

AKÜ FEMÜBİD 18 (2018) 015701(1036-1042)

AKU J. Sci.Eng.18 (2018) 015701 (1036-1042)

DOI: 10.5578/fmbd.67632

Araştırma Makalesi / Research Article

Isıl İşlem Süresinin Ötektik-Altı Al-Si Alaşımlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi

Yusuf ÇEVİRİR¹, Sertan NECİP¹ ve Mehmet YILDIRIM¹¹Selçuk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Konya, 42130, Türkiye.
e-posta: ymehmet@selcuk.edu.tr

Geliş Tarihi: 17.11.2017 ; Kabul Tarihi: 07.11.2018

Özet

% 7,29 Si oranına sahip Al-Si döküm alaşımının yapısal ve mekanik özelliklerine ısı işlem süresinin etkisi sistematik olarak incelenmiştir. Numunelere 200°C sıcaklıkta 1, 2, 4, 16 ve 64 saat ısı işlem uygulanmıştır. Mikroyapı ve faz analizleri optik mikroskop ve X-ışınları kırınımı ile termal özellikleri diferansiyel taramalı kalorimetre ile mekanik özellikleri ise çekme ve sertlik ölçümleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Dökülmüş haldeki alaşımın mikroyapısı birincil kristalleşmiş Al dendritleri ve kaba Si ötektiğinden meydana gelmektedir. Uygulanan ısı işlemin mikroyapısal özelliklere çok önemli bir etkisi olmamasına rağmen çekme dayanımı, sertlik ve uzama gibi mekanik özellikler de ciddi değişimlere yol açtığı gözlemlenmiştir. En yüksek uzama değeri ve en düşük çekme dayanımı ısı işlem görmemiş döküm alaşımında gözlemlenmiştir. En düşük uzama değeri ve en yüksek çekme dayanımı ise 4 saat ısı işlem görmüş numunede gözlemlenmiştir. Dayanım ve sertlik 0-4 saat arası sürelerde artış gösterirken, 4-64 saat arası sürelerde ise azalma eğilimindedir.

Anahtar kelimeler

Al alaşımları,
Mikroyapı,
Mekanik özellikler,
Çekme testi

Effect of Annealing Time on Mechanical Properties of Hypo-Eutectic Al-Si Alloys

Abstract

The effect of annealing time on the structural and mechanical properties of cast Al-Si alloy having 7.29 % Si were systematically investigated. The samples were annealed at 200 ° C for 1, 2, 4, 16 and 64 hours. Microstructural examination and phase analysis were performed using optical microscope and X-ray diffraction, respectively. Thermal properties were investigated by differential scanning calorimetry. Besides, mechanical properties were characterized by tension and hardness tests. The microstructure of the as-cast alloy was composed of primary crystallized Al dendrites and coarse and faceted Si eutectic. Although the heat-treatment did not have a very significant effect on microstructural properties, the mechanical properties such as tensile strength, hardness and elongation significantly changed after heat-treatment. The highest elongation value and the lowest tensile strength were observed for the cast alloy. However, the lowest elongation value and the highest tensile strength were observed for the 4 hour heat treated sample. Strength and hardness has an increasing tendency between 0-4 hours and decreasing tendency during 4-64 hours.

Keywords

Al alloys,
Microstructure,
Mechanical properties,
Tension test

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

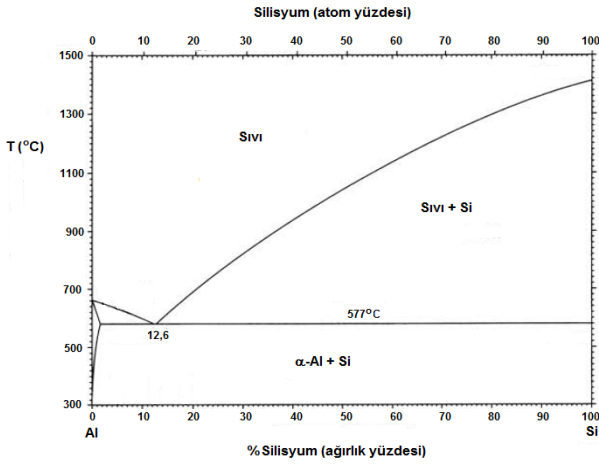
1. Giriş

Alüminyum alaşımları mühendislik uygulamalarında çelikten sonra en yaygın kullanılan metalik malzemelerdir (Int Kyn.1). Al alaşımları silindir kafaları, dişli kutuları, jantlar, radyatörler, tamponlar, egzoz manifoldları, pistonlar, yakıt tankları, fren ve süspansiyon parçaları gibi otomotiv endüstrisinde çeşitli uygulamalara

