



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Gd ve Y ilave edilmiş AZ31 magnezyum alaşımına ekstrüzyon ve çok yönlü dövme prosesinin etkisi

The effect of extrusion and multidirectional forging processes on Gd and Y added AZ31 magnesium alloy

Yazar(lar) (Author(s)): Osman ÖZDAMAR¹, Mehmet YETMEZ², Yunus TÜREN³, Engin KOCAMAN⁴, Hamdi Alper ÖZYİĞİT⁵

ORCID¹: 0000-0001-6353-6812

ORCID²: 0000-0001-9120-1673

ORCID³: 0000-0001-8755-1865

ORCID⁴: 0000-0001-5617-3064

ORCID⁵: 0000-0002-2862-1752

To cite to this article: Ozdamar O., Yetmez M., Turen Y., Kocaman E. and Hamdi A. O., “Gd ve Y ilave Edilmiş AZ31 Magnezyum alaşımına Ekstrüzyon ve Çok Yönlü Dövme Prosesinin Etkisi”, *Journal of Polytechnic*, 28(2): 617-625, (2025).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Osman Ö., Yetmez M., Kocaman E ve Hamdi A O., “Gd ve Y ilave Edilmiş AZ31 Magnezyum alaşımına Ekstrüzyon ve Çok Yönlü Dövme Prosesinin Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 28(2): 617-625, (2025).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1511557

Gd ve Y ilave Edilmiş AZ31 Magnezyum alaşımına Ekstrüzyon ve Çok Yönlü Dövme Prosesinin Etkisi

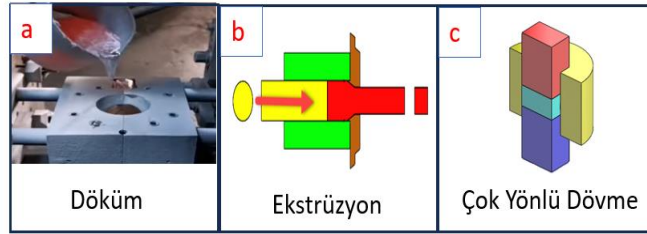
The Effect of Extrusion and Multidirectional Forging Processes on Gd and Y Added AZ31 Magnesium Alloy

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ AZ31 Mg alaşımına Gadolinyum (Gd) ile İttriyum (Y) eklenerek yeni bir alaşım oluşturulmuştur. A new alloy has been created by adding Gadolinium(Gd) and Yittriyum(Y) to the AZ31 Mg alloy.
- ❖ Ekstrüzyon yapılan numunelere çok yönlü dövme prosesi uygulanmıştır. Samples that extruded were subjected to a multi-directional forging process.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Gd ve Y Nadir toprak elementi ilave edilen AZ31 Mg alaşımına Ekstrüzyon sonrası çok yönlü dövme prosesi uygulanmıştır. Gd and Y Rare Eearth elements were added to AZ31 Mg alloy. Then, multi directional forging(MDF) was applied after extrusion.



Şekil. Çalışmanın Şematik gösterimi a) Döküm b) Ekstrüzyon d) Çok Yönlü Dövme /

Figure. Schematic representation of the study a) Casting b) Extrusion c) MDF

Amaç (Aim)

Gd ve Y Nadir Toprak Elementi ilave edilmiş AZ31 Mg alaşımına, ekstrüzyon sonrası çok yönlü dövmenin etkisi incelenmiştir. (The effect of multi-directional forging after extrusion on AZ31 Mg alloy with added Gd and Y Rare Earth elements was investigated.)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Dökülen numuneler homojenleştirilip kare forma ekstrüze edilmiştir. Ardından çok yönlü dövme prosesi uygulanmıştır. The cast samples were homogenized and extruded into a square form. Subsequently, the multi-directional forging process was applied.

Özgünlük (Originality)

Gd ve Y Nadir Toprak elementlerinin Mg alaşımlarına olumlu etkileri ve ekstrüzyon sonrası çok yönlü dövmenin mekanik özellikleri iyileştirdiği bilinmektedir. Bu süreçlerin birleştirilmesiyle özgün bir çalışma gerçekleştirilmiştir. The positive effects of Gd and Y Rare Eearth elements on Mg alloys and the improvement of mechanical properties through multi-directional forging after extrusion are well known. This unique study combines these processes.

Bulgular (Findings)

Gd ve Y'un mikroyapıda $(Mg,Al)_3Gd$ ve $Mg_{24}Y_5$ gibi intermetalik fazların oluşumunu teşvik ederken tane boyutun küçülmüştür. Gd and Y promoted the formation of intermetallic phases such as $(Mg,Al)_3Gd$ and $Mg_{24}Y_5$ in the microstructure while reducing the grain size.

Sonuç (Conclusion)

%0.5 Gd ve %0.5Y eklenen numunelerin sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinin diğer numunelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Samples with 0.5% Gd and 0.5%Y addition showed higher hardness, yield strength, and tensile strength compared to other samples.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards) Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Gd ve Y İlave Edilmiş AZ31 Magnezyum alaşımına Ekstrüzyon ve Çok Yönlü Dövme Prosesinin Etkisi

Araştırma Makalesi / Research Article

Osman ÖZDAMAR¹, Mehmet YETMEZ^{2*}, Yunus TÜREN³, Engin KOCAMAN², Hamdi Alper ÖZYİĞİT⁵

^{1,*}Bilecik Şeyh Edebali University. Vacational School of Osmaneli, Bilecik, Turkey

²Zonguldak Bulent Ecevit University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Zonguldak, Turkey

³Necmettin Erbakan University, Engineering Faculty, Department of Mechanical Engineering, Konya, Turkey

⁵İstanbul Gelişim University, Faculty of Engineering, and Architecture, Department of Mechatronics Engineering, İstanbul, Turkey

(Geliş/Received : 06.07.2024 ; Kabul/Accepted : 07.08.2024 ; Erken Görünüm/Early View : 03.09.2024)

ÖZ

Bu çalışmada AZ31 Magnezyum alaşımına %0,5 ve %1 oranlarında Gadolinium ile İttriyum Nadir Toprak Elementi kullanılarak yeni bir alaşım oluşturulmuştur. Oluşan bu alaşıma 375°C ekstrüzyon yapıldıktan sonra 400°C kapalı kalıpta çok yönlü dövme işlemi gerçekleştirilmiştir. Alaşım bileşenlerinin mikroyapıdaki değişime etkisi ve bunların mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Çalışmada iri taneli bir yapıya sahip AZ31 döküm alaşımına ilave edilen nadir toprak elementleri ve uygulanan mekanik işlemlerin mikroyapıda etkili olduğu tespit edilmiştir. Alaşımına ilave edilen Gd ve Y'un mikroyapıda (Mg,Al)₃Gd ve Mg₂₄Y₅ gibi intermetalik fazların oluşumunu teşvik ederken tane boyutunda önemli bir azalmaya neden olmuştur. Alaşıma kütlece %0.5 Gd ve %0.5Y Nadir Toprak Elementlerinin ilavesiyle elde edilen numunelerin sertlik, akma ve çekme mukavemetlerinin diğer döküm ve %1Gd ve %1Y ilavesiyle elde edilen değerlerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Öte yandan döküm AZ31 alaşımına uygulanan mekanik işlemlerin tane boyutunu azalttığı ve mekanik özellikleri artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: AZ31, Magnezyum, Gadolinium, İttriyum, Çok Yönlü Dövme, Ekstrüzyon

The Effect of Extrusion and Multidirectional Forging Processes on Gd and Y Added AZ31 Magnesium Alloy

ABSTRACT

In this study, a new alloy was created by adding 0.5% and 1% Gadolinium and Yttrium Rare Earth Elements to AZ31 Magnesium alloy. After extruding this alloy at 375°C, closed die multidirectional forging was performed at 400°C. The effect of alloy components on the microstructural change and their impact on mechanical properties were investigated. It was determined that the Rare Earth Elements added to the AZ31 cast alloy with a coarse-grained structure and the mechanical processes applied were effective in the microstructure. The addition of Gd and Y to the alloy promoted the formation of intermetallic phases such as (Mg,Al)₃Gd and Mg₂₄Y₅ in the microstructure, leading to a significant reduction in grain size. It was found that the samples obtained by adding 0.5% Gd and 0.5Y Rare Earth Elements to the alloy had higher hardness, yield strength, and tensile strength values compared to the cast and 1%Gd and 1%Y addition values. On the other hand, it was determined that the mechanical processes applied to the cast AZ31 alloy reduced the grain size and improved the mechanical properties.

