallcom.2014.09.061

Balasubramani, N., Srinivasan, A., Pillai, U., & Pai, B. (2007). Effect of Pb and Sb additions on the precipitation kinetics of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 457(1-2), 275-281. doi:10.1016/j.msea.2006.12.132

Bamberger, M. (2013). Structural refinement of cast magnesium alloys. *Materials Science and Technology*, 17(1), 15-24. doi:10.1179/026708301101509061

Barber, L. P. (2004). Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys. (MS), Worcester Polytechnic Institute, (etd-12234-112022)

Boby, A., Srinivasan, A., Pillai, U. T. S., & Pai, B. C. (2015). Effect of Sb, Sn and Pb additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 alloy. Paper presented at the Materials Science Forum.

Carbonneau, Y., Couture, A., Van Neste, A., & Tremblay, R. (1998). On the observation of a new ternary MgSiCa phase in Mg-Si alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(6), 1759-1763.

Čížek, L., Greger, M., Dobrzański, L., Juříčka, I., Kocich, R., Pawlica, L., & Tański, T. (2006). Mechanical properties of magnesium alloy AZ91 at elevated temperatures. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 18(1-2), 203-206.

Çiçek, B., Ahlatçı, H., & Sun, Y. (2013). Wear behaviours of Pb added Mg-Al-Si composites reinforced with in situ Mg₂Si particles. *Materials & Design*, 50, 929-935. doi:10.1016/j.matdes.2013.03.097

Çiçek, B., & Sun, Y. (2012). A study on the mechanical and corrosion properties of lead added magnesium alloys. *Materials & Design*, 37, 369-372. doi:10.1016/j.matdes.2012.01.029

Ding, Y., & Ju, D. (2018). Finite Element Analysis of Residual Stress in the Diffusion Zone of Mg/Al Alloys. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018.

Falcon, L., Bedolla, B., Lemus, J., Leon, C., Rosales, I., & Gonzalez-Rodriguez, J. (2011). Corrosion behavior of Mg-Al/TiC composites in NaCl solution. *International Journal of Corrosion*. doi:10.1155/2011/896845

Gaines, L., Cuenca, R., Wu, S., & Stodolsky, F. (1996). Potential automotive uses of wrought magnesium alloys. Paper presented at the Conference: 2. Argonne National Laboratory technical women's symposium, Argonne, IL (United States), 29-30 Apr 1996; Other Information: PBD: [1996].

Gray, J., & Luan, B. (2002). Protective coatings on magnesium and its alloys—a critical review. *Journal of Alloys and Compounds*, 336(1-2), 88-113.