sahiptir (EijoforveReddy 1997). Bu alaşımların içerdikleri uygun alaşım elementi ve uygulanan ısı işleminden kaynaklı mükemmel mekanik özelliklere sahip olmaları ve alüminyumun hafifliğinden kaynaklı yakıt tüketimini önemli ölçüde azaltmaları otomotiv uygulamalarında çelik parçaların yerine kullanımını sağlamaktadır (Gül2014, ve Mohamedet al.2009). Al alaşımlarında bakırdan sonra kullanılan en önemli alaşım elementi silisyumdur. Bunun

sebepleri silisyumun sıvı alüminyumun akışkanlığını arttırması, erime noktasını düşürmesi, katılaşma sırasında çekmeyi azaltması ve hammadde olarak ucuz olmasıdır. Ayrıca silisyum düşük bir yoğunluğa sahip olup döküm parçanın toplam ağırlığını da azaltmaktadır (KalhapureveDigpe 2015, Rana *et al.* 2012).

Şekil 1.'de verilen Al-Si ikili faz diyagramına (MurrayveMcAlister 1984) göre silisyum alüminyum içerisinde eser miktarda çözünmekte ve % 12,6 Si'ye denk gelen ötektik nokta bulunmaktadır. Silisyumun alüminyum içerisindeki düşük çözünürlüğünden dolayı silisyum alüminyum matris içerisinde çökelti oluşturmakta bu da alaşımın mekanik özelliklerine önemli katkılar yapmaktadır (KalhapureveDigpe 2015). Ötektik ve ötektik bileşime yakın ötektik altı Al-Si alaşımları mükemmel aşınma ve korozyon direnci, düşük ısıl genişleme katsayısı, yüksek dayanım/ağırlık oranı gibi sebeplerden ötürü döküm endüstrisinde çok yaygın kullanılmaktadır (Gül 2014 ve Mohamedet *al.* 2009). Fakat Si miktarındaki artış Al-Si alaşımının uzama değerlerinde belirgin azalmaya sebep olmaktadır. Bu yüzden bu tip alaşımların iyileştirilmeleri gerekmektedir.



Şekil 1. Al-Si ikili faz diyagramı (MurrayveMcAlister 1984).

Ötektik ve ötektik bileşime yakın Al-Si döküm alaşımlarının mekanik özellikleri alaşımın kimyasal bileşiminden ziyade mikroyapısal özelliklere bağlıdır. Dendritik α -Al ve ötektik Si miktarı ve morfolojisi, mikroyapıda bulunan olası diğer intermetalik bileşiklerin varlığı ve ısıl işlem sırasında gerçekleşen değişikliklerin alaşımın mekanik

özelliklerine önemli etkileri mevcuttur. Geçmişte ve son yıllarda yapılan çalışmalarda Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerine Sr ve Na gibi tane inceltici alaşım elementi ilavesinin ve uygulanan ısıl işlemin önemli etkileri olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılan % 7,29 Si içeren ticari ötektik-altı Al-Si döküm alaşımının mikroyapı ve sertlik, çekme dayanımı ve uzama gibi oda sıcaklığı mekanik özelliklerine ısıl işlem süresinin etkisi sistematik bir şekilde incelenmiştir.

2. Materyal ve Metot

Deneylerde Çizelge 1'de verilen kimyasal bileşime sahip ticari Al alaşımı külçesi kullanılmıştır. Alaşımın kimyasal bileşimi Oxford Instruments Foundry Master Pro model spektrometre kullanılarak ölçülmüştür. Külçeden elde edilen numunelere ısıl işlem uygulanmıştır. Öncelikle numunelere 500°C sıcaklıkta 1 saat bekletilmiştir. Daha sonra numunelere oda sıcaklığında su verilmiştir. Son olarak numuneler 200°C sıcaklıkta 1, 2, 4, 16 ve 64 saat ısıl işlem uygulanıp fırında soğutulmaya bırakılmışlardır.