Keywords: AZ31, Gadolinium, Yttrium, Multi Directional Forging, Extrusion

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde karbon salınımının azaltılması konusunda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu noktada ulaşım araçlarında ortaya çıkan emisyonların azaltılması kritik bir öneme sahiptir. Bu araçların mekanik özelliklerinde bir azalma olmadan ağırlığının azaltılması hedeflenmektedir. Hafifliğin sağlanması için çözüm noktasını düşük özgül ağırlığı ile diğer mühendislik malzemelerinden ayrılan magnezyum alaşımları oluşturmaktadır. Metallerin içerisinde Magnezyum (Mg) en hafif yapısal metal olup Alüminyum (Al)'den %35, çelikten %78 daha hafiftir. Magnezyum alaşımları altıgen sıkı paket (HCP) yapısı nedeniyle zayıf plastik

şekillendirme kabiliyetine ve düşük mukavemete sahip olması magnezyum ve alaşımlarının dezavantajı olarak söylenebilir [1-3]. Bu sebeple magnezyumun taşıt parçalarında kullanımı için mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir[4, 5]. Magnezyumun mekanik özellikleri kimyasal kompozisyonun değiştirilmesi ile geliştirilebilir. Ayrıca mekanik/termo mekanik işlemlerle de özelliklerinde iyileşme sağlanabilir [6, 7]. Aşırı Plastik Deformasyon (SPD) yöntemleri malzemelerin mukavemetini arttırmak için son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır[8]. Bu yöntemler genel olarak tane boyutunu küçültür ve Hall-Petch ilişkisine göre, tane boyutunun küçülmesinin

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : osman.ozdamar@bilecik.edu.tr

malzemenin akma dayanımını arttırdığı bilinmektedir [9]. Malzemede tane incelmeye düşük sıcaklıklarda mukavemetin artmasına neden olurken, yüksek sıcaklıklarda malzemeyi daha iyi şekillendirilebilir hale getirir [10]. Mg hekzagonal kristal kafes yapısına sahip bir malzeme olduğu için oda sıcaklığında şekillendirilmesi zordur ve 150 °C altında şekil değişimine karşı yüksek direnç göstermektedir [11]. Bu sebeple magnezyum alaşımlarına 200°C ve üzerinde dövme (F), ekstrüzyon (E), eşit kanal açılmal presleme (ECAP), yüksek basınçlı burulma (HPT), çok yönlü dövme (MDF), birikimli rulo yapıştırma (ARB) vb. gibi SPD yöntemler uygulanarak mukavemeti artırılmaktadır [12-14]. Farklı proseslerin birleştirilerek kullanımı ile yapılan mekanik işlemler günümüzde araştırmacılar tarafından yoğun ilgi görmektedir. Nadir toprak elementlerinin, Mg alaşımlarının fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirmede etkili olduğu bilinmektedir [15-17]. Ayrıca ekstrüzyon, dövme ve haddeleme gibi işlemler uygulanan magnezyum alaşımlarına ilave edilen nadir toprak elementlerinin mekanik işlemlerden elde edilen performansa katkı sağladığı rapor edilmiştir [18-20]. Son yapılan çalışmalarda magnezyum alaşımlarına ilave edilen Gd ve Y'un alaşımın özelliklerini geliştirmede oldukça etkili olduğu görülmüştür [21, 22]. Mg-Gd bazlı alaşımlar çökeltme sertleştirme yoluyla yüksek dayanıma ulaşma konusundaki muazzam potansiyelleri dikkat çekmektedir. Literatürde Gd ve Y elementlerinin Mg üzerindeki etkilerinin incelendiği çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Mg-14Gd-0.5Zr magnezyum alaşımına sıcak ekstrüzyon ve soğuk haddeleme sonrası yaşlandırma sonucu 295MPa Çekme Mukavemeti değerini 482MPa Çekme Mukavemeti değerine ulaştırmışlardır [23]. Zengin ve Türen tarafından yapılan çalışmada, ZK60-1Nd alaşımına ağırlıkça %0, 0.5, 1 ve 2 Y ilavesi ekledikten sonra ekstrüzyon işlemine tabi tutmuşlar %1 kadar Y ilavesi ile ortalama tane boyutunda önemli bir azalma görüldüğünü belirtmişlerdir [24]. Toscano ve arkadaşları yaptıkları çalışmada AZ31B magnezyum alaşımının açık kalıpta tek eksenli dövme işleminde malzemedeki tane incelmeye, bimodal tane yapısına sahip olduğu görülürken akma mukavemetinde %143, kopma mukavemetinde %23, artış görülmüştür [25]. Yapılan çalışmalar da 1 paso dövme işlemi ile 3 paso dövme işleminin malzemenin mekanik özelliklerine dikkate değer olumlu katkısı olduğunu belirtmişlerdir [26, 27]. Zhang ve ark. AZ80 magnezyum alaşımı 24 paso MDF işleminden sonra çekme mukavemeti %23.6, artarak 333.8MPa, akma mukavemeti %35.1 artarak 233.7MPa değerlere ulaşmıştır [28]. Zengin ve ark. yaptıkları çalışmada Mg-4Zn-1La magnezyum alaşımına yapılan ekstrüzyon işleminin sonucu olarak tane boyutu %81 oranında azaldığı alaşımda uzama %179, akma mukavemeti %90, çekme mukavemeti %40, oranında arttığı görülmüştür [29]. Gryguć ve ark. yaptıkları çalışmada ekstrüzyon edilmiş AZ31B magnezyum alaşımına dövme işlemi uygulamışlardır. AZ31B alaşımının ekstrüzyon durumunda yaklaşık 189MPa

akma mukavemeti ve %17 kopma uzaması olduğu gözlemlendi. Dövme işlemi yapıldıktan sonra, akma mukavemetinin 218MPa'ya ve kopma uzamasının %21'e arttığı tespit edildi. Ayrıca ekstrüzyon durumunda ortalama 32.5µm bimodal (farklı tane boyutuna sahip) tane boyutuna sahip iken dövme işleminden sonra ortalama 11.7µm homojen tane boyutuna sahip olduğu sergilenmiştir. Ekstrüde edilmiş malzemeyle karşılaştırıldığında tane boyutunda %64 bir azalma olduğu görülmüştür [30]. Karpavard ve ark. yaptıkları çalışmada, ekstrüde edilmiş ZK60 magnezyum alaşımına yarı kapalı kalıpta dövme işlemi uygulamışlardır. Dövme işlemi, ekstrüde edilmiş malzemedeki bimodal (farklı tane boyutuna sahip) tanelerin yassı tanelere dönüşmesine neden olmaktadır. Ekstrüde edilmiş durumdaki numuneler nihai sıkıştırma mukavemeti yarı kapalı kalıpta yapılan dövme işlemi nihai sıkıştırma mukavemeti %3 azalırken, dövme numunelerindeki kırılma gerinimi %28 artarak önemli bir iyileşme görülmüştür [31]. Literatürde bu alanda gerçekleştirilen çeşitli çalışmaların olduğu görülmektedir. Fakat AZ31 alaşımına nadir toprak elementi ilavesinin ve sonrasında uygulanan mekanik işlemlerin incelendiği çalışmaların kısıtlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu çalışmada döküm yöntemi ile üretilen AZ31 alaşımları içerisine ağırlıkça %0.5 ve %1 oranında İtiryum ve Gadolinyum ilave edilerek numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere sırasıyla ekstrüzyon sonrası çok yönlü dövme kullanılarak farklı proseslerde deformasyon işlemi uygulanmıştır. Elde edilen numunelerin mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

