Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi
Afyon Kocatepe University – Journal of Science and Engineering
https://dergipark.org.tr/tr/pub/akufemubid

Araştırma Makalesi / Research Article
e-ISSN: 2149-3367
DOI: https://doi.org/10.35414/akufemubid.1543956
AKÜ FEMÜBİD **25** (2025) 045703 (935-945)
AKU J. Sci. Eng. **25** (2025) 045703 (935-945)

Al-Mg-Si Alaşımlarında Farklı MnCr Miktarının Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklere Etkisinin İncelenmesi

Makale Bilgisi / Article Info
Alındı/Received: 06.09.2024
Kabul/Accepted: 20.02.2025
Yayımlandı/Published: 04.08.2025

Investigation of the Effect of Different MnCr Amount on Mechanical and Microstructural Properties of Al-Mg-Si Alloys

Halil ULUPINAR[1*], Yiğit GÜLLER[1], Eren BOYACI[1], Yahya BOZKURT[2]

[1] *Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş. Ar-Ge Merkezi, İstanbul, Türkiye*
[2] *Marmara Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye*

© 2025 The Authors | Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 (CC BY-NC) International License

Öz

Bu çalışmada, döküm ve homojenizasyon işlemleri sonrasında yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip Al-Mg-Si alaşımlarının farklı Mn ve Cr oranlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında, çeşitli Mn ve Cr oranlarına sahip biyetler dökülmüş ve ardından homojenizasyon ısıl işlemi uygulanmıştır. Homojenizasyon işlemi sonrasında üretilen bu alaşımların mikroyapı ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme testi, sertlik ölçümü, Optik Emisyon Spektrometresi ve Taramalı Elektron Mikroskobu analizleri yapılmıştır. Mikroyapı analizlerinde, yüksek MnCr içeriğinin daha homojen ve ince taneli bir yapı sağladığı gözlemlenmiştir. Homojenizasyon işlemi sonrasında, α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu artmış ve bu dispersoidler mekanik özelliklerin iyileşmesine katkıda bulunmuştur. Mekanik test sonuçları yüksek Mn/Cr içeriğine sahip alaşımların daha yüksek akma ve çekme mukavemeti ile daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu göstermiştir. Elde edilen sonuçlar Al-Mg-Si alüminyum alaşımlarının performansını optimize etmek için Mn ve Cr mikroalaşımlarının önemli olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: *Alüminyum; Al-Mg-Si alaşımları; Dispersoidler; Çökeltiler; Homojenizasyon.*

Abstract

In this study, the effects of different Mn and Cr ratios on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys with high and low MnCr content after casting and homogenization processes were investigated. Within the scope of the study, billets with various Mn and Cr ratios were cast and then homogenization heat treatment was applied. Tensile testing, hardness measurement, Optical Emission Spectrometry (OES) and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses were performed to evaluate the microstructural and mechanical properties of these alloys produced after homogenization. Microstructure analysis showed that higher MnCr content resulted in a more homogeneous and fine-grained structure. After homogenization, the density of α-Al(Mn,Cr)Si dispersoids increased and these dispersoids contributed to the improvement of mechanical properties. Mechanical test results showed that alloys with higher Mn/Cr content have higher yield and tensile strengths and higher hardness values. The obtained results emphasize the importance of Mn and Cr microalloys to optimize the performance of Al-Mg-Si aluminum alloys.

Keywords: *Aluminum; Al-Mg-Si alloys; Dispersoids; Precipitates; Homogenization.*

1. Giriş

Al-Mg-Si alaşımları (6xxx serisi) orta mukavemetli yapısal uygulamalar ve mimari kesitler için yaygın olarak kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde de bu tür alaşımlara yönelik artan bir talep vardır. Çoğunlukla ekstrüzyon yöntemi ile üretilmelerinin yanı sıra levha ve plaka halinde de üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bununla birlikte alaşımın mikroyapı özelliklerini iyileştirmek amacıyla az miktarda Mn ve Cr elementlerinin sıklıkla kullanıldığı bilinmektedir. Yüksek sıcaklıkta (400-550°C) tavlama sırasında çeşitli kristalografik yapılara ve kimyasal bileşimlere sahip Mn ve Cr içeren farklı tipte çökeltiler oluşur. Mekanik özellikler üzerinde oldukça sınırlı bir doğrudan etkiye sahip olan bu tür çökeltiler genellikle dispersoidler olarak adlandırılmaktadır. Bununla birlikte, oldukça yüksek yoğunlukları ve yüksek termal kararlılıkları nedeniyle yeniden kristalleşme, tane büyüme süreçleri üzerinde güçlü bir etkiye sahip olabilmekte ve hatta güçlendirici çökeltilerin çökelmesi için çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket edebilmektedirler (Qian vd. 2019, Arriaga-Benitez ve Pekguleryuz 2023)

Alaşım olarak MnCr içeren Al-Mg-Si alaşımlarında dispersoidler α-Al(MnCr)Si fazı çökeltileri olarak adlandırılmaktadır (Wang vd. 2020, Ding vd. 2018, Hu vd. 2017). Bu tür dispersoidlerin nasıl oluştuğu uzun yıllardır

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Halil ULUPINAR e-posta/e-mail: halil_ulupinar@cuhadaroglu.com

araştırılmakla beraber henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Lodgaard vd (2000), α-Al matrisiyle dispersoidlerin düzensiz bir arayüzey yapısına sahip olması nedeniyle homojen çekirdeklenme oluşturmadığını belirtmişlerdir. Hirasawa (1975), ısıtma periyodu sırasında oluşan güçlendirici parçacıklar β'' ve β'-Mg_2Si iğnemsi tanelerinin, yüksek sıcaklıkta tavlama sırasında Mn içeren dispersoidler için çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket edebileceğine dair bazı kanıtlar sağlamıştır. Bununla birlikte plaka şekilli β-Mg_2Si taneleri çekirdeklenme bölgesi olarak incelenmiştir. Birçok araştırmacı (Li vd. 2021, An vd. 2020) tarafından dispersoidlerin alaşım içinde oldukça homojen olmayan bir dağılıma sahip olma eğilimi yapılan incelemeler sonucunda belirtilmiştir. Bu eğilimin tavlama prosedüründeki ayrıntılara da güçlü bir şekilde bağlı olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, homojenizasyon sırasındaki daha yavaş bir ısıtma hızının tekdüze bir dispersoid dağılımını teşvik ettiği gözlemlenmiştir (Li vd. 2021). An vd. (2020), Al-Mn alaşımlarında Si varlığının çökelme kinetiğini önemli ölçüde arttırdığını belirtmişlerdir. Dolayısıyla, katılaşmadan sonra Si' nin homojen olmayan dağılımı, dispersoidlerin homojen olmayan dağılımından dolayı olabilmektedir (An vd. 2020). Al-Mg-Si alaşımlarında Fe, alaşım bileşimlerine bağlı olarak Al-Fe, Al-Fe-Si ve Al-Fe-Mn-Si intermetalik fazları olarak ortaya çıkan en yaygın safsızlıktır (Mulazimoglu vd. 1996). Fe'nin Al içindeki katı çözünürlüğü çok düşüktür. Bu nedenle ticari Al alaşımlarında her zaman birincil Fe taşıyan partiküller mevcuttur. Fe, Si ve Mn ilaveli 6xxx Al alaşımlarında, katılaşma sırasında β-AlFeSi, α-Al(FeMnCr)Si ve Mg_2Si partikülleri oluşmaktadır (Kuijpers vd. 2003, Mrówka-Nowotnik ve Sieniawski 2005). Döküm kütüğün mikroyapıları dendritiktir ve esas olarak dendrit kolları arasında β-AlFeSi fazı ve kaba Mg_2Si parçacıkları oluşturmaktadır. Söz konusu intermetalik partiküller biyetlerin ekstrüde edilebilirliği ve işlenebilirliği üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Li vd. 2014, Kujipers vd. 2002). β-AlFeSi fazındaki yeni başlayan ergime genellikle sıcak çatlamadan ve topaklanma gibi yüzey kusurlarından dolayı olduğu ve termo-mekanik işlemler sırasında kötü bir yüzey kalitesine yol açtığı bilinmektedir. İdeal biyet, minimum miktarda intermetalik β-AlFeSi plakaları ve Mg_2Si partikülleri ve biyet kesiti boyunca homojenlik ile tek tip tane yapısına sahip olmalıdır (Zajac vd. 1994). Daha iyi yüzey kalitesine sahip ekstrüde ürünler elde etmek için, döküm halindeki biyetler termo-mekanik işlemler öncesinde bir ısıl işlem prosedürü sırasında homojenize edilmelidir.