Isıl işlemden sonra numuneler mikroyapısal inceleme için standart metalografik numune hazırlama işlemleri kullanılarak hazırlanmıştır. Bu işlem kapsamında numuneler önce bakalite alınmış, sonra zımparalanmış ve 1 μm Al_2O_3 ile parlatılmıştır. Alaşımın faz analizi Bruker D8 Advance model X-ışını kırınım cihazı (XRD) kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, tarama hızı 2°/dk ile $2\theta=10-90^\circ$ aralığında olacak şekilde ve dalga boyu 1.5406 Å olan Cu-K α ışınması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yaşlandırma öncesi ve sonrası mikroyapı incelemesi ZeissAxioVision model optik mikroskop kullanılarak yapılmıştır. Deneyde kullanılan alaşımın ötektik ve erime sıcaklıkları termal analiz ölçümleri ile belirlenmiştir. Termal analiz ölçümleri SetaramSetsys 16/18 model Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ile yapılmıştır. Ölçüm Ar gaz atmosferi altında 10°/dak ısıtma ve soğutma hızlarında gerçekleştirilmiştir.

Numunelerin mekanik özellikleri sertlik ve çekme deneyleri ile saptanmıştır. Numunelerin Brinell

sertlik değerleri EMCO Test DuraVision 300 model sertlik ölçme cihazı kullanılarak 62.5kgf yük altında ve 2.5 mm bilya ile yapılmıştır. Çekme deneyleri

Instron 8801 model üniversal mekanik test cihazında yapılmıştır.

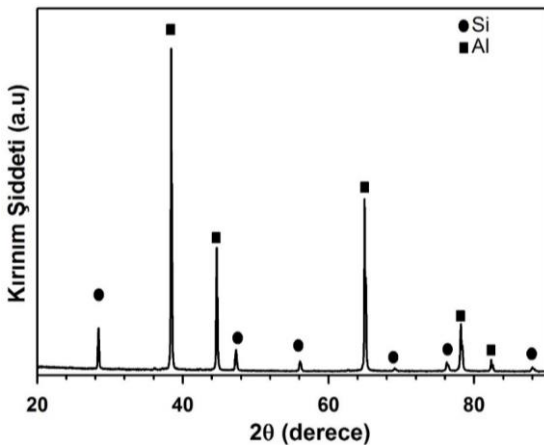
Çizelge 1. Deneylerde kullanılan Al alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Sn
Miktar	92,34	7,29	0,21	0,068	0,022	0,022	0,003	0,006	0,011	0,03
Ağırlıkça %										

3. Bulgular

3.1 Yapısal özellikler

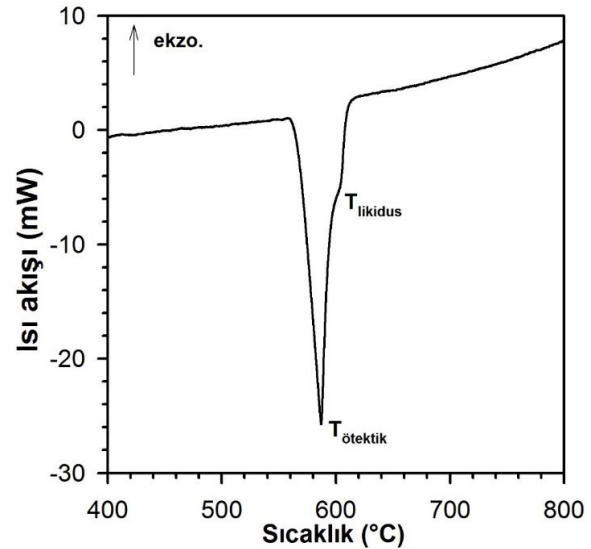
Çalışmada kullanılan numuneye ait XRD sonuçları Şekil 2.'de verilmektedir. Şekil 2.'den de görüleceği üzere numunede sadece Al ve Si fazlarına rastlanmış olup Al-Si esaslı alaşımlarda ikinci faz sertleşmesine sebep olan Al_5FeSi ve Al_4FeSi intermetalik fazlarına rastlanmamıştır. İntermetalik fazların görülmemesinin sebebi Çizelge 1.'de verilen spektrometre sonuçlarında Fe miktarının çok düşük olmasından kaynaklanmaktadır. Deneylerde kullanılan Al-Si alaşımı % 7,29 Si'a sahip olan ötektik-altı bir alaşımdır. Bu alaşıma ait termal analiz ısıtma eğrilerinde (Şekil 3.) 582°C'de ötektik reaksiyona ait ve 602°C'de likidusa ait endotermik reaksiyon pikleri görülmektedir. Termal analiz ölçümleri sonucunda Al-Si ikili faz diyagramında bulunan ötektik ve likidus sıcaklıkları ile çok yakın sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Bu sonuçta çalışılan kompozisyonun kimyasal bileşimini doğrulamaktadır.