- Guangyin, Y., Yangshan, S., & Wenjiang, D. (2000). Effects of Sb addition on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Scripta Materialia*, 43(11), 1009-1013.
- Guangyin, Y., Yangshan, S., & Wenjiang, D. (2001). Effects of bismuth and antimony additions on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 308(1-2), 38-44.
- Hu, L., Chen, D., Shi, F., Chen, S., & Meng, Q. (2016). Effect of die-casting cooling rate on the chemical conversion treatments of AZ91D magnesium alloy. *International Journal of Cast Metals Research*, 29(6), 355-361.
- Jiang, J., Wang, Y., Qu, J., Du, Z., Sun, Y., & Luo, S. (2010). Microstructure evolution of AM60 magnesium alloy semisolid slurry prepared by new SIMA. *Journal of Alloys and Compounds*, 497(1-2), 62-67.
- Kazdal, H. (1999). *Magnezyum Alaşımları: Otomotiv Endüstrisinde Uygulaması ve Geleceği*. Tubitak, Marmara Araştırma Merkezi, Kocaeli, 3-39.
- Laukli, H., Lohne, O., Sannes, S., Gjestland, H., & Arnberg, L. (2003). Grain size distribution in a complex AM60 magnesium alloy die casting. *International Journal of Cast Metals Research*, 16(6), 515-521.
- Lee, S., Lee, S. H., & Kim, D. H. (1998). Effect of Y, Sr, and Nd additions on the microstructure and microfracture mechanism of squeeze-cast AZ91-X magnesium alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 29(4), 1221-1235.
- Lee, Y., Dahle, A., & StJohn, D. (2000). The role of solute in grain refinement of magnesium. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31A(11), 2895-2906. doi:10.1007/BF02830349
- Mordike, B., & Ebert, T. (2001). Magnesium: properties—applications—potential. *Materials Science and Engineering: A*, 302(1), 37-45. doi:10.1016/S0921-5093(00)01351-4
- MÖ, P. (1992). Magnesium alloying, some potentials for alloy development. *Journal of Japan Institute of Light Metals*, 42(12), 679-686.
- Nave, M., Dahle, A., & StJohn, D. (2000). The effect of solidification rate on the structure of magnesium-aluminium eutectic grains. *International Journal of Cast Metals Research*, 13(1), 1-7.
- Park, W., Park, H., Kim, D., & Kim, N. J. (1994). Structure and decomposition behaviour of rapidly solidified Mg Nd X (X, Al, Si) Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 179, 637-640.
- Pekguleryuz, M. O., & Kaya, A. A. (2003). Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications. *Advanced engineering materials*, 5(12), 866-878. doi:10.1002/adem.200300403
- Polmear, I. (1989). *Light alloys- Metallurgy of the light metals*.
- Polmear, I. (1996). Recent developments in light alloys. *Materials transactions, JIM*, 37(1), 12-31.
- Song, G., & Song, S. (2007). A possible biodegradable magnesium implant material. *Advanced engineering materials*, 9(4), 298-302. doi:10.1002/adem.200600252
- Srinivasan, A., Pillai, U., & Pai, B. (2005). Microstructure and mechanical properties of Si and Sb added AZ91 magnesium alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36(8), 2235-2243.
- Srinivasan, A., Swaminathan, J., Gunjan, M., Pillai, U., & Pai, B. (2010). Effect of intermetallic phases on the creep behavior of AZ91 magnesium alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 527(6), 1395-1403.
- Staiger, M. P., Pietak, A. M., Huadmai, J., & Dias, G. (2006). Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review. *Biomaterials*, 27(9), 1728-1734. doi:10.1016/j.biomaterials.2005.10.003
- Suh, J., Victoria-Hernandez, J., Letzig, D., Golle, R., Yi, S., Bohlen, J., & Volk, W. (2015). Improvement in cold formability of AZ31 magnesium alloy sheets processed by equal channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 286-293. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.11.029
- Unal, M. (2008). *An investigation of casting properties of magnesium alloys*. (Ph. D. Thesis), Gazi University, Ankara, Turkey. (212936)
- Unal, M. (2014). Effects of solidification rate and Sb additions on microstructure and mechanical properties of as cast AM60 magnesium alloys. *International Journal of Cast Metals Research*, 27(2), 80-86. doi:10.1179/1743133613Y.0000000082

Wang, Q., Chen, W., Ding, W., Zhu, Y., & Mabuchi, M. (2001). Effect of Sb on the microstructure and mechanical properties of AZ91 magnesium alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(13), 787-794.

Westengen, H., & Rashed, H. (2016). *Magnesium Alloys: Alloy and Temper Designation System*: Elsevier.

Witte, F., Ulrich, H., Rudert, M., & Willbold, E. (2007). Biodegradable magnesium scaffolds: Part 1: appropriate inflammatory response. *Journal of biomedical materials research Part A*, 81(3), 748-756. doi:10.1002/jbm.a.31170

Wolff, M., Schaper, J., Dahms, M., Ebel, T., Kainer, K., & Klassen, T. (2014). Magnesium powder injection moulding for biomedical application. *Powder Metallurgy*, 57(5), 331-340. doi:10.1179/1743290114Y.0000000111

Zhang, Z. (2000). Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications. (Doctoral Thesis), Genie Universities, Quebec-Canada.