Bu çalışmada, farklı MnCr mikroalaşım oranlarına sahip Al-Mg-Si alaşımları doğrudan soğutma yöntemi ile dökülerek eşit şartlarda homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Döküm ve homojenizasyon ısıl işlemi sonrasında yapıda meydana gelen faz dönüşümlerinin ve dispersoidlerin dağılımının mikroyapısal ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

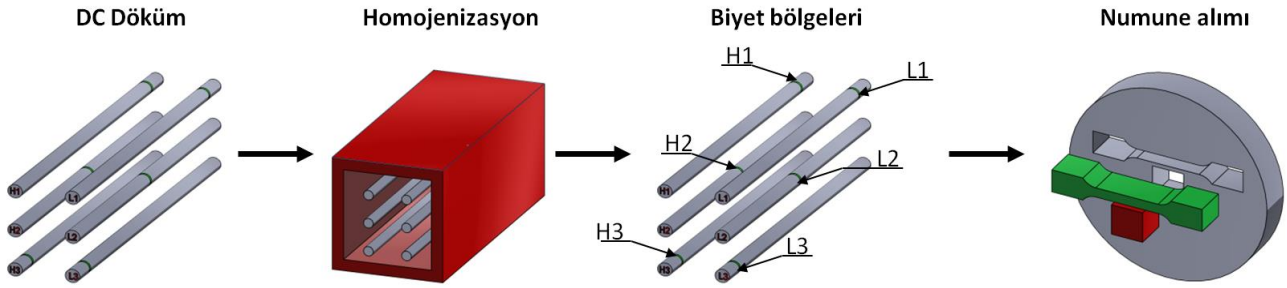
Farklı MnCr oranlarına sahip iki adet AA6005 alüminyum alaşımı doğrudan soğutmalı (DC) dikey döküm yöntemi ile üretilerek hazırlanmıştır. EN 573 standart değerleri içerisinde yer alan Al alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 1'de listelenmiştir.

Çizelge 1. AA6005 alaşımının EN 573 standartındaki ve deneysel çalışmalardaki kimyasal kompozisyonu.

Alaşım	Si%	Fe%	Cu%	Mn%	Mg%	Cr%	Zn%	Ti%	Mn+Cr%
Standart (EN 573)	0.50-0.90	0.35	0.3	0.5	0.40-0.70	0.3	0.2	0.1	0.12-0.50
H1 H2 H3	0.691	0.221	0.035	0.220	0.556	0.102	0.054	0.032	0.321
L1 L2 L3	0.673	0.239	0.041	0.115	0.584	0.027	0.107	0.033	0.143

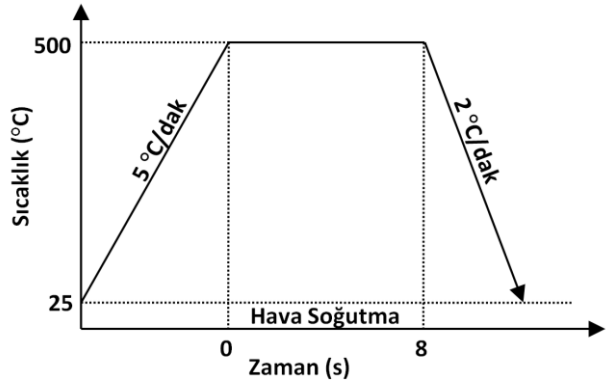
Deneysel çalışmada döküm işleminden numune alım aşamasına kadar olan süreç Şekil 1'de gösterilmektedir. Külçe formundaki AA6005 Al alaşımı 700 °C ila 750 °C arasındaki sıcaklıklarda ergitilmiştir. Bu sıcaklık aralığında alaşım elementleri saf metalik formda eklenmiştir. Alaşım elementlerinin sıvı alüminyum içerisine eklenmesinden sonra homojen bir dağılım için eriyik tamamen karıştırılmış ve eriyik yüzeyinde meydana gelen safsızlıklar giderilmiştir. Rafinasyon sıcaklığı 750 °C iken cüruf ve gazdan arındırma işlemi için heksakloroetan kullanılmıştır. Daha sonra eriyik 5 dakika süreyle muhafaza edilerek DC dikey döküm yöntemi ile 7 m uzunluğunda, 254 mm (10 inç) çapındaki biyetler halinde döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Döküm işlemleri sonrasında elde edilen farklı MnCr oranlarına sahip biyetler 5 °C/dak. ısıtma hızındaki fırında 8 saat boyunca 500 °C'de homojenizasyon ısıl işlemine tabi tutularak 2 °C/dak. soğuma hızında fırın içerisinde kontrollü olarak soğutulmuştur.



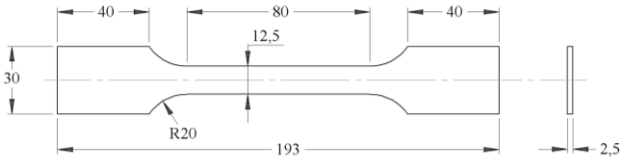
Şekil 1. Biyetlerin döküm sürecinden numune alım aşamasına kadar olan sürecinin şematik gösterimi.

Homojenizasyon ısıl işlem süreci Şekil 2'de şematik olarak gösterilmektedir. Homojenizasyon ısıl işleminden sonra fırının üst, orta ve alt kısmında bulunan biyetlerin sırasıyla baş, orta ve arka bölgelerinden 50 mm genişliğinde silindirik kesitler alınmıştır. Alınan kesitlerin orta kısmından dispersoidlerin gelişimini ve bunların oda sıcaklığında mekanik ve mikroyapısal etkilerini değerlendirmek için numuneler alınmıştır. Yüksek MnCr oranına sahip numuneler sırasıyla H1, H2 ve H3 şeklinde, düşük MnCr oranına sahip kesitler ise sırasıyla L1, L2, L3 şeklinde kodlanmıştır.



Şekil 2. Homojenizasyon ısıl işleminin şematik diyagramı.

Alaşımların elementel analizi GNR – Metal Lab Plus optik emisyon spektrometresi (OES) cihazında gerçekleştirilmiştir. Mikroyapıyı incelemek amacıyla enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ve dalgaboyu dağılım spektrometresi (WDS) donatıları bulunan JEOL JSM 7000F taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Dispersoidlerin dağılımlarını SEM incelemesinde net bir şekilde gözlemlemek amacıyla, numuneler kademeli zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuş, ardından yüzey alkol ile temizlenmiştir. Yüzey hazırlığının ardından numuneler %0.5 HF çözeltisi ile 90 saniye boyunca dağlanmış, distile su ile durulanmış ve son olarak alkol ile silinerek kurutulmuştur. Dispersoidlerin sayı yoğunluğunu Adobe Photoshop CS4 Extended kullanılarak belirlenmiştir. Sertlik testleri Brinell cinsinden DIGIROCK-RB makinesinde 2.5 mm çapında bilya, 62.5 kgf yük ve 7 saniye bekleme süresiyle parlatılmış numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Ortalama sertlik değeri her numune için 5 ölçüm noktasından elde edilmiştir. Çekme numuneleri Şekil 3'de gösterilen TS EN ISO 6892-1 standardında belirtilen ölçülerde kesilerek 8 mm/dak. çekme hızında Zwick/Roell marka, Z020 model ve 20 kN kapasiteli çekme testi cihazında oda sıcaklığı altında çekme testine tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3. TS EN ISO 6892-1 standart ölçüleri (ISO 6892-1:2019).