Şekil 2. Deneyde kullanılan alaşıma ait X-ışınları kırınım eğrisi.

Dökülmüş haldeki ve farklı sürelerde ısıl işlem uygulanmış numunelere ait mikroyapı resimleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Döküm alaşımı ve ısıl

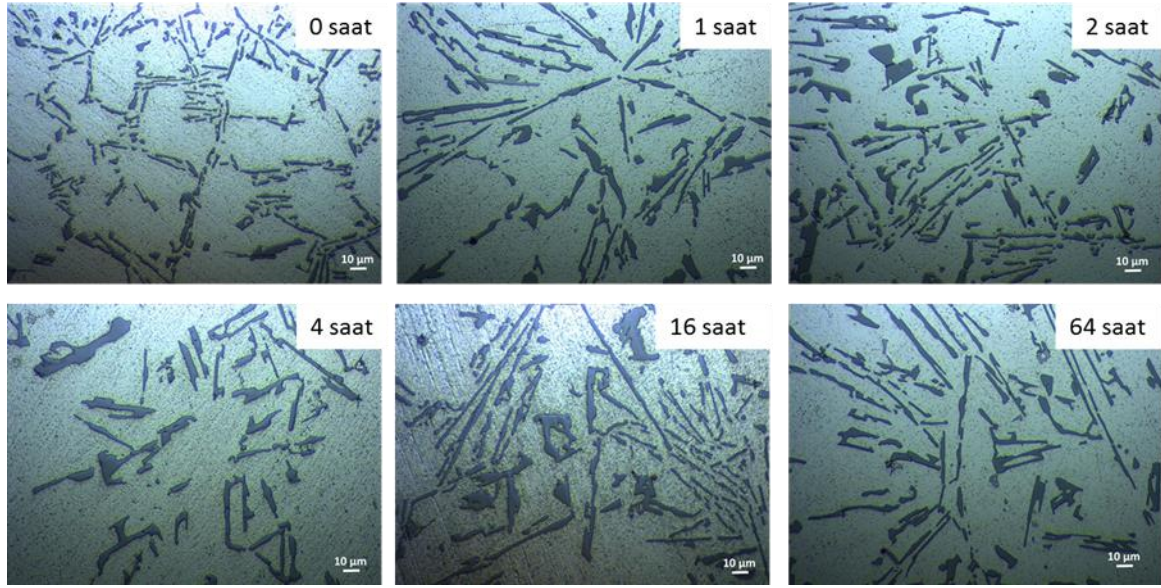
işlem görmüş numunelerin birincil kristalleşen α -Al dendritlerden (açık renkli faz) ve dendritler arası bölgede bulunan kaba Si lamellerden (koyu renkli faz) meydana gelen mikro yapıya sahip olduğu görülmektedir. Birincil kristalleşen α -Al dendritlerinin miktarı ASTM E562 Sistematik Elle Nokta Sayma Metodu Standardına göre hacimce % 39,9 olarak bulunmuştur. Bulunan değer Al-Si ikili faz diyagramında % 7,3 Si içeren bileşime kaldırma kuralına göre hesap edilen % 42,1 değeri ile uyumludur. Döküm alaşımının mikroyapısı ile ısıl işlem görmüş numunelerin mikro yapıları karşılaştırıldığında koyu renkli Si lamellerinin ısıl işlem sonucunda bir miktar irileştiği görülmektedir.