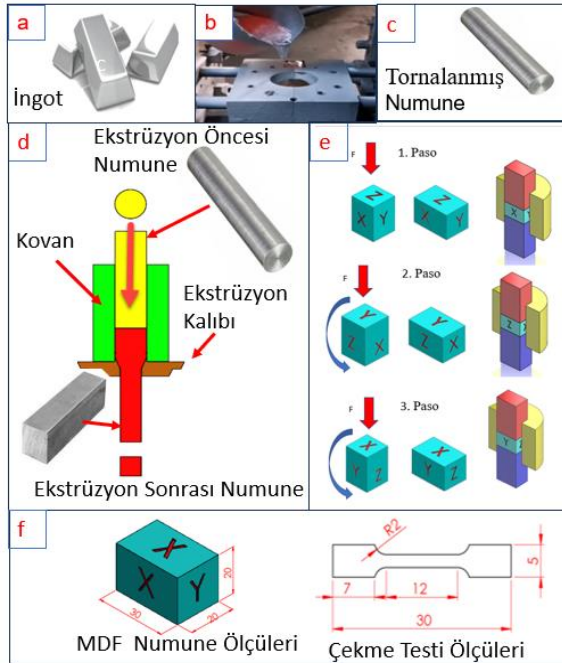
2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

AZ31 alaşımı içerisine Gd ve Y nadir toprak elementleri ilave edilerek döküm numuneler üretilmiştir. Bu numunelere uygulanan ekstrüzyon ve ekstrüzyon sonrası kapalı kalıpta çok yönlü dövme (MDF) işleminin alaşımın özellikleri üzerindeki etkileri döküm numuneler ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmada AZ31 Mg alaşımına %30 Mg-Gd ve %30 Mg-Y Master alaşımları ilave edilerek Çizelge 1'de verilen oranlara uygun döküm numuneler elde edilmiştir. Üretim prosesine ait şematik görünüm Şekil 1'de verilmiştir. Ergitme atmosfer kontrollü elektrik direnç ocağı kullanılarak 750 °C'de gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi 250 °C'de ısıtılmış kokil kalıplara CO₂+%1SF₆ koruyucu gaz atmosferinde yapılmıştır (Şekil 1-b). Döküm sonrası numuneler CNC torna kullanılarak Ø32mm silindirik (Şekil 1-c) olarak işlenmiş ve 350 °C'de 48 saat süre ile homojenleştirme işlemine tabi tutulmuştur. Silindirik numuneler 2 saat süre ile 375 °C sıcaklıkta tavlandıktan sonra 375 °C kalıp sıcaklığında 0.3 mm/s ekstrüzyon hızı [32, 33] ile 2.24 oranında ekstrüzyon edilerek 20x20 mm kare forma dönüşmüştür (Şekil 1-d). Ekstrüzyon sonrası 30 mm boyunda kesilen numunelere kapalı kalıpta çok yönlü dövme işlemi uygulanmıştır.

Çizelge 1. Çalışmanın kimyasal bileşeni (% ağı.). (The chemical composition of the work (% wt))

Numune	Mg	Al	Mn	Zn	Gd	Y
A1	Kalan	3.128	0.152	0.982	0	0
A2	Kalan	3.086	0.124	1.031	0.519	0.532
A3	Kalan	3.183	0.108	1.132	1.059	0.968

Dövme işlemi ısıya dayanıklı Molykote marka HTP kalıp yağlayıcısı kullanılarak 400°C kalıp sıcaklığında [31, 34, 35] sırasıyla X, Y ve Z yönlerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 1-e). Numuneler gerçekleşen her paso dövme işleminde bir önceki ölçülerine dönmüştür (Şekil 1-f).



Şekil 1. Çalışmanın Şematik Gösterimi a) AZ31, Gd, Y, İngot b) Döküm prosesi c) Tornalama prosesi d) Ekstrüzyon prosesi e) MDF prosesi f) MDF Numune ölçüleri (Schematic Representation of the Study a) AZ31, Gd, Y, Ingots b) Casting process c) Turning process d) Extrusion process e) MDF process f) MDF Sample dimensions.)

Deneysel çalışmada kullanılan ekstrüzyon ve kapalı dövme kalıpları Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi Bilgisayar Destekli Tasarım ve İmalat Laboratuvarında üretilmiştir. Ekstrüzyon ve dövme işlemleri Karabük Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarlarında bulunan özel yapım 30 Ton kapasiteli hidrolik preste gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin mikroyapısal incelemeleri optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda optik mikroskop olarak Leica M 1750 metal mikroskobu ve Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem marka taramalı elektron mikroskobu kullanılmıştır. Sertlik testleri, Shimadzu HMV-G21D model mikrosertlik cihazı kullanılarak on farklı noktadan ölçülmüştür. Şekil 1-f)'de verilen resimdeki ölçülere göre tel erezyon tezgahında kesilen numuneler mini

çekme kalıbına takılarak çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi ile ilgili standartlar, Şenel ve arkadaşları ile Kumar ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalardan belirlenmiştir [36-38]. Çekme testleri MTS (100kN Servohidrolik Dinamik Test Cihazı) marka cihaz kullanılarak 1 mm/sn çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı

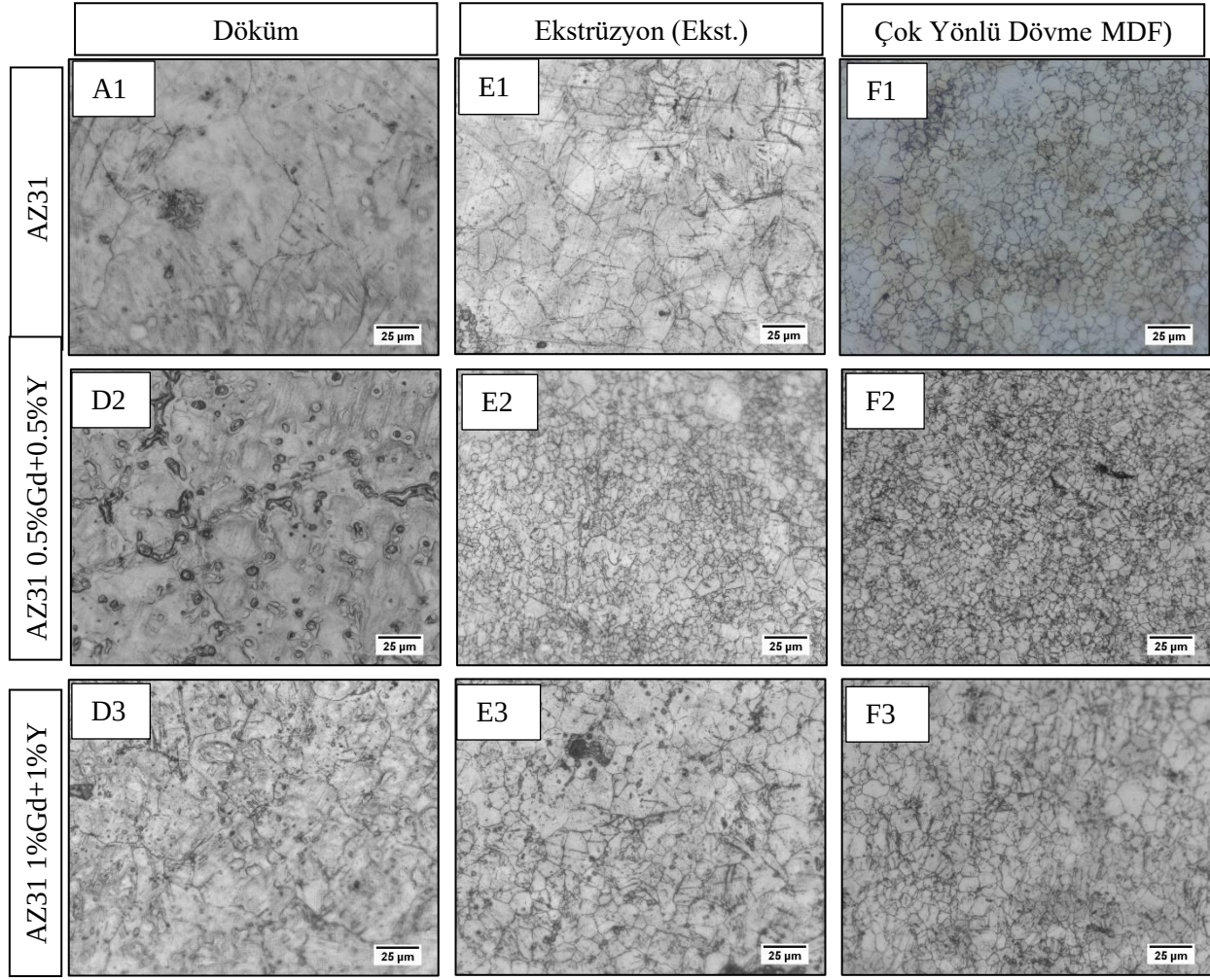
Çizelge 2 de deneysel çalışmada numunelerin sınıflandırılmasında kullanılan kodlama sistemi verilmiştir. Şekil 2'de deneysel çalışmalar kapsamında üretilen numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 2 A1'de AZ31 alaşımının tipik döküm mikroyapısı görülmektedir. Döküm mikroyapının kaba yapılı geniş dentritik tanelerden oluştuğu anlaşılmaktadır. AZ31 alaşımı içerisine %0.5 ve %1 oranında Gd ve Y ilave edilmesi ile döküm mikroyapısına nazaran daha eş eksenli bir yapının oluştuğu ve tane boyutunun azaldığı görülmektedir.

Çizelge 2. Numunelerin sınıflandırılması. (Classification of the Samples)

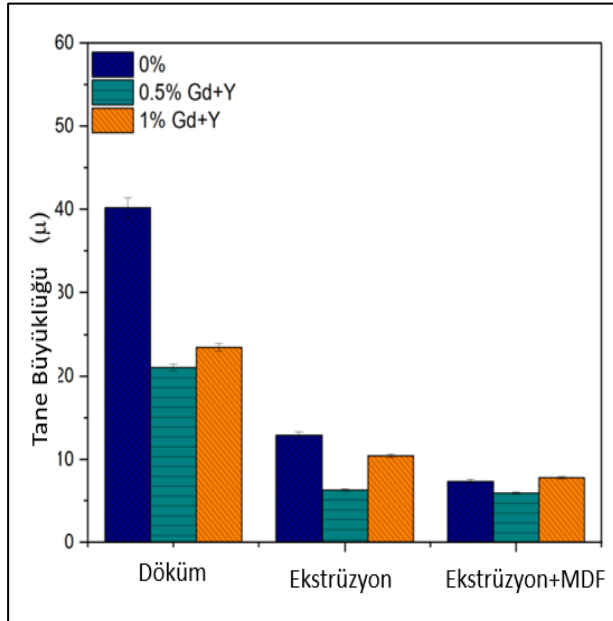
Kod	Numune	Proses
A1	AZ31	Döküm
A2	AZ31+%0.5Gd+%0.5Y	Döküm
A3	AZ31+%1Gd+%1Y	Döküm
E1	AZ31	Ekstrüzyon
E2	AZ31+%0.5Gd+%0.5Y	Ekstrüzyon
E3	AZ31+%1Gd+%1Y	Ekstrüzyon
F1	AZ31	Ekstrüzyon+MDF
F2	AZ31+%0.5Gd+%0.5Y	Ekstrüzyon+MDF
F3	AZ31+%1Gd+%0.5Y	Ekstrüzyon+MDF

Lineer intercept methodu kullanılarak gerçekleştirilen tane boyutu ölçüm sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. Tane boyutu ölçüm sonucuna göre de döküm AZ31 içerisine ilave edilen Gd ve Y ile tane boyutunda yaklaşık %50 oranında bir azalma olduğu anlaşılmaktadır. Literatürde gerçekleştirilen benzer çalışmalarda AZ31 alaşımı içerisine ilave edilen Gd'un daha ince taneli bir mikroyapıya neden olduğu rapor edilmiştir [39, 40]. Benzer bir durumun İtiryum için de geçerli olduğu bildirilmiştir [41]. Öte yandan döküm AZ31 alaşımına uygulanan ekstrüzyonun ve dövme işleminin tane boyutunu daha da azalttığı görülmektedir.

Ekstrüzyon işlemi sonucu mikroyapı eş eksenli tanelerden oluşan bir yapıya dönüşmüştür. Fakat tane boyutu dağılımı kararsızdır. Ekstrüzyon sonrası uygulanan dövme sonucu tane boyutunun daha da azaldığı anlaşılmaktadır. Hem ekstrüzyon hem de dövme işlemine maruz kalan AZ31 alaşımının mikroyapısında deformasyon izlerinin oluşumu net bir şekilde görülmektedir.



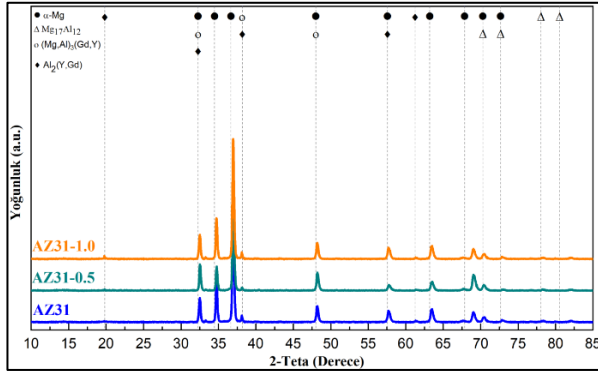
Şekil 2. Numunelerin mikro yapısı. (Microstructure of the samples)



Şekil 2. Numunelerin ortalama tane büyüklüğü. (Average grain size of samples)

Gd ilavesinin ise ekstrüzyon ve dövme numunelerin tane boyutunun azalmasına sebep olmuştur. İlave edilen Gd miktarının %0.5'ten %1'e çıkarılması ile tane boyutunda bir miktar artış gerçekleşmiştir. Fakat nadir toprak elementi ilave edilmeyen duruma göre hala tane boyutu düşüktür.

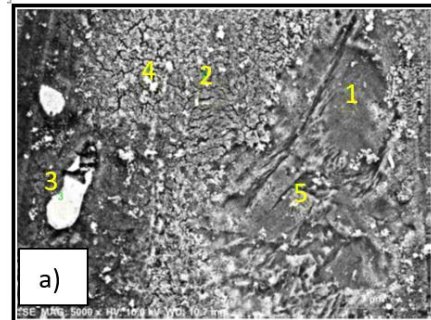
Şekil 4'te farklı oranlar Gd-Y ilave edilen AZ31 alaşımından alınan XRD analizi verilmiştir. XRD analizine göre AZ31 döküm numunenin mikroyapısında majör olarak α -Mg ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazları bulunmaktadır. Bu alaşıma ilave edilen Y ve Gd ile XRD analizinde $(Mg,Al)_3Gd$ ise Al_2Y fazlarına ait pikler tespit edilmiştir. Al_2Y fazının içerisinde Gd fazının çözünürlüğü tam olarak bilinmemekle birlikte atomik yarıçapları benzer olan bu elementlerin birbiri içerisinde çözündüğü bilinmektedir[41, 42]. Bu sebeple bu faz $Al_2(Y,Gd)$ olarak adlandırılmıştır. XRD analizi sonucu tespit edilen bu fazlara literatürde yapılan benzer çalışmalarda rastlanmıştır[43-46].