3. Bulgular ve Tartışma

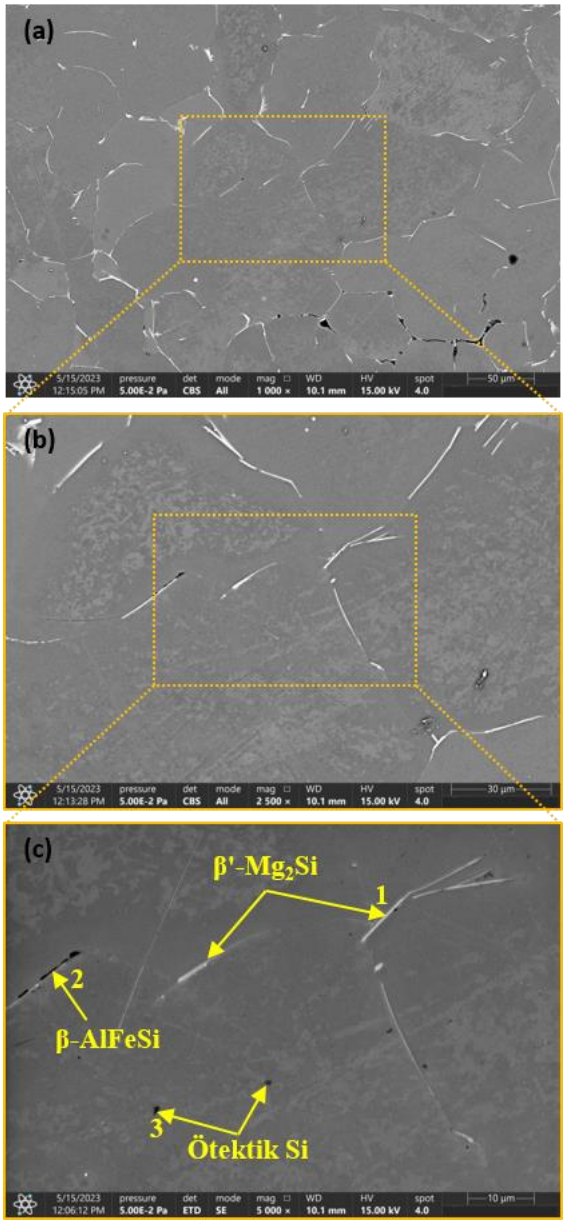
3.1 Mikroyapı Analizi

3.1.1 Döküm sonrası mikroyapı analizi

Şekil 4'de H1 numunesinin DC döküm sonrası SEM görüntüleri incelenmiştir. Al-Mg-Si biyetin mikroyapısının eşeksenli dentritik alüminyum matris taneleri ve β-AlFeSi, β^{l}-Mg_2Si intermetalik fazlardan oluştuğu görülmektedir. Yüksek ve düşük Mn-Cr alaşımına sahip alaşımların döküm sonrası mikroyapıları benzer sonuç sergilediği için H1 numunesinin sonuçları incelenmiştir. Şekil 4a-b'de dağlanmış numunenin 1000X ve 2500X büyütme oranındaki SEM görüntüleri incelendiğinde α-Al taneleri ve sınırlarında meydana gelen intermetalik fazlar gözlemlenmektedir. Bu fazların morfolojisi Şekil 4c'de 5000X büyütme altında incelendiğinde tane sınırlarında açık gri renkli β-AlFeSi ve koyu siyah renkli Mg_2Si intermetalik fazları dikkat çekmektedir (Jeon vd. 2022, Ling vd. 2022). β-AlFeSi parçacıkları, %99,8 saflığa sahip ham Al'deki Fe safsızlıkları nedeniyle esas olarak Al-Si-Mg bazlı alaşımlarda oluşmaktadır (Kim vd. 2006).

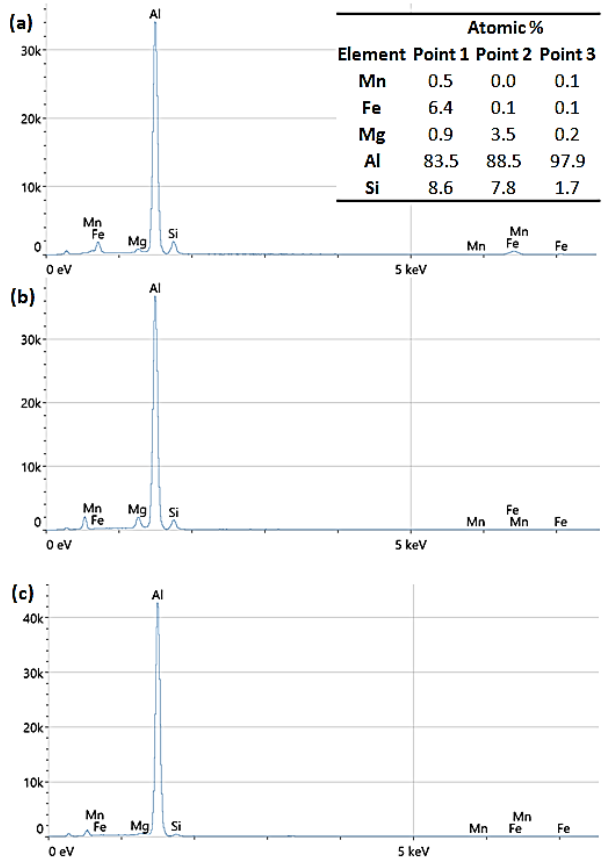
Zajac vd. (1994), Al-Mg-Si alaşımlarında döküm işlemi sonrası β-AlFeSi fazlarının sıklıkla meydana gelen intermetalikler olduğunu ve ekstrüzyon sonrası alaşımın

yüzey özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olduğu belirtilmiştir.



Şekil 4. Döküm sonrası SEM sonuçları, a) 1000X büyütme oranında SEM görüntüsü, b) 2500X büyütme oranında SEM görüntüsü, c) 5000X büyütme oranında SEM görüntüsü ve EDS analizi için seçilen bölgeler.

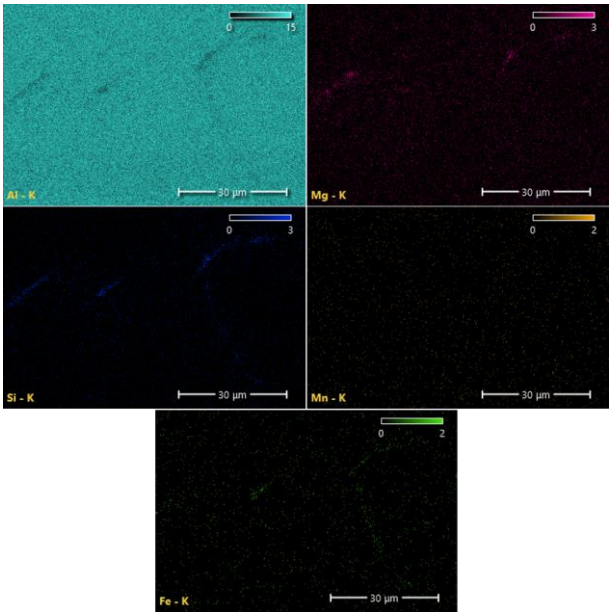
Belov vd. (2005), Mg ve Si elementlerinin β-AlFeSi intermetalik oluşumunda önemli bir etkiye sahip olduğunu ve yüksek oranda kullanılması durumunda yapıda $Al_{13}Fe_4$ fazını, düşük oranda kullanımı durumunda ise β-AlFeSi fazının baskın hale geldiğini belirtmiştir. Keskin kenar ve iğne benzeri bir morfolojiye sahip monoklinik yapılı β-AlFeSi fazının matris malzemesinde stres birikimine neden olduğu ve tane sınırlarında plaka şeklinde çökelen Mg_2Si miktarındaki artışın mekanik özellikleri iyileştirdiği ancak ekstrüzyon yapılabilirlik oranını azalttığı bilinmektedir (Wang vd. 1995, Onurlu 1993, Şendeniz 2006). Tane içlerinde ötektik Si çökeltileri dikkat çekmektedir (Wang vd. 2020, Jeon vd. 2022). Şekil 5a-c'de sırasıyla Şekil 4c'de belirtilen noktaların EDS grafik ve tablo sonuçları gösterilmektedir.