Şekil 3. Deneyde kullanılan Al-Si alaşımına ait termal analiz ısıtma eğrisi (Isıtma hızı 10°C/dak.).

Isıl işlem süresinin mikro yapıya etkisi incelendiğinde, numunelerin mikro yapılarının ısıl işlem süresi ile çok fazla değişmediği gözlemlenmiştir.Çizelge 2'de verilen ısıl işlem süresine göre Si parçacık büyüklüğündeki değişimde, 16 saatlik süreye kadar Si lamellerinin büyüklüğünün arttığı; 64 saat'te ise tekrar azaldığı gözlemlenmiştir. Eğer Si parçacıklarını saran Al matriste safsızlık bulunuyorsa Si mikroyapısı önemli

ölçüde etkilenmektedir. 1 ve 2 saat sürelerde Si parçacıklarının dar boyut dağılımına sahip olduğu, 4 ve 16 saatlik sürelerde ise Si parçacıklarının geniş



Şekil 4. Farklı sürelerde ısıl işlem görmüş numunelere ait mikroyapı görüntüleri.

boyut dağılımına sahip olduğu ortaya çıkmıştır. Isıl işlem süresi 64 saat olduğunda ise parçacık boyut dağılımının tekrar azalıp 1 ve 2 saatlik numunelere yakın olduğu görülmüştür. Boyut dağılımında gözlemlenen bu durum irileşme teorisi ile açıklanabilmektedir (Wagner *et al.* 2001). Bu teoriye göre kısa yaşlandırma sürelerinde çekirdeklenme, orta yaşlandırma sürelerinde çekirdeklenme ve büyüme yüksek yaşlandırma sürelerinde ise parçacıklarda sadece büyüme görülmektedir. Buna göre boyut dağılımının orta yaşlandırma sürelerinde geniş olması tahmin edilmektedir.

Silikon Al içerisinde neredeyse hiç çözünürlüğe sahip olmayıp bu yüzden alaşımda saf Si olarak bulunmaktadır. Ayrıca metalik Al ile metalik olmayan Si arasında kovalent bağlar mevcut olup, Si fazı anizotropik olarak keskin köşeli kristaller şeklinde büyümektedir. Yaşlandırma sonrasında irileşen Si parçacıklarının Al matris fazı ile bir etkileşimi bulunabilmektedir. Al matris fazının içerdiği safsızlıklar Si mikroyapısını etkileyebilmektedir. Eğer Al içerisinde safsızlıklar mevcut ise bunlar çekirdekleştirici görevi görür ve Si parçacıkları daha ince morfolojide oluşabilmektedir. Ancak çalışılan alaşımda bu durum söz konusu olmayıp Si parçacıkları çekirdekleştirici etkisi olmadan oluşmakta ve

büyümektedirler (Hegde ve Prabhu2008, ve Ho ve Cantor 1995).

Çizelge 2. Isıl işlem süresine göre ortalama Si parçacık boyutları.

Isıl İşlem Süresi (saat)	Parçacık Boyutu (µm)
0	22,6±1,6
1	23,6±2,2
2	26,2±2,6
4	33,9±2,7
16	36,0±2,8
64	30,3±3,2