Şekil 3. Döküm Numunelerin XRD analizi. (XRD Analysis of the Cast Samples.)

Şekil 5'te döküm, dövme ve ekstrüzyon numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. AZ31 magnezyum alaşımın döküm mikroyapısında Mg-Al-Zn sistemine ait α -Mg ve β -Mg₁₇Al₁₂ fazlarının bulunduğu bilinmektedir [47, 48]. Yine standart AZ31 bileşiminde bulunabilecek eser miktardaki Mn, Ni gibi diğer alaşım elementlerinin oluşturduğu Mn₆Al, Al₈Mn₅, Al₁₁Mn₄ gibi ikili ve Mg₂MnAl₁₀ gibi üçlü bileşiklerde bulunabilir [18, 49]. Şekil 2A1'da AZ31 alaşımının döküm mikroyapı görüntüsü verilmiştir. AZ31 alaşımın tipik mikroyapısının eş eksenli tanelerden oluşan ve büyük oranda tek fazlı α -Mg fazından oluşması beklenir. Bu faz içerisinde alaşım bileşiminde bulunan Al ve Zn elementlerinin oluşturduğu ve matris içerisinde dağılmış olan intermetalik yapılar bulunabilmektedir. SEM görüntüde verilen AZ31 alaşımının döküm mikroyapısında matris yüzeyinde çeşitli fazların dağıldığı ve bazı fazların açık renkte bir kontrasta sahip olduğu görülmektedir. Bu noktalara yapılan EDS analizinde (Şekil 4) genel mikroyapı içerisinde Al ve Zn'nun dağıldığı anlaşılmaktadır. Alüminyumun magnezyum içerisindeki maksimum çözünürlüğü 437 °C'de %11.8'dir [50]. Oda sıcaklığında ise oldukça düşüktür. Çinkonun ise magnezyum içerisinde çözünürlüğü 325 °C'de ağırlıkça %6.2 ve oda sıcaklığında ise %0.69 civarındandır [40, 51]. Bu sebeple matris α -Mg içerisinde bir miktar Al ve Zn elementlerinin dağılması normaldir. Öte yandan 2 ve 3 numaralı EDS bölgelerinden diğer noktalara nazaran Al ve Zn sinyallerinin daha fazla alındığı tespit edilmiştir. Bu noktalar ise büyük ihtimalle tipik AZ31 mikroyapısında bulunan ve geniş dentritler tanelerin arasına yerleşen β -Mg₁₇Al₁₂ fazıdır. Şekil 5-b ve c'de verilen AZ31 içerisine sırasıyla %0.5 ve %1 oranında Gd+Y ilavesi ile gerçekleştirilen döküm numunelerin mikroyapılarında beyaz kontrasta sahip fazların varlığı görülmektedir. Bu fazların üzerine gerçekleştirilen EDX analizinde Al ve Zn sinyallerinin yanında Gd ve Y sinyali de alınmıştır. Literatürde AZ31 içerisine ilave edilen nadir toprak elementlerinin oluşturduğu bileşiklerin mikroyapıda genellikle tane sınırlarında yer aldığı bildirilmiştir. Şekil 2'te verilen numunelere ait optik mikroskop görüntülerinde artan nadir toprak element ilavesi ile tane sınırlarında fazların yer aldığı açık bir şekilde görülmektedir. Öte yandan literatürde AZ31

içerisine ilave edilen Gd elementinin β -Mg₁₇Al₁₂ fazının hacimsel olarak azalttığı ve daha ince partiküllere dönüştürdüğü rapor edilmiştir [47, 52]. XRD analizinde tespit edilen (Mg,Al)₃Gd fazlarının 4 numaralı EDX analizinde de tespit edilen beyaz kontrasttaki tane sınırına yerleşen fazlar olduğu düşünülmektedir. Paurbahari tarafından yapılan çalışmada Mg-Al-Zn alaşımına ilave edilen Gd oranının ağırlıkça %0.5'i geçmesi sonucu mikroyapıda olduğu bildirilmiştir[53]. Yine literatürde AZ31 alaşımı içerisine ilave edilen Gd elementinin oluşturduğu köşeli veya poligonal şeklindeki Al₂Gd fazlarının bulunduğu bilinmektedir [40]. Ayrıca poligonal şekilli Al₂Gd fazının bileşimdeki Gd miktarının artması ile arttığı belirtilmiştir [47]. Magnezyum içerisine Y ilavesi sonucu oluşması beklenen en olası faz Mg₂₄Y₅ fazıdır [54]. Nadir toprak elementlerinin ilavesi sonrası XRD analizinde Al₂Gd bileşimine ait pikler tespit edilmiştir. Ayrıca EDS analizde bu elementlere ait sinyaller alınmıştır. Fakat her iki nadir toprak elementinin de eser miktarda ilave edilmiş faz diyagramı gereği katı eriyik olarak çökme ihtimalini artırmaktadır [55]. Bununla birlikte SEM görüntülerinde artan nadir toprak element miktarı ile poligonal şekilli fazlarda artış olduğu görülmektedir.

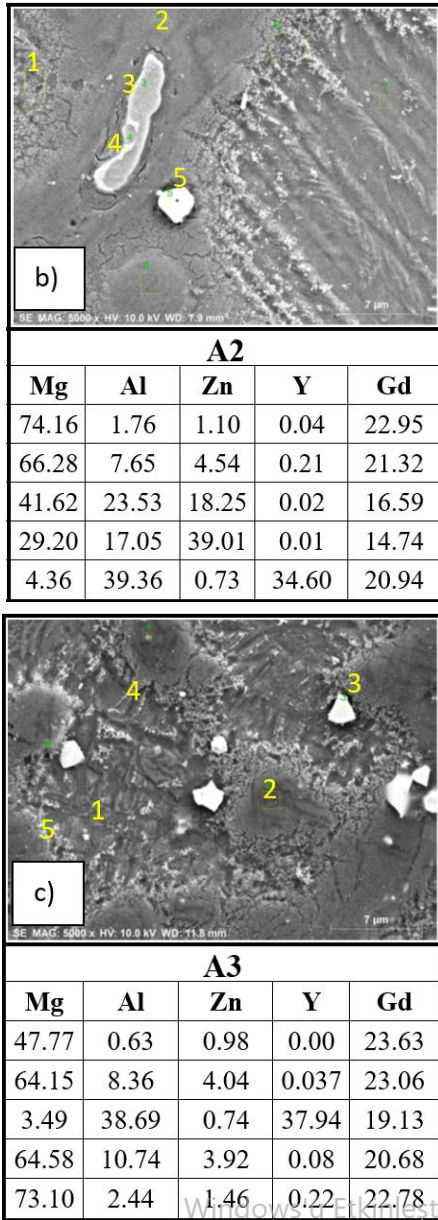


A1			
P.	Mg	Al	Zn
1	96.92	0.96	2.12
2	92.68	4.48	2.84
3	37.59	15.60	46.81
4	94.31	2.96	2.73
5	97.14	1.01	1.85