	Atomic %		
Element	Point 1	Point 2	Point 3
Mn	0.5	0.0	0.1
Fe	6.4	0.1	0.1
Mg	0.9	3.5	0.2
Al	83.5	88.5	97.9
Si	8.6	7.8	1.7

Şekil 5. DC döküm işlemi sonrası belirli bölgelerden alınan EDS analizi sonuçları, a) 1. bölge, b) 2. bölge, c) 3. bölge.

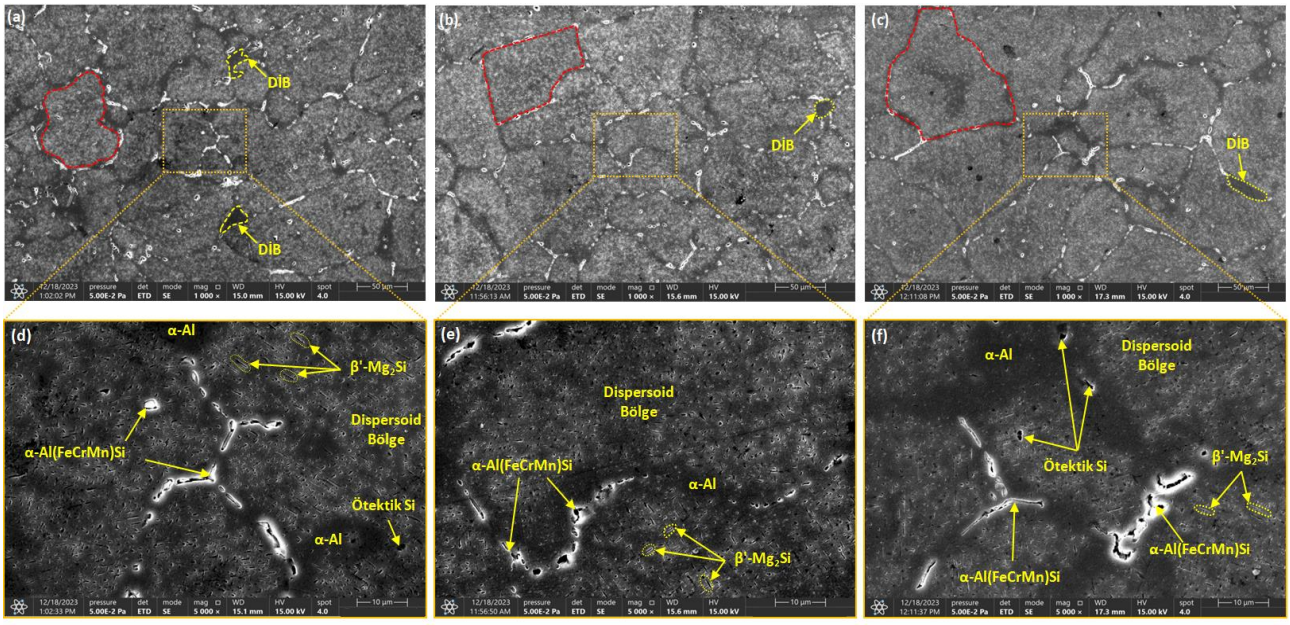
Şekil 6'da 2500X büyütme altında incelenen bölgenin element dağılımı gösterilmektedir. Element dağılımı dikkatli incelendiğinde plaka ve iğnemsi yapılardaki β-AlFeSi ile Mg_2Si intermetalik fazlarının olduğu alanlarda Mg, Si ve Fe elementleri yoğunluk göstermektedir.



Şekil 6. Al, Mg, Si, Mn ve Fe elementleri için X-Işını dağılım haritası.

3.1.2 Homojenizasyon sonrası mikroyapı analizi

Şekil 7'de yüksek MnCr oranına sahip H1, H2 ve H3 numunelerinin 1000X ve 5000X büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri gösterilmektedir. Kompozisyonlarında Mn ve Cr elementleri içeren Al-Mg-Si alüminyum alaşımları homojenizasyon ısıl işlemi sırasında çökeltiye uğrayarak α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerini oluşturduğu bilinmektedir (Loodgard ve Ryum 2000, Remøe vd. 2018). Döküm işlemi sonrasında gerçekleştirilen SEM analizi sonuçları ile kıyaslandığında dispersoid bölgerinde artış gözlemlenmiştir. Şekil 7a-c'de 1000X büyütme oranında ince tanelerle çevrelenen kaba taneler gözlemlenmektedir. Ortalama tane büyüklüğü 90 µm olarak belirlenmiştir. Açık renkli alanlar tane sınırlarında çökelen intermetalik fazları sergilerken tane içlerindeki gri alanlar ise dispersoid bölgeleri göstermektedir (Li vd. 2017, Du vd. 2013). Bir tanenin tane sınırları Şekil 7a-c'de gösterildiği gibi kırmızı kesikli çizgi ile vurgulanmıştır. Tane sınırlarının etrafında neredeyse hiç dispersoid gözlemlenmemiştir. Dispersoid içermeyen bölge (DİB) olarak sarı kesikli çizgi içerisinde belirtilen bu alanlar tane sınırlarının kesişim bölgesinde koyu renkli alanlar şeklinde incelenmiştir. Şekil 7a-c'de belirtilen gözlemin geçerliliğini doğrulamak için dağlanmış numunelerin 5000X büyütme oranında incelenen mikroyapıları Şekil 7d-f'de gösterilmektedir. Farklı bölgelerden alınan kesitlerin tamamında tane içlerindeki α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Önceki çalışmalarda olduğu gibi (Wang vd. 2022, Alvarez-Antolin vd. 2020, Kumar vd. 2016), homojenleştirme ısıl işlemi iğne şeklindeki β-AlFeSi parçacıklarının daha küçük yuvarlak şekilli α-Al(FeCrMn)Si parçacıklarına dönüşümünü desteklemektedir. Homojenleştirme ısıl işlemi sonrasında ötektik Mg_2Si parçacıklarının çoğunluğu Al matrisinde çözünmüştür ancak poligonal şekilli Si parçacıkları (Şekil 7f) ve yuvarlak şekilli α-Al(FeCrMn)Si parçacıkları (Şekil 7d) mevcuttur. Şekil 4c'de belirtilen plaka şeklindeki β-AlFeSi fazı homojenleştirme ısıl işlemi sırasında iğnesel şekilli parçalara ayrılarak α-Al(FeCrMn)Si fazına dönüşmüştür (Gedik 2023). İğnesel şekilli β-Al(FeCrMn)Si çok kırılgandır ve düşük ötektik sıcaklık davranışı sergilemektedir. Bu durum termo-mekanik işlem sırasında nihai ürünün yüzeyinde süreksizlik oluşturduğu bilinmektedir. Yüzey probleminin yanı sıra termo-mekanik işlem kalıbının ömrü de düşük faz dönüşüm oranından etkilenmektedir. Ancak daha yüksek miktarda dönüştürülmüş α-AlFeSi daha iyi termo-mekanik işlenebilirlik ve daha iyi yüzey durumu sağlayarak kalıp ömrünü artıracaktır. İğne şeklinden yuvarlak şekle dönüşüm oranının minimum %95 olması hedeflenmektedir. Homojenizasyon işleminin ıslatma süresi boyunca tüm Mg ve Si atomları yüksek çözünürlükleri nedeniyle α-Al fazında çözünmekte ve homojen çözelti yapısı oluşturmaktadır (Fahri Ozdogru 2023). Soğutma işleminin amacı Mg ve Si atomlarını çözünmüş çözelti durumunda tutmaktır. Ancak yüksek soğutma hızlarında bile bu durum gerçekleşmemektedir. Sistemde her zaman düşük yüzdeli β-Mg_2Si bulunmaktadır (Fahri Ozdogru 2023).