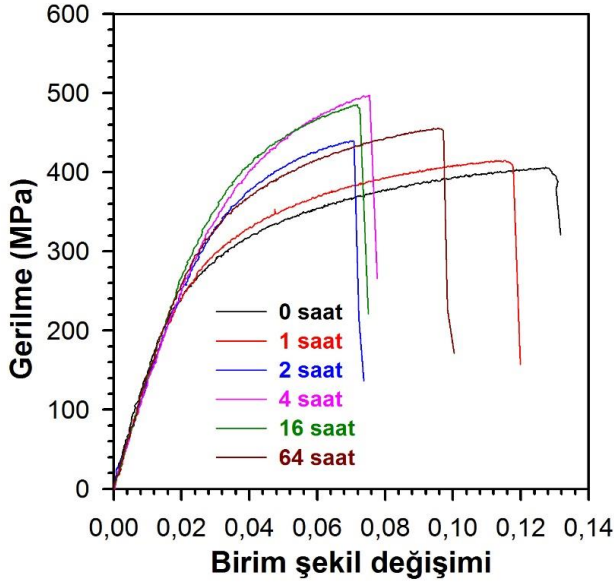
3.1 Mekanik özellikler

Deneysel olarak kullanılan döküm alaşımı ve ısıl işlem görmüş numunelerin mekanik özellikleri Brinell sertlik ve oda sıcaklığı çekme testleriyle ölçülmüştür. Çizelge3'te ısıl işlem süresine göre sertlik değerleri verilmektedir. Her bir numuneden en az 5 farklı sertlik ölçümü yapılmış ve ortalama sertlik değerleri hesap edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre, en düşük sertlik döküm alaşımında ölçülmüş olup bütün ısıl işlem süreleri için alaşımın sertlik değerinde artış gözlemlenmiştir. Sürenin artmasıyla sertlik değerleri artmakta ve 4 saat ısıl işlem görmüş numunede maksimuma ulaşmaktadır. Sürenin daha da artmasıyla birlikte (16 ve 64 saat) sertlik değerleri azalma eğilimindedir. Genel olarak incelendiğinde 2, 4, 16 ve 64 saat ısıl işlem görmüş numuneler, döküm

alaşımı ve 1 saat ısıtım görmüş numunelere kıyasla daha yüksek sertlik değerlerine sahiptir.

Çizelge 3. Isıl işlem süresine göre Brinell sertlik değerleri.

Isıl İşlem Süresi (saat)	0	1	2	4	16	64
Sertlik (HB)	46,3	54,3	75,6	85,9	79,2	72,4



Şekil 5. Farklı sürelerde ısıtım görmüş numunelere ait çekme testi gerilme-birim şekil değişimi eğrileri.

Şekil 5'te deneyde kullanılan numunelere ait oda sıcaklığı çekme testi gerilme-birim şekil değişimi eğrileri görülmektedir. Bu eğriler detaylı bir şekilde incelendiğinde döküm alaşımının en yüksek uzama değerine ve en düşük çekme mukavemetine sahip olduğu görülmüştür. Bununla birlikte numunelerin çekme dayanımı 4 saat ısıtım süresine kadar artmış ve bu sürede maksimum değere ulaştıktan sonra ısıtım süresinin daha da artmasıyla tekrar azalma eğilimine girmiştir. Sertlik sonuçları ile çekme testi sonuçları karşılaştırıldığında her iki testten elde edilen verilerin birbiri ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4. Isıl işlem süresine göre statik tokluk değerleri.

Isıl İşlem Süresi (saat)	Tokluk (MPa. mm/mm)
0	42,8
1	39,7
2	26,5
4	27,8
16	25,7

Çekme testi sonuçlarına göre döküm alaşımı ve 1 saat ısıtım görmüş numune en yüksek uzama ve en düşük çekme ve akma dayanımına sahip iken, aynı numuneler en düşük sertlik değerlerine de sahiptir. Diğer numunelere kıyasla daha yüksek sertliğe sahip ve birbirleri ile benzer sertlik değeri gösteren 2, 4 ve 16 saat ısıtım görmüş numunelerin çekme eğrileri de benzer olup aynı zamanda en yüksek çekme ve akma dayanımına ve en düşük uzamaya da sahiptirler. Isıl işlem süresinin 64 saate çıkarılmasıyla birlikte sertlikte azalmaya paralel olarak, çekme ve akma dayanımı azalmış, uzama miktarı ise artmıştır. 64 saat yaşlandırılmış numune için mekanik özelliklerde meydana gelen azalmanın (dayanım ve sertliğin azalması) temel sebebi aşırı yaşlandırmadır.