Şekil 4. A1-A3 SEM Görüntüleri, a) AZ31,

3.2. Sertlik ve Çekme Testleri

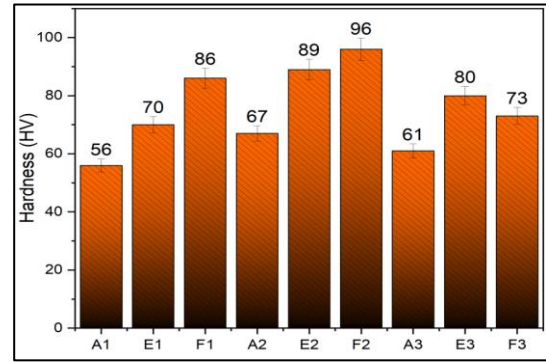
Şekil 6'de numunelerdeki sertlik değişimleri verilmiştir. Sertlik testi sonuçlarına göre en düşük sertlik değeri (56 HV) referans numunesinde (AZ31-A1), en yüksek sertlik değeri (96HV) ise Ekstrüzyon + MDF uygulanmış %0.5 nadir toprak elementi katılan (F2) numunede ölçülmüştür. Şekil 6 incelendiğinde referans numunesine göre (A1), %0.5 ve %1 NTE ilavesinin sertliği arttırdığı görülmektedir. Bununla beraber %0.5 NTE ilave edilen numunesin sertliği (A2), %1 NTE ilave edilen numuneye göre (A3) daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Bunun sebebinin artan alaşım miktarıyla birlikte tane sınırlarına yerleşmesi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 5. (devamı). b) AZ31+ 0.5%Gd+0.5%Y, c) AZ31+1%Gd+1%Y, (A1-A3 SEM Images a) AZ31, b) AZ31+0.5%Gd+0.5%Y, c) AZ31+1%Gd+1%Y)

AZ31 alaşımında döküm sonrası ekstrüzyon uygulanan numunenin sertlik değeri yaklaşık %39, ekstrüzyon sonrası dövme işlemine tabi tutulan numunelerin sertliklerinde yaklaşık %6.5-7 civarında artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ağırlıkça %0.5 oranında nadir toprak elementi ilave edilen AZ31 alaşımlarının sertliklerinin hem ekstrüzyon hem de ekstrüzyon sonrası gerçekleştirilen çok yönlü dövme ile arttığı görülmüştür. Fakat döküm alaşımına ilave edilen nadir toprak elementi miktarı ağırlıkça %1'e çıkarıldığında sertliklerde bir düşüş olduğu görülmektedir. Şekil 6 AZ31, AZ31+%0.5 NTE ve AZ31+%1 NTE tüm numunelerde ekstrüzyon ve ekstrüzyon+MDF işleminin sertliği arttırdığı belirlenmiştir. Bu durum ekstrüzyon ve ekstrüzyon+MDF işleminin tane yapısında sağladığı tane

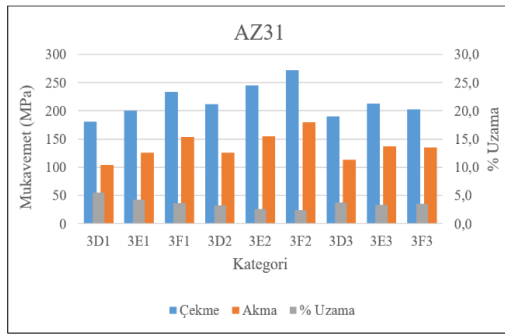
incelmesinden kaynaklandığı söylenebilir [56]. AZ31 alaşımında ekstrüzyon işleminin ve ekstrüzyon oranının tane yapısı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ve ekstrüzyon edilmiş numunelerde tane boyutu küçülerek mekanik özelliklerin iyileştiğini belirtmişlerdir. Diğer bir çalışmada AZ80 alaşımının 24 paso kadar MDF işleminin tane yapısı ve mekanik özelliklere olan etkisi incelenmiştir [28]. Sonuç olarak MDF işleminin tane yapısını küçülttüğü ve mekanik özellikleri iyileştirdiğini belirtmişlerdir.



Şekil 6. Mikro Sertlik Sonuçları (HV) (Microhardness Results)

Şekil 7 'de numunelerdeki akma sınırı ve çekme dayanımı değişimleri verilmiştir. Akma sınırı değeri 104 MPa dan 180 MPa çıkarak %68 artış göstermiştir. Çekme dayanımı değeri 181MPa dan 272 MPa çıkarak %50 artış göstermiştir. %0.5 NTE ilaveli ekstrüzyon sonrası MDF uygulanmış numunede (F2), en düşük akma sınırı değeri (104 MPa) ve en düşük çekme dayanımı değeri (181 MPa) AZ31 referans numunede (A1) belirlenmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, AZ31 alaşımına düşük oranlarda katılan nadir toprak elementlerinin mekanik özellikleri iyileştirdiği görülmektedir. Aynı şekilde hem ekstrüzyon hem de ekstrüzyon sonrası dövme işleminde 0.5% toprak elementi katılan numunelerin mekanik özelliklerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Şekil 7 incelendiğinde döküm sonrası ekstrüzyon (E1) ve ekstrüzyon sonrası MDF işleminin akma mukavemeti ve çekme mukavemeti değerlerini arttırdığı görülmektedir. Aynı şekilde 0.5% nadir toprak elementi katılan alaşımlarda ekstrüzyon ve MDF işlemi mekanik özellikleri iyileştirmiştir. Bunun sebebi tane yapısındaki inceleme ile açıklanabilir. Fakat nadir toprak elementlerinin oranı arttıkça (%1) mekanik özellikler üzerindeki etkisini kaybettiği belirlenmiştir. Literatürde benzer olarak Mingbo ve ark. Mg-3Sn-1Mn Mg alaşımına %1 oranında ayrı ayrı Gd ve İttriyum (Y) ilave ettiklerinde Akma Sınır ve Çekme Dayanımı değerlerinde düşüş gözlemlemişlerdir [57]. Diğer başka çalışmada 316L paslanmaz çeliğe katılan farklı oranlarda Gd ilave edilmiştir. Sonuç olarak sonucu en iyi mekanik özellik ağırlıkça % 0.5 Gd ilavesinde elde edilmiştir [58]. Literatürde yapılan çalışmanın sonuçlarını destelemekle birlikte nadir toprak elementlerinin düşük oranlarda ekstrüzyon ve ekstrüzyon sonrası MDF işleminin etkisini arttıracakını göstermektedir.

AZ31 döküm alaşımına hem ilave edilen nadir toprak elementleri ile hem de uygulanan deformasyon işlemleri ile % uzama değerinde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. AZ31 alaşımında mekanik özelliklerin $Mg_{17}Al_{12}$ fazı ile yakından ilgili olduğu bilinmektedir ve bu fazın morfolojisi, dağılımı ve miktarının alaşımın mekanik özelliklerini doğrudan etkilediği bilinmektedir. Genel olarak bu fazın artırılması ve homojen dağılımı mekanik özellikleri pozitif yönde etkilemektedir[59]. Ayrıca yapılan bazı çalışmalarda magnezyum alaşımına ilave edilen nadir toprak elementlerinin alaşımın % uzama değerini artırdığı bildirilmiştir[60-62]. Fakat AZ31 alaşımında tane sınırlarına çökelen kaba ikincil fazlar ise alaşımın % uzama değerini negatif yönde etkilemektedir. Bu çalışmada döküm AZ31 alaşımına ilave edilen nadir toprak elementlerinin oluşturduğu ikincil fazlar ve malzemeye uygulanan deformasyon işleminde mikroyapısal olarak meydana gelen değişiklikler tane boyutu başta olmak üzere çökelti fazlarının dağılımı üzerinde etkili olmuş olabilir. Bu durumun bir sonucu olarak %uzama değerinde azaldığı düşünülmektedir.



Şekil 7. Çekme Dayanımı, Akma Sınırı, % Uzama. (Tensile Strength, Yield Strength, %Elongation.)