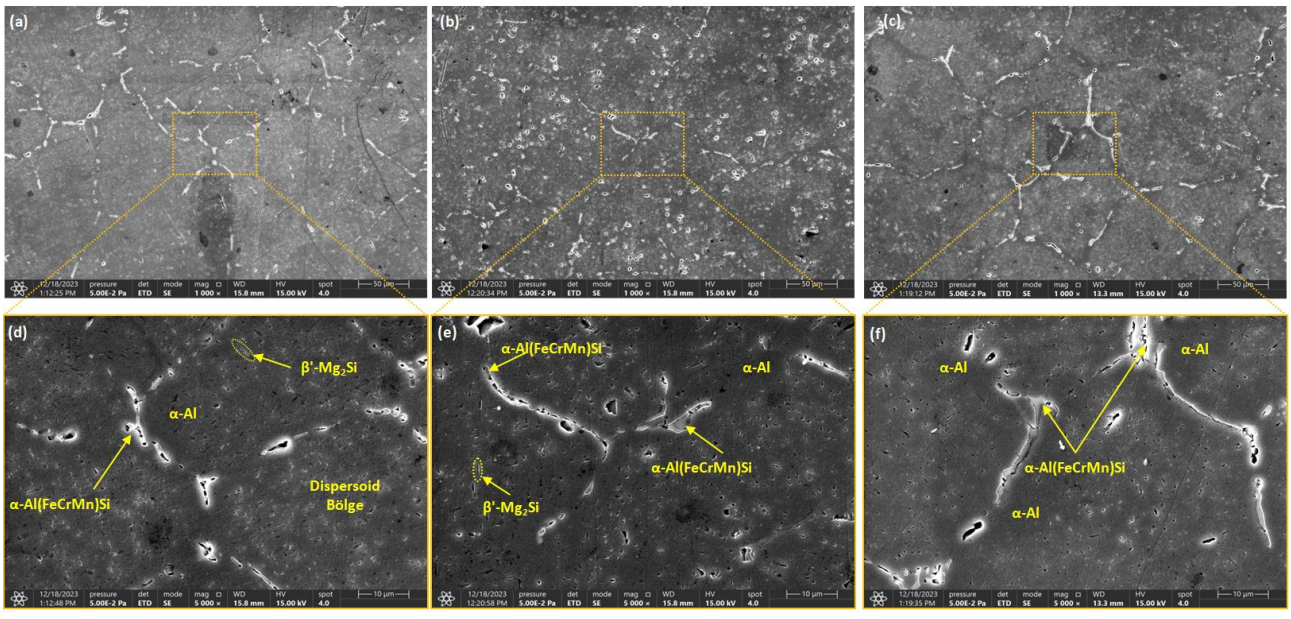
Şekil 7. Yüksek MnCr oranına sahip numunelerin SEM görüntüleri, a-c) 1000X büyütmede sırasıyla H1, H2, H3 numunelerinin SEM görüntüsü, d-e) 5000X büyütmede sırasıyla H1, H2, H3 numunelerinin SEM görüntüsü.

Şekil 8'de düşük MnCr oranına sahip L1, L2 ve L3 numunelerinin 1000X ve 5000X büyütme oranlarındaki SEM görüntüleri gösterilmektedir. Şekil 8a-c'de 1000X büyütme oranındaki görüntüler incelenmiştir. Yapılan ölçüm sonucunda ortalama tane büyüklüğü 120 µm olarak belirlenmiştir. Şekil 8d-f'de 5000X büyütme oranındaki görüntüler incelendiğinde dispersoidlerin dağınık olarak yer aldığı dispersoid içermeyen bölgelerin yoğunluğu dikkat çekmektedir. Literatürde yapılan çalışmalara göre (Khani Moghanaki vd. 2017, Xu vd. 2017), dispersoidlerin sıcak deformasyon ve deformasyon sonrası ısıl işlem sırasında toparlanmayı geciktirdiği ve yeniden kristalleşmeyi engellediği bilinmektedir. Dispersoidlerin dislokasyon hareketleri ve alt tane göçü üzerindeki sabitleme etkinliği büyük ölçüde boyutlarına ve hacim oranlarına bağlıdır. Bununla birlikte ince boyutlu ve yoğun dağılımlı dispersoidler yüksek sıcaklıklarda üstün mukavemete katkıda bulunabilmektedir (Nes vd. 1985). Daha düşük sıcaklıklarda (400-450 ˚C) daha ince dispersoidler elde edilebilmesine rağmen, Mg_2Si gibi kaba birincil fazlar α-Al matrisinde kalmıştır. Bu kaba birincil fazlar deformasyon sırasında tam olarak çözülemez ve yaşlandırma sertleştirmesi işleminden sonra daha zayıf bir alaşımla sonuçlanır (Liu vd. 2012). Ayrıca, çözünmemiş Mg_2Si fazları, sıcak deformasyon sırasında yeni başlayan erimeye neden olma eğilimindedir ve alaşımların verimliliğini ve mekanik özelliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır (Qin vd. 2022). Tane yapısında büyük miktarda ince dispersoidlerin varlığının, sıcak deformasyon ve sonraki ısıl işlemler sırasında yeniden kristalleşme direncini önemli ölçüde artıran daha yüksek bir Zener sürükleme (P_Z) değeri ile sonuçlandığı bilinmektedir (Xu vd. 2017). Genel olarak, bu dispersoidlerin tane sınırlarını sabitleme etkinliği büyük ölçüde boyutlarına ve hacim oranlarına bağlıdır (Nes vd. 1985).

Küçük fakat yakın dağılmış dispersoidler tane büyümesi sırasında tane sınırlarını sabitleyerek tanelerin hareket etmesini engellemektedir (Goik vd. 2023). Dispersoidlerin yeniden kristalleşmeyi önlemedeki etkinliği Eşitlik 1'de verilmiştir (Guo vd. 2015, Lai vd. 2014):

$$P_Z = \frac{3\gamma^{GB} f}{2r} \quad (1)$$

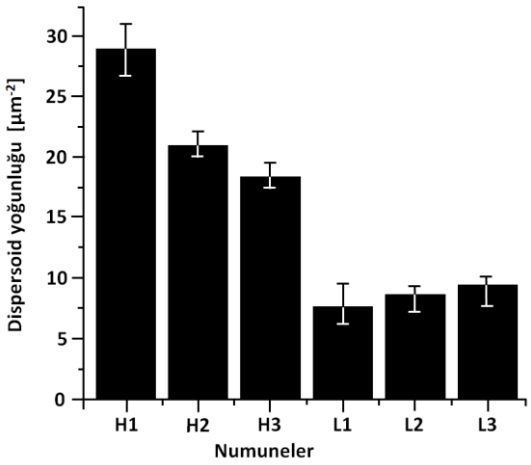
Burada γ^{GB} tane sınırı enerjisini, f hacim oranını ve $2r$ ortalama tane yarıçapına sahip eşit dağılımlı küresel tanelerini ve P_Z ise Zener sürükleme mekanizması olarak adlandırılan sabitleme basıncını ifade etmektedir. Sabitleme basıncı artan Mn/Cr oranı ile artmakta ve Mn/Cr oranı 3,5 değerini aştığında ise azalmaktadır (Liu vd. 2022).



Şekil 8. Düşük MnCr miktarına sahip numunelerin SEM görüntüleri, a-c) 1000X büyütmede sırasıyla L1, L2, L3 numunelerinin SEM görüntüsü, d-e) 5000X büyütmede sırasıyla L1, L2, L3 numunelerinin SEM görüntüsü.