Çekme eğrilerinin altında kalan alandan numunelerin statik tokluk değerleri hesap edilmiş ve Çizelge 4'te verilmiştir. Bu değerlere göre dökülmüş haldeki ve en kısa süre yaşlandırmaya uğrayan 1 saatlik numune en yüksek tokluk değerlerine sahiptir. Yaşlandırma süresinin artmasıyla tokluk azalmıştır ve 2, 4, 16 ve 64 saat yaşlandırılmış numunelerde hesap edilen tokluk değerleri birbirine çok benzerdir.

Numunelerin mekanik özellikleri kısaca özetlenecek olursa numuneler 3 grupta değerlendirilebilir: (i) döküm alaşımı ve 1 saat ısıtım görmüş numune; düşük sertlik, nispeten yüksek uzama, nispeten düşük çekme ve akma dayanımı ve nispeten yüksek tokluk (ii) 2, 4 ve 16 saat ısıtım görmüş numuneler; yüksek sertlik, nispeten yüksek uzama ve yüksek çekme dayanımına nispeten düşük tokluk (iii) 64 saat ısıtım görmüş numune önceki gruba benzer fakat aşırı yaşlandırmadan ötürü daha yüksek uzama, daha düşük çekme ve akma dayanımı ve nispeten düşük tokluk.

Al-Si alaşımlarındaki ötektik mikroyapı diğer Al alaşımlarındaki ötektik mikroyapıdan daha karmaşıktır. Bunun sebebi silisyumun fasetli(keskin köşeli) bir faz olmasından kaynaklanmaktadır (Dahle *et al.* 2001). Ayrıca bu tip alaşımlarda ötektik mikroyapı araştırmalarında Al-Si ötektiğinin eşli-ötektik olduğu gözlemlenmiştir. Eşli ötektik

mikroyapıda Al ve Si yarı kararlı durumda düşük enerjili ara yüzeyde yan yana büyümektedir (Jenkinsonve Hogan 1975, Lu veHellowell 1987, Shamuzzohaet al. 1992). Modifiye edilmemiş Al-Si ötektiğinin önündeki büyümenin çok pürüzlü olduğu ve en düşük yapısal aşırı soğumaya sahip Si tarafından kontrol edildiği bilinmektedir (Lu veHellowell 1995). Silisyum kristalleri belirli kristalografik doğrultularda anizotropik şekilde büyümektedir. Bu yüzden, silisyum kristalleri {111} gibi daha yavaş büyüyen düzlemlerden oluşan fasetler tarafından kuşatılmıştır (Lu veHellowell 1987). Al-Si ötektiği düzensiz bir ötektik olup silisyumun büyüme yönü çok zor değişmektedir (Dahle et al. 2001).

Ötektik ve ötektiğe yakın bileşime sahip Al-Si alaşımlarının mikroyapıları düşük oranda Si içeren alaşımların mikroyapılarına kıyasla ısıl işleme çok fazla modifiye edilememektedir. Bu tip alaşımlarda mikroyapının kontrolü için öncelikli olarak yapılması gereken dökümden hemen önce erimiş haldeki alaşıma tane inceltici olarak çok az miktarlarda stransiyum ve sodyum ilavesidir. Bu elementlerin ilavesi silisyum fazını modifiye etmektedir ve ötektik silisyumun büyüme karakteristiklerini değiştirmektedir. Ayrıca, bu elementlerin varlığında Al-Si alaşımlarının çekme dayanımlarında ve uzama değerlerinde önemli artışlar gözlemlenmiştir (Dahle et al. 2001, Oğuz 1990).

4. Sonuçlar ve Tartışma

% 7,29 Si oranına sahip ticari Al-Si döküm alaşımının mikroyapı ve oda sıcaklığı mekanik özelliklerine ısıl işlem süresinin etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Isıl işlem süresinin mikroyapıda bulunan fazların miktarı, dağılımı ve morfolojisine çok önemli bir etki yapmadığı, sadece süreye bağlı olarak fasetli silisyum fazının parçacık büyüklüğünün az da olsa değiştiği gözlemlenmiştir. İncelenen numuneler arasında döküm alaşımı en düşük sertlik ve çekme dayanımına ve en yüksek uzama değerlerine sahiptir. 4 saat ısıl işlem görmüş numune ise en yüksek sertliğe ve çekme dayanımına ve en düşük uzama değerlerine sahiptir.