Bu çalışmada kütlece %0.5 ve %1 Gadolinyum ve itriyum nadir toprak elementleri AZ31 magnezyum alaşımına ilave edilerek yeni bir alaşım oluşturulmuştur. Oluşturulan bu alaşıma 375 °C ekstrüzyon yapıldıktan sonra 400 °C çok yönlü dövme işlemi gerçekleştirilmiştir;

AZ31 alaşımına ilave edilen Gd ve Y nadir toprak elementleri alaşımın mikroyapısını etkilemiş ve mikroyapıda $(MgAl_3)Gd$ ve $Mg_{24}Y_5$ fazlarının oluşmasına neden olmuştur.

AZ31 alaşımının döküm mikroyapısı kaba taneli klasik bir döküm mikroyapısına sahiptir. Bu alaşım içerisine ilave edilen Gd ve Y nadir toprak elementleri alaşımın tane boyutunda yaklaşık %50'lik bir küçülmeye neden olmuştur ve tanelerin daha eş eksenli bir şekilde katlaştığı tespit edilmiştir.

AZ31 alaşımına uygulanan ekstrüzyon ve ekstrüzyon sonrası dövme işlemi tane boyutunda önemli bir küçülme elde edilmiştir. Mekanik işlem ile birlikte Gd ve Y'un tane boyutunu küçültmede etkili olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada en küçük tane boyutu AZ31 alaşımına 0.5% oranında Gd ve Y ilaveli Ekstrüzyon+MDF prosesi uygulanan alaşımda elde edilmiştir.

AZ31 alaşımı bimodal tane boyutu bulunurken uygulanan ekstrüzyon ve ekstrüzyon sonrası dövme işlemi sonrasında homojen tane boyutuna sahip olduğunu belirlenmiştir.

AZ31 alaşımında döküm sonrası uygulanan plastik deformasyonların sertlik değerlerini arttırdığı belirlenmiştir. En yüksek sertlik değeri (96 ± 3.6 HV) ekstrüzyon ve MDF uygulanmış numunede elde edilmiştir.

En yüksek Akma gerilmesi (180 ± 5.4 MPa) ve Çekme Mukavemeti (272 ± 8.2 MPa) %0.5 NTE ilaveli ekstrüzyon sonrası MDF uygulanmış numunede, AZ31 alaşımına göre %50.28 oranında artış elde edilmiştir.

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

5. SİMGELER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATIONS)

Gd	: Gadolinyum
Y	: İtiryum
Mg	: Magnezyum
MDF	: Çok Yönlü Dövme
Al	: Alüminyum
ECAP	: Eşit kanal açışal presleme
HPT	: Yüksek basınçlı burulma
ARB	: Birikimli rulo yapıştırma
HCP	: Altıgen sıkı paket
F	: Dövme
E	: Ekstrüzyon
NTE	: Nadir Toprak Elementi
Zr	: Zirkonyum
Nd	: Neodim
Zn	: Çinko
La	: Lantan
MPa	: Mega Paskal

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi tarafından 2021-77654622-08 proje numarası ile desteklenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Osman ÖZDAMAR: Deneysel tasarım, deneysel çalışmalar, makalenin yazımı, şekilsel düzenlemeler.
Mehmet YETMEZ: Deneysel tasarım, deneysel

çalışmalar, makalenin yazımı, kontrol ve danışmanlık
Yunus TÜREN: Deneysel çalışmalar, makalenin yazımı ve kontrol.

Engin KOCAMAN: Deneysel çalışmalar, makalenin yazımı ve kontrol.

Hamdi Alper ÖZYİĞİT: Makalenin yazımı.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Pathak, S., et al., "Strong, ductile, and thermally stable bcc-Mg nanolaminates." *Scientific reports*, 7(1): p. 8264. (2017).
- [2] Djebari, K., et al., Biyobozunur ZW21 Döküm Alaşımlarının Mikroyapı, "Sertlik ve Korozyon Özelliklerini İncelenmesi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (43): p. 6-12. (2022).
- [3] Bilgin, M., "AZ31B magnezyum alaşımının sürtünmeli delme işlemi üzerine deneysel çalışma." *Politeknik Dergisi*, p. 1-1. (2020).
- [4] Kulekci, M.K., "Magnesium and its alloys applications in automotive industry". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: p. 851-865. (2008).
- [5] Akyüz, B., A comparative study on wear and machinability behaviors of AM20, AJ21 and AS21 magnesium alloys. *Politeknik Dergisi*, 26(1): p. 243-248. (2023).
- [6] Akyuz, B., "Influence of Al content on machinability of AZ series Mg alloys". *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(8): p. 2243-2249. (2013).
- [7] Kara, İ.H., H. Ahlatci, And Y. Turen, "The Effect of Cerium and Twins Fraction on Corrosion Resistance of AZ31-1Ca Sheet Alloys." *Nevşehir Bilim ve Teknoloji Dergisi*, p. 86-90. (2020).
- [8] Akdoğan, E. and M. Şahbaz, "Çok Yönlü Dövme İşleminin AA5083 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (34): p. 739-744. (2022).
- [9] Whang, S.-H., "Nanostructured metals and alloys: processing, microstructure, mechanical properties and applications". *Elsevier*. (2011).
- [10] Cherukuri, B., T.S. Nedkova, and R. Srinivasan, "A comparison of the properties of SPD-processed AA-6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding." *Materials Science and Engineering*. A., 410: p. 394-397. (2005).
- [11] Şahbaz, M., "AZ31 Magnezyum Alaşımı İçin Aşırı Yaşlandırmanın Bazı Mekanik Özelliklere Etkisi." *Journal of Investigations on Engineering and Technology*, 4(2): p. 61-68. (2021).
- [12] Cao, Y., et al., "Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation." *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 133: p. 1-59. (2018).
- [13] Song, J., et al., Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021. *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(4): p. 863-898. (2022).
- [14] Özbeyaz, K., et al., "Mechanical properties and electrical conductivity performance of ECAP processed AA2024 alloy." *Indian Journal of Chemical Technology*, 26. (2019).
- [15] Kara, İ., et al., "Effect of Ca and Ce on wear behavior of hot-rolled AZ31 Mg alloys." *Acta Physica Polonica A*, 137(4): p. 557-560. (2020).
- [16] Calado, L.M., M.J. Carmezim, and M.F. Montemor, "Rare earth based magnesium alloys—a review on WE series." *Frontiers in Materials*, 8: p. 804906. (2022).
- [17] Akbaş, A. and M. Zeren, "Investigation of the Effect of various ca content on microstructure and mechanical properties of As-cast ZK60 magnesium alloys." *Politeknik Dergisi*, 26(3): p. 1061-1069. (2023).
- [18] Liu, H., et al., "Microstructure and mechanical properties of as-cast AZ31 with the addition of Sb." *Materials Science and Engineering A*, 497(1-2): p. 254-259. (2008).
- [19] Xu, C., et al., "Microstructure and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zn–Zr alloy sheets processed by combined processes of extrusion, hot rolling and ageing." *Materials Science and Engineering: A*, 559: p. 844-851. (2013).
- [20] Yang, Y., et al., "Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022". *Journal of Magnesium and Alloys*, (2023).
- [21] Zhang, J., et al., "Recent developments in high-strength Mg-RE-based alloys: Focusing on Mg-Gd and Mg-Y systems." *Journal of Magnesium and Alloys*, 6(3): p. 277-291. (2018).
- [22] Hong, M., et al., "Ductility enhancement of EW75 alloy by multi-directional forging." *Journal of Magnesium and Alloys*, 2(4): p. 317-324. (2014).
- [23] Li, R., et al., "Development of high-strength magnesium alloys via combined processes of extrusion, rolling and ageing". *Scripta Materialia*, 64(10): p. 950-953. (2011).
- [24] Zengin, H. and Y. Turen, "Effect of Y addition on microstructure and corrosion behavior of extruded Mg–Zn–Nd–Zr alloy". *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(3): p. 640-653. (2020).
- [25] Toscano, D., et al., "Effect of forging on microstructure, texture, and uniaxial properties of cast AZ31B alloy". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26: p. 3090-3103. (2017).
- [26] Nie, K., et al., "Effect of multidirectional forging on microstructures and tensile properties of a particulate reinforced magnesium matrix composite". *Materials Science and Engineering: A*, 528(24): p. 7133-7139. (2011).
- [27] Nie, K., et al., "Multidirectional forging of AZ91 magnesium alloy and its effects on microstructures and mechanical properties." *Materials Science and Engineering: A*, 624: p. 157-168. (2015).
- [28] Zhang, J., et al., "Microstructure evolution and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy during high-pass multi-directional forging." *Results in Physics*, 10: p. 967-972. (2018).
- [29] Zengin, H., et al., "Microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of as-cast and as-extruded Mg–4Zn–1La magnesium alloy." *Rare metals*, 39: p. 909-917. (2020).
- [30] Gryguc, A., et al., "Improvement of Fatigue Properties of AZ31B Extruded Magnesium Alloy through Forging". *Frattura ed Integrità Strutturale*, 14(53)p. 152-165. (2020).
- [31] Karpavard, S., et al., "Characterization of Semi-Closed Die-Forged ZK60 Mg Alloy " *Extrusion. in Magnesium Technology Springer*. (2017).
- [32] Beer, A., "Enhancing the extrudability of wrought magnesium alloys, in Advances in wrought magnesium alloys." *Elsevier*. p. 304-322. (2012).