Şekil 9'da yüksek ve düşük MnCr alaşımlarına ait dispersoid yoğunluk grafiği gösterilmektedir. Grafik incelendiğinde yüksek MnCr içeriğine sahip H1, H2, H3 alaşımlarının düşük MnCr içeriğine sahip L1, L2, L3 alaşımlarından ortalama %165 oranında daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Strobel vd. (2010), yaptıkları bir çalışmada dispersoid yoğunluğunun MnCr alaşım oranı ve homojenleştirme ısıl işlemi koşulları tarafından

belirlendiğini ve artan MnCr oranı ile homojenizasyon sıcaklığının dispersoid yoğunluğunun artmasına neden olduğunu bildirmiştir. Bu durum artan MnCr içeriği ile birlikte dispersoid yoğunluğunun artmasının yanı sıra bir faz geçişinin de olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Yüksek ve düşük MnCr alaşımlarının dispersoid yoğunlukları.

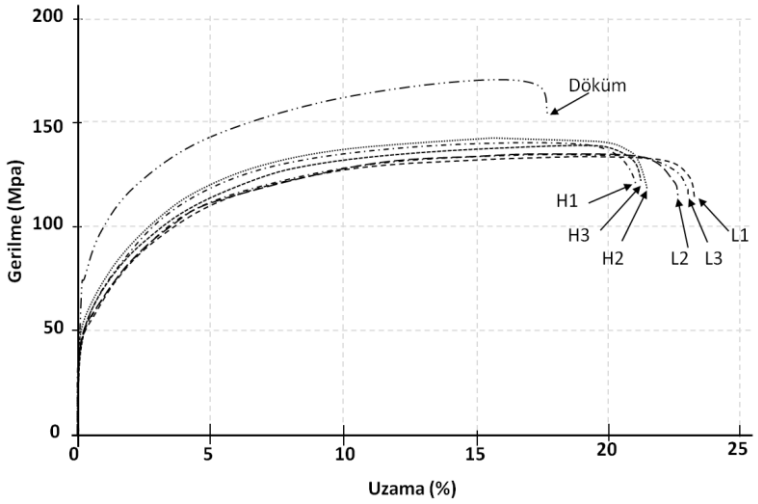
3.2 Mekanik Test Sonuçları

Homojenizasyon işleminden sonra yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlardaki dispersoid yoğunluklarının mekanik özellikler üzerindeki ana etkileri, yeniden kristalleşmeyi engellemek, tane sınırlarındaki gerilme konsantrasyonunu azaltmak ve Orawan sertleşmesini sağlamaktır (Ding vd. 2024). Mevcut çalışmada dispersoid yoğunluğunun daha fazla olduğu H1, H2, ve H3 numunelerinde tane boyutunda önemli ölçüde bir azalma ile birlikte tane sınırlarının göçü engellenmiştir. Dispersoid kaynaklı akma dayanımı artışı genellikle Orowan bypass denklemi kullanılarak tahmin edilmektedir. Orowan bypass denklemi Eşitlik 2'de ve dispersoid parçacıklar arası boşluk denklemi Eşitlik 3'de verilmiştir (Liu vd. 2022, Guo vd. 2002).

$$\Delta\sigma = \frac{0.84MGb}{2\pi(1-v)^{1/2}\lambda}\ln\frac{r}{b} \quad (2)$$

$$\lambda = r\left(\frac{2\pi}{3f}\right)^{1/2} \quad (3)$$

Bu ifadelerde M alüminyum Taylor faktörünü (3.06), G Yüzey Merkezli Kübik (YMK) yapılı alüminyum için kayma modülünü (25.4 GPa), b alüminyum Burgers vektörünü (0.286 nm), v alüminyum için Poisson oranını (0.34), λ dispersoid parçacıklar arası boşluğu, f dispersoid hacim oranını ve r dispersoid ortalama yarıçapını ifade etmektedir (Ding vd. 2024). Zhao vd. (2013), yüksek yoğunlukta ince dispersoidlerin varlığının malzemeleri önemli ölçüde güçlendirdiğini ancak güçlendirme etkilerinin gerinim arttıkça azaldığını, parçacıklardan kaynaklanan iç gerilmenin erken deformasyon sırasında deformasyon sertleşmesine katkıda bulunduğunu bildirmiştir. Çalışmamızda, Mn ve Cr'nin birleşik etkisinin bir sonucu olarak H1, H2, H3 numunelerinin yüksek dispersoid yoğunluğuna sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum tane sınırlarındaki gerilme konsantrasyonunun etkili bir şekilde azaltılmasıyla sonuçlanmakta ve bu da bugüne kadar rapor edilen 6xxx alüminyum alaşımlarının çoğunda gözlemlenenden daha yüksek bir mukavemet-uzama kombinasyonu üretmektedir.



Şekil 10. Homojenizasyon işlemi sonrası yüksek (H1, H2, H3) ve düşük (L1, L2, L3) MnCr miktarına sahip alaşımların ve döküm durumundaki H1 alaşımının oda sıcaklığındaki çekme testi sonucu grafikleri.

Şekil 10'da döküm durumundaki numunenin ve yüksek MnCr içeriğine sahip H1, H2, H3 ve düşük MnCr içeriğine sahip L1, L2, L3 numunelerinin homojenizasyon ısıl işlemi sonrası gerilme-gerinim eğrileri gösterilmektedir. Farklı MnCr içeriğine sahip alaşımların akma dayanımı incelendiğinde yüksek MnCr içeren alaşımların ortalama akma mukavemetinin düşük MnCr içeren alaşımlara kıyasla %6 oranında arttığı gözlenmiştir. Bununla birlikte

düşük MnCr içeriğine sahip alaşımların ortalama %uzama değerleri düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlara kıyasla %8 oranında artış sergilemektedir. Maksimum çekme mukavemeti yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlarda %3 oranında artış göstermektedir. Liu vd. (2022), dispersoidlerin akma, kopma ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisi sınırlı olsa da, sıcak deformasyon ve ardından gerçekleştirilecek olan çözelti ısıl işlemi sırasında alt yapıları etkili bir şekilde rafine ederek alaşımların sünekliğini arttırdığını belirtmişlerdir.

Alaşımların oda sıcaklığındaki çekme ve sertlik özellikleri incelenmiş ve sonuçlar Çizelge 2'de listelenmiştir. Numunelerin beş ayrı noktasından alınan Brinell sertlik sonuçlarının ortalaması incelendiğinde yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımların %6 oranında daha sert bir yapı sergilediği görülmektedir. Döküm durumundaki numunenin mekanik özellikleri incelendiğinde ise akma, çekme ve sertlik değerlerinin daha yüksek, %uzama değeri ise belirgin oranda daha düşük sünek davranış sergilemiştir.

Çizelge 1. Alaşımların oda sıcaklığındaki çekme ve sertlik testi sonuçları.

Numune	Akma R_p 0.2 [Mpa]	Maks. Çekme R_m [Mpa]	Uzama A_{50} mm [%]	Sertlik [HRB]
H1	52,0	140	20,7	33
H2	54,0	142	21,2	34
H3	51,0	138	21,1	32
$H_{ort.}$	52,3	140	21,0	33
L1	49,0	135	23,0	31
L2	50,0	137	22,3	30
L3	49,0	133	22,8	32
$L_{ort.}$	49,3	135	22,7	31
Döküm	81,0	169,0	17,3	43