Teşekkür

Katkılarından dolayı Selçuk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü teknisyeni Ali ÖZDOĞAN'a teşekkür ederiz.

5. Kaynaklar

- Dahle A.K.,Nogita K., Zindel J.W., McDonald S.D., Hogan L.M., 2001.EutecticNucleationandGrowth in Hypoeutectic Al-Si Alloys at DifferentStrontiumLevels, *MetallurgicalandMaterialsTransactions A*, **32**, 949-960.
- Ejiofor J.U.,Reddy R.G., 1997.Developments in theprocessingandproperties of particulate Al-Si Alloycomposites, *JOM Journal of theMinerals, MetalsandMaterials*, **49**, 31-37.
- Gül F., 2014. AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi, *Suleyman Demirel UniversityJournal of Natural andAppliedScience*, **18**, 30-37.
- Hegde S.,Prabhu K.N., 2008. Modification of eutecticsilicon in Al-Si alloys, *Journal of MaterialsScience*,**43**, 3009-3027.
- Ho C.R.,Cantor R., 1995.Heterogeneousnucleation of solidification of Si in Al-Si and Al-Si-P alloys*ActaMettallurgica etMaterilia*,**43**, 3231-3246.
- Jenkinson D.C.,Hogan L.M., 1975.Themodification of aluminium-siliconalloyswithstrontium, *Journal of CrystalGrowth*, **28**, 171-187.
- Kalhature M.G.,Dighe M.P., 2015.Impact of Silicon Content on MechanicalProperties of AluminumAlloys, *International Journal of ScienceandResearch*, **4**, 38-40.
- Liao H.,Zhang M., Wu Q., Wang H., Sun G., 2007. Refinement of eutecticgrainsbycombinedaddition of strontiumandboron in near-eutectic Al-Si alloys. *ScriptaMaterialia*, **57**, 1121-1124.
- Liao H., Sun Y., Sun G., 2002. Correlationbetweenmechanicalpropertiesandamount of dendritic a-Al phase in as-castnear-eutectic Al-11.6% Si alloysmodifiedwithstrontium. *MaterialsScienceandEngineering*, **A335**:62-66.
- Lu S.Z.,Hellowell A., 1995., Modification of Al-Si alloys: Microstructure, thermalanalysis, andmechanisms,

- JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials*, **47**, 38-40.
- Lu S.Z., Hellawell A., 1987. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning, *Metallurgical Transactions A*, **18A**, 1721-1733.
- McDonald S., Nogita K., Dahle A., 2004. Eutectic nucleation in Al-Si alloys, *Acta Materialia*, **52**, 4273-4280.
- Mohamed, A.M.A., Samuel, A.M. Samuel, F.H., Doty, H.W., 2009. Influence of additives on the microstructure and tensile properties of near-eutectic Al-10.8%Si cast alloy, *Materials and Design*, **30**, 3943-3957.
- Murray J.L., McAlister A.J., 1984. The Al-Si (Aluminum-Silicon) system, *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, **5**, 74-84.
- Oğuz B., 1990., Alüminyum Alaşımları, Demir Dışı Metallerin Kaynağı, Oerlikon Yayınları, 1-23.
- Rana R. S., Purohit R., Das S., 2012. Review on the influence of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys, *International Journal of Scientific and Research Publication*, **2**, 1-7.
- Shamuzzoha M., Hogan L.M., Berry J.T., 1992., Growth Crystallography of Eutectic Phases in Unmodified Al-Si Casting Alloys, *AFS Transactions*, **69**, 619-629.
- Wagner R., Kampmann R., Voorhees P.W., 2001., Homogeneous Second Phase Precipitation, in *Phase Transformations in Materials*, Wiley-VCH, 309-407.
- Zeren M., Karakulak E., 2008. Influence of Ti addition on the microstructure and hardness properties of near-eutectic Al-Si alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, **450**, 255-259.

İnternet kaynakları

1 [http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum ve Aluminyum Alasimlari.pdf](http://www.yildiz.edu.tr/~akdogan/lessons/malzeme2/Aluminyum%20ve%20Aluminyum%20Alasimlari.pdf)