- [33] Zhang, W., et al., "Microstructure evolution and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy sheets prepared by low-speed extrusion with different temperature." *Crystals*, 10(8): p. 644. (2020).
- [34] Gryguc, A., et al. "Magforge–Mechanical behaviour of forged AZ31B extruded magnesium in monotonic compression. in Materials Science Forum." *Trans Tech Publ.* (2015).
- [35] Zhang, J. and H. Huang, Microstructure and mechanical properties of AZ31 alloy ring processed by hot forging. *Materials Science and Technology*, 32(10): p. 1043-1052. (2016).
- [36] Şenel, S., et al., "AISI 430 Çeliklerin Derin Kroyonejik İşlem Sonrası Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32): p. 1000-1005. (2021).
- [37] Kolhatkar, A.V., et al., "Development of Ultra Sub-Size Tensile Specimen for Evaluation of Tensile Properties of Irradiated Materials." *IAEA-CN245-253* (2017).
- [38] Kumar, K., et al., "Use of miniature tensile specimen for measurement of mechanical properties." *Procedia engineering*, 86: p. 899-909. (2014).
- [39] Mazar, M.A., et al., "Influence of Gd and Li additions on the microstructural evolution and mechanical properties of hot-rolled AZ31 alloy." *Journal of Materials Research and Technology*, 27: p. 2020-2030. (2023).
- [40] Wang, X., et al., "Microstructure, tensile properties and creep behaviors of as-cast Mg–2Al–1Zn–xGd (x= 1, 2, 3, and 4 wt.%) alloys." *Journal of alloys and compounds*, 522: p. 78-84. (2012).
- [41] Luo, K., et al., *Effect of Y and Gd content on the microstructure and mechanical properties of Mg–Y–RE alloys.* *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(2): p. 345-354. (2019).
- [42] Wang, J., et al., "Effect of Y for enhanced age hardening response and mechanical properties of Mg–Gd–Y–Zr alloys." *Materials Science and Engineering: A*, 456(1-2): p. 78-84. (2007).
- [43] Meier, J.M., J. Caris, and A.A. Luo, "Towards high strength cast Mg-RE based alloys: phase diagrams and strengthening mechanisms". *Journal of Magnesium and Alloys*, 10(6): p. 1401-1427. (2022).
- [44] Mezbahul-Islam, M., A. Mostafa, and M. Medraj, "Essential magnesium alloys binary phase diagrams and their thermochemical data." *Journal of Materials*, (2014).
- [45] Mao, Z., D.N. Seidman, and C. Wolverton, "First-principles phase stability, magnetic properties and solubility in aluminum–rare-earth (Al–RE) alloys and compounds." *Acta Materialia*, 59(9): p. 3659-3666. (2011).
- [46] Zhang, Y., "Influence of intermetallic amount on the degradability of Mg-RE (Nd/Gd) alloys under physiological conditions." *RWTH Aachen University* (2020).
- [47] Li, W., H. Zhou, and Z. Li, "Effect of gadolinium on microstructure and rolling capability of AZ31 alloy." *Journal of Alloys and Compounds*, 475(1-2): p. 227-232. (2009).
- [48] Zimina, M., et al., "Mechanical properties of homogenized twin-roll cast and conventionally cast AZ31 magnesium alloys." *Mater Eng*, 22: p. 8-15. (2015).
- [49] Wang, J., et al., "Microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy prepared using wire arc additive manufacturing." *Journal of Alloys and Compounds*, 939: p. 168665. (2023).
- [50] Murray, J.L., "The Al–Mg (aluminum–magnesium) system." *Journal of Phase Equilibria*, 3(1): p. 60-74. (1982).
- [51] Jiang, P., C. Blawert, and M.L. Zheludkevich, "The corrosion performance and mechanical properties of Mg–Zn based alloys—a review." *Corrosion and Materials Degradation*, 1(1): p. 7. (2020).
- [52] Zhang, J.-l., et al., "The effect of Gd element and solution treatment on the microstructure of AZ31 magnesium alloy and its kinetic model." *Journal of Alloys and Compounds*, 663: p. 610-616. (2016).
- [53] Pourbahari, B., M. Emamy, and H. Mirzadeh, "Synergistic effect of Al and Gd on enhancement of mechanical properties of magnesium alloys." *Progress in Natural Science: Materials International*, 27(2): p. 228-235. (2017).
- [54] Mirak, A., C. Davidson, and J. Taylor, Study on the early surface films formed on Mg–Y molten alloy in different atmospheres." *Journal of Magnesium and Alloys*, 3(3): p. 173-179. (2015).
- [55] Gao, L., R. Chen, and E. Han, "Effects of rare-earth elements Gd and Y on the solid solution strengthening of Mg alloys." *Journal of Alloys and Compounds*, 481(1-2): p. 379-384. (2009).
- [56] Köklü, U., et al., "Influence of extrusion parameters on drilling machinability of AZ31 magnesium alloy." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*, 236(5): p. 2082-2094. (2022).
- [57] Mingbo, Y., et al., "Comparison of effects of cerium, yttrium and gadolinium additions on as-cast microstructure and mechanical properties of Mg–3Sn–1Mn magnesium alloy." *Journal of Rare Earths*, 29(6): p. 550-557. (2011).
- [58] Wang, H., T. Wang, and J. Peng, "Effect of gadolinium addition on microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of 316L austenitic stainless steels." *Physics of Metals and Metallography*, 122(14): p. 1640-1647. (2021).
- [59] Lwin, M.L., et al., "Effect of single and co-addition of rare earth on the microstructure, mechanical properties, and corrosion behavior of AZ31 magnesium alloys." *Journal of Materials Engineering and Performance*, p. 1-15. (2023).
- [60] Li, M., et al., "Effect of Nd on microstructure and mechanical properties of AZ31 magnesium alloy." *Rare metal materials and engineering*, 38(1): p. 7-10. (2009).
- [61] Li, M., et al., "Effects of neodymium rich rare earth elements on microstructure and mechanical properties of as cast AZ31 magnesium alloy." *Materials Science and Technology*, 27(7): p. 1138-1142. (2011).
- [62] Jiang, N., et al., "Effect of neodymium, gadolinium addition on microstructure and mechanical properties of AZ80 magnesium alloy." *Journal of Rare Earths*, 34(6): p. 632-637. (2016).