4. Sonuçlar

Bu çalışmada döküm ve homojenizasyon sonrası yüksek ve düşük MnCr içeriğine sahip biyetler incelenmiştir. Fırına aynı anda şarj edilen farklı konumdaki biyetler aynı homojenleştirme koşullarına tabi tutulmuştur. Farklı oranlarda Mn ve Cr mikro alaşımlarının malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerine olan etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Alaşımdaki yüksek MnCr içeriği malzemenin akma mukavemetini %6, kopma mukavemetini %3, sertlik değerini %6 oranında arttırırken, sünekliğini %8 oranında azaltmıştır.
- SEM-EDS analizlerinde döküm numunesinde matris α-Al, tane sınırları β-AlFeSi ve Mg_2Si fazları tespit edilmiştir. Koyu renkleri β-AlFeSi fazı, açık renkleri ise Mg_2Si fazının temsil ettiği görülmüştür.
- Homojenizasyon işlemi sonrasında, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlarda α-Al(Mn,Cr)Si dispersoidlerinin yoğunluğu düşük MnCr içeriğine sahip alaşımlara oranla ortalama %165 oranında artmıştır. Bu dispersoidlerin varlığı, mikroyapının daha homojen olmasına ve mekanik özelliklerin iyileşmesine katkı sağlamıştır.
- Mekanik test sonuçlarına göre, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımlar, düşük MnCr içeriğine sahip olanlara kıyasla daha yüksek akma ve çekme mukavemeti sergilemiştir. Bu durumun başlıca nedeni tane incelmesine neden olan ve tane sınırlarında gerilme konsantrasyonunun azalmasına katkıda bulunan yüksek dispersoid yoğunluğunun varlığıdır.
- Sertlik testleri, yüksek MnCr içeriğine sahip alaşımların daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, mikroyapısal incelemelerle uyumlu olarak dispersoidlerin malzeme üzerinde olumlu etkilerini göstermektedir.
- Gelecekte yapılacak çalışmalar, farklı ısıl işlem parametrelerinin ve MnCr oranlarının daha detaylı incelenmesi ile bu alaşımların performansı değerlendirilebilir.

Etik Standartlar Bildirgesi

Yazarlar tüm etik standartlara uyduklarını beyan ederler.

Yazarlık Katkı Beyanı

Yazar 1: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 2: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 3: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Yazar 4: Kaynaklar, Araştırma, Deney tasarımı, Deney, Fikir Sahibi Yazma – orijinal taslak Görselleştirme, Yazma – orijinal taslak

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarların bu makalenin içeriğiyle ilgili olarak beyan edecekleri hiçbir çıkar çatışması yoktur.

Verilerin Kullanılabilirliği

Bu çalışma sırasında oluşturulan veya analiz edilen tüm veriler, yayınlanan bu makaleye dahil edilmiştir.

Teşekkür

Bu araştırma Çuhadaroğlu Metal Sanayi ve Pazarlama A.Ş Ar-Ge Müdürlüğü tarafından desteklenmiştir.

5. Kaynaklar

Qian, X., Parson, N., and Chen, X.-G., 2019. Effects of Mn addition and related Mn-containing dispersoids on the hot deformation behavior of 6082 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **764**, 138253. https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138253

Arriaga-Benitez, R. I., and Pekguleryuz, M., 2023. The synergistic effects of nano-sized α-Al(Mn,Cr,Fe)Si and Al–Si–Zr dispersoids on the creep behavior Al–Si–Mg–Cu (Mn, Cr, Zr) diesel engine alloy. *Materials Science and Engineering: A,* **872**, 144949. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144949

Wang, X., Qin, J., Nagaumi, H., Wu, R., and Li, Q., 2020. The Effect of α-Al(MnCr)Si Dispersoids on Activation Energy and Workability of Al-Mg-Si-Cu Alloys during Hot Deformation. *Advances in Materials Science and Engineering,* **2020(1)**, 1-12 https://doi.org/10.1155/2020/3471410

Ding, L., Jia, Z., Nie, J.-F., Weng, Y., Cao, L., Chen, H., Wu, X., and Liu, Q., 2018. The structural and compositional evolution of precipitates in Al-Mg-Si-Cu alloy. *Acta Materialia,* **145,** 437–450. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.12.036

Hu, J., Teng, J., Ji, X., Fu, D., Zhang, W., and Zhang, H., 2017. Enhanced mechanical properties of an Al-Mg-Si alloy by repetitive continuous extrusion forming process and subsequent aging treatment. *Materials Science and Engineering: A,* **695,** 35–44. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.04.013

Hirasawa, H., 1975. Precipitation process of Al-Mn and Al-Cr supersaturated solid solution in presence of age hardening phases. *Scripta Metallurgica,* **9(9)**, 955–958. https://doi.org/10.1016/0036-9748(75)90551-7

Li, Z., Qin, J., Zhang, H., Wang, X., Zhang, B., and Nagaumi, H., 2021. Improved Distribution and Uniformity of α-Al(Mn,Cr)Si Dispersoids in Al-Mg-Si-Cu-Mn (6xxx) Alloys by Two-Step Homogenization. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **52(8)**, 3204–3220. https://doi.org/10.1007/s11661-021-06243-3

An, Z., Yang, W., Zhan, H., Hu, B., Wang, Q., Matsumura, S., and Sha, G., 2020. On the strengthening effect of Al-Cr-Si dispersoid in an Al-Si-Mg-Cu casting alloy with Cr addition. *Materials Characterization*, **166**, 110457. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2020.110457

Mulazimoglu, M. H., Zaluska, A., Gruzleski, J. E., and Paray, F., 1996. Electron microscope study of Al-Fe-Si intermetallics in 6201 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A,* **27(4)**, 929–936. https://doi.org/10.1007/bf02649760

Kuijpers, N.C.W., Vermolen F.J., Vuik, K., and Zwaag, S., 2003. A Model of the β-AlFeSi to α-Al(FeMn)Si Transformation in Al–Mg–Si Alloys. *Materials Transactions,* **44(7),** 1448-1456. https://doi.org/10.2320/matertrans.44.1448

Mrówka-Nowotnik, G., and Sieniawski, J., 2005. Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. *Journal of Materials Processing Technology,* **162–163**, 367–372. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.115

Li, J. H., Wimmer, A., Dehm, G., and Schumacher, P., 2014. Intermetallic phase selection during homogenization for AA6082 alloy. *Philosophical Magazine*, **94(8)**, 830–846. https://doi.org/10.1080/14786435.2013.868943

Kuijpers, N. C. W., Kool, W. H., Koenis, P. T. G., Nilsen, K. E., Todd, I., and van der Zwaag, S., 2002. Assessment of different techniques for quantification of α-Al(FeMn)Si and β-AlFeSi intermetallics in AA 6xxx alloys. *Materials Characterization*, **49(5)**, 409–420. https://doi.org/10.1016/s1044-5803(03)00036-6

Zajac, S., Hutchinson, B., Johansson, A., and Gullman, L.-O., 1994. Microstructure control and extrudability of Al–Mg–Si alloys microalloyed with manganese. *Materials Science and Technology,* **10(4)**, 323–333. https://doi.org/10.1179/mst.1994.10.4.323

TS EN ISO 6892-1 Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature (ISO 6892-1:2019) https://doi.org/10.3403/30395181

Jeon, J., Lee, S., Kyeong, J., Shin, S., and Kang, H., 2022. Effect of Geometrical Parameters of Microscale Particles on Particle-Stimulated Nucleation and Recrystallization Texture of Al-Si-Mg-Cu-Based Alloy Sheets. *Materials,* **15(22)**, 7924. https://doi.org/10.3390/ma15227924

Ling, H., Shi, H., Du, X., Zan, J., and Liu, J., 2022. Effect of chromium content on microstructure and properties of casting Al-7Si-0.35Mg-0.02Sr alloy. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik,* **53(10)**, 1229–1241. https://doi.org/10.1002/mawe.202200071

Kim, H. Y., Park, T. Y., Han, S. W., and Lee, H. M., 2006. Effects of Mn on the crystal structure of α-Al(Mn,Fe)Si particles in A356 alloys. *Journal of Crystal Growth,* **291(1)**, 207–211. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.02.006

Zajac, S., Hutchinson, B., Johansson, A., and Gullman, L.-O., 1994. Microstructure control and extrudability of Al–Mg–Si alloys microalloyed with manganese. *Materials Science and Technology,* **10(4)**, 323–333. https://doi.org/10.1179/mst.1994.10.4.323

Belov, N.A., Eskin, D.G., and Aksenov, A.A., 2005. Multicomponent phase diagrams: Applications for commercial aluminium alloys. Elsevier, 1-95

Wang, L., Makhlouf, M., and Apelian, D., 1995. Aluminium die casting alloys: alloy composition, microstructure, and properties-performance relationships. *International Materials Reviews,* **40(6)**, 221–238. https://doi.org/10.1179/095066095790151133

Onurlu, S., 1993. Homojenizasyonun AA 6063 Alüminyum Alaşımının İçyapısı ve Özelliklerine Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Türkiye, 70-75.

Şendeniz, M., 2006. Seçilen bir Al-Mg-Si alaşımının (AlMgSi0.5; etial 60) ısıl işlemlerle özellik değişimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Türkiye, 80-83.

Wang, D., Zhang, X., Nagaumi, H., Li, X., and Zhang, H., 2020. 3D morphology and growth mechanism of cubic α-Al(FeMnCr)Si intermetallic in an Al-Si cast alloy. *Materials Letters*, **277**, 128384. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2020.128384

Jeon, J., Lee, S., Kyeong, J., Shin, S., and Kang, H., 2022. Effect of Geometrical Parameters of Microscale Particles on Particle-Stimulated Nucleation and Recrystallization Texture of Al-Si-Mg-Cu-Based Alloy Sheets. *Materials,* **15(22)**, 7924. https://doi.org/10.3390/ma15227924

Lodgaard, L., and Ryum, N., 2000. Precipitation of dispersoids containing Mn and/or Cr in Al–Mg–Si alloys. *Materials Science and Engineering: A,* **283(1–2)**, 144–152. https://doi.org/10.1016/s0921-5093(00)00734-6

Remøe, M. S., Westermann, I., and Marthinsen, K., 2018. Characterization of the Density and Spatial Distribution of Dispersoids in Al-Mg-Si Alloys. *Metals,* **9(1)**, 26. https://doi.org/10.3390/met9010026

Liu, K., and Chen, X.-G., 2015. Development of Al–Mn–Mg 3004 alloy for applications at elevated temperature via dispersoid strengthening. *Materials & Design,* **84,** 340–350. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.140

Li, Y. J., and Arnberg, L., 2003. Quantitative study on the precipitation behavior of dispersoids in DC-cast AA3003 alloy during heating and homogenization. *Acta Materialia,* **51(12)**, 3415–3428. https://doi.org/10.1016/s1359-6454(03)00160-5

Li, Z., Zhang, Z., and Chen, X.-G., 2017. Microstructure, elevated-temperature mechanical properties and creep resistance of dispersoid-strengthened Al-Mn-Mg 3xxx alloys with varying Mg and Si contents. *Materials Science and Engineering: A,* **708**, 383–394. https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.10.013

Du, Q., Poole, W. J., Wells, M. A., and Parson, N. C., 2013. Microstructure evolution during homogenization of Al–Mn–Fe–Si alloys: Modeling and experimental results. *Acta Materialia,* **61(13)**, 4961–4973. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2013.04.050

Wang, M., Guo, Y., Wang, H., and Zhao, S., 2022. Characterization of Refining the Morphology of Al–Fe–Si in A380 Aluminum Alloy due to Ca Addition. *Processes*, **10(4)**, 672. https://doi.org/10.3390/pr10040672

Alvarez-Antolin, F., Asensio-Lozano, J., Cofiño-Villar, A., and Gonzalez-Pociño, A., 2020. Analysis of Different Solution Treatments in the Transformation of β-AlFeSi Particles into α-(FeMn)Si and Their Influence on Different Ageing Treatments in Al–Mg–Si Alloys. *Metals*, **10(5)**, 620. https://doi.org/10.3390/met10050620

Kumar, S., Grant, P. S., and O'Reilly, K. A. Q., 2016. Evolution of Fe Bearing Intermetallics During DC Casting and Homogenization of an Al-Mg-Si Al Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, **47(6)**, 3000–3014. https://doi.org/10.1007/s11661-016-3451-5

Gedik, B., 2023. Alüminyum Alaşımlarında Homojenizasyon Isıl İşleminin Malzeme Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye, 44-45.

Fahri Ozdogru, E., 2023. The Effect of Chemical Composition on EN AW 6XXX Series Aluminum Alloys. *Recent Advancements in Aluminum Alloys*. 6-12 https://doi.org/10.5772/intechopen.110218

Khani Moghanaki, S., Kazeminezhad, M., and Logé, R., 2017. Effect of concurrent precipitation on the texture evolution during continuous heating of multi directionally forged solution treated Al-Cu-Mg alloy. *Materials Characterization,* **131,** 399–405. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2017.07.033

Xu, Y., Nagaumi, H., Han, Y., Zhang, G., and Zhai, T., 2017. The Deformation Behavior and Microstructure Evolution of a Mn- and Cr-Containing Al-Mg-Si-Cu Alloy During Hot Compression and Subsequent Heat Treatment. *Metallurgical and Materials Transactions A,* **48(3)**, 1355–1365. https://doi.org/10.1007/s11661-016-3881-0

Nes, E., Ryum, N., and Hunderi, O., 1985. On the Zener drag. *Acta Metallurgica,* **33(1)**, 11–22. https://doi.org/10.1016/0001-6160(85)90214-7

Liu, S. D., Yuan, Y. B., Li, C. B., You, J.H., and Zhang, X. M., 2012. Influence of cooling rate after homogenization on microstructure and mechanical properties of aluminum alloy 7050. *Metals and Materials International,* **18(4)**, 679–683. https://doi.org/10.1007/s12540-012-4016-9

Qin, J., Nagaumi, H., Yu, C., Liu, F., Li, Y., and Wang, L., 2022. Coarsening behavior of Mg_2Si precipitates during post homogenization cooling process in Al-Mg-

Si alloy. *Journal of Alloys and Compounds,* **902**, 162851. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162851

Goik, P., Schiffl, A., & Höppel, H. W. (2023). Formation of Peripheral Coarse Grain in Thin-Walled Al–Mg–Si Extrusion Profiles. Metallurgical and Materials Transactions A, **54(10)**, 3940–3956. https://doi.org/10.1007/s11661-023-07144-3

Guo, Z., Zhao, G., and Chen, X.-G., 2015. Effects of two-step homogenization on precipitation behavior of Al3Zr dispersoids and recrystallization resistance in 7150 aluminum alloy. *Materials Characterization,* **102**, 122–130. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.02.016

Lai, J., Shi, C., and Chen, X.-G., 2014. Effects of V addition on recrystallization resistance of 7150 aluminum alloy after simulative hot deformation. *Materials Characterization,* **96**, 126–134. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.07.028

Liu, F., Zhu, X., Qin, J., Zhou, W., Ling, J., Dong, Q., Yu, J., Nagaumi, H., and Zhang, B., 2022. Effect of Mn/Cr ratio on precipitation behaviors of α-Al(FeMnCr)Si dispersoids and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys. *Materials Science and Engineering: A*, **860**, 144269. https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144269

Strobel, K., Sweet, E., Easton, M., Nie, J. F., & Couper, M. 2010. Dispersoid Phases in 6xxx Series Aluminium Alloys. Materials Science Forum, **654–656**, 926–929. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.654-656.926

Ding, L., Zhang, X., Lu, C., Wang, C., Weng, Y., Dong, Q., Xu, S., Cao, L., & Jia, Z. 2024. Influence of the combined additions Mn, Cr or Ni on the formation of dispersoids and mechanical properties of Al–Mg–Si–Cu alloys. Materials Science and Engineering: A, **892**, 145962. https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145962

Guo, Z., & Sha, W. 2002. Quantification of Precipitation Hardening and Evolution of Precipitates. Materials Transactions, **43(6)**, 1273–1282. https://doi.org/10.2320/matertrans.43.1273

Zhao, Q., Holmedal, B., & Li, Y. 2013. Influence of dispersoids on microstructure evolution and work hardening of aluminium alloys during tension and cold rolling. Philosophical Magazine, **93(22)**, 2995–3011. https://doi.org/10.1080/14786435.2013.794315