



AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi

Ferhat GÜL*¹

¹Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği 06500, Ankara

(Alınış Tarihi: 15.03.2013, Kabul Tarihi: 15.04.2014)

Anahtar Kelimeler

Abrasif aşınma
İkincil yaşlandırma
Sertlik
Mikroyapı

Özet: Bu çalışmada AlSi10Mg alaşımının ikincil yaşlandırma prosesinin sertlik ve abrasif aşınma direncine etkisi araştırılmıştır. T6 ısıl işleminde Al10SiMg alaşımı numuneler 170 °C'de 4 saat yaşlandırılmıştır. İkincil yaşlandırma işleminde 170 °C'de 10 ve 30 dakika yaşlandırılmış olan numuneler 100 °C'de 135 saat yeniden yaşlandırılmıştır. Abrasif aşınma testleri, pin on disk abrasif aşınma test cihazında 180 Mesh zımpara, 20 ve 30 N yük altında 0.2 ms⁻¹ kayma hızında gerçekleştirilmiştir.

Abrasif aşınma test sonuçları, 170 °C'de 30 dk yaşlandırılan, ardından 100 °C'de 135 saat yeniden yaşlandırma işlemi yapılan numunenin, en yüksek abrasif aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Effect of Secondary Ageing Treatment on Some Mechanical Properties of AlSi10Mg Casting Alloys

Keywords

Abrasive wear
Secondary ageing
Hardness
Microstructure

Abstract: In this paper, effect of secondary ageing process on the hardness and the abrasive wear resistance of AlSi10Mg casting alloys was studied. In the T6 temper heat treatment, AlSi10Mg alloy was aged at 170 °C for 4 hours. In secondary ageing process, AlSi10Mg alloy aged at 170 °C for 10 or 30 minutes was re-aged at 100 °C for 135 hours. Abrasive wear tests were performed on pin-on disk abrasive wear tester under 20 N and 30 N loads and 180 Mesh abrasive papers and at the sliding speed of 0.2 ms⁻¹.

Abrasive wear test results revealed that specimen aged at 170 °C for 30 minutes and then re-aged at 100 °C for 135 hours has the highest abrasive wear resistance.

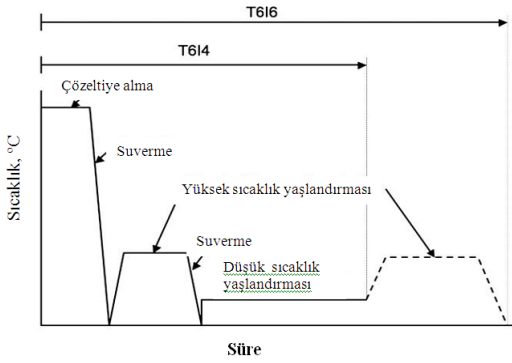
1. Giriş

Mükemmel abrasif aşınma ve korozyon direnci, düşük ısıl genleşme katsayısı, yüksek mukavemet/ağırlık oranı nedeniyle, ötektik ve ötektige yakın Al-Si alaşımları döküm endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Mohamed vd., 2009). Artan mekanik performans ve azalan yakıt tüketimi nedeniyle alüminyum silisyum alaşımları, otomotiv endüstrisinde birçok uygulamalara sahiptir. Bu döküm alaşımlarının mekanik performansında gelişme, uygun alaşım elementlerinin ilavesi ve uygun ısıl işlem uygulanarak başarılabilir (Ammar vd., 2008). 319 tipi alaşımların katılaşması sırasında intermetalik β -Al₅FeSi fazı, çok ince plakalar olarak bulunduğu ve kırılğan olduğu için mekanik özelliklere zararlıdır. Daha az zararlı olan Çin yazısı şeklindeki α -

Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ fazı ile yer değiştirilerek β fazının zararlı etkisini azaltmak için Mn ilaveleri kullanılmaktadır. Cr, Co, K ve Be gibi diğer elementlerin β -Al₅FeSi fazını ve bu fazın mekanik özellikler üzerindeki etkisini ortadan kaldırdığı belirtilmektedir (Hwang vd., 2008). Her ne kadar süneklikte kayba neden olmakla beraber Mg ve Cu, Al-Si alaşımlarına genel olarak ilave edilen iki temel alaşım elementidir. Gümüş ise belirli alüminyum-bakır birincil mukavemet alaşımlarında korozyon direncini geliştirmek ve aynı zamanda bu alaşımların çökeltme sertleşmesine katkıda bulunmak için sınırlı uygulamalara sahiptir. Son yıllarda Cu ve Mg içeren Al-Si alaşımlarının ısıl işlem prosesi belirli açılardan araştırılmıştır. Mukavemet artışına neden olan yaşlanma sertleşmesi mekanizması, eriyiğe sokma ve su verme sırasında elde edilmiş yarı kararlı aşırı

* İlgili yazar: fgul@gazi.edu.tr

doymuş katı eriyiğın ayrışması sırasında intermetalik bileşiklerin oluşumuna bağlıdır. Bu alaşımların mekanik özellikleri, çökeltilerin bulunması ile önemli derecede etkilenmektedir (Li vd., 2004). Son zamanlarda alüminyum alaşımlarının ısı işleme cevab vermesini geliştirmek için kesikli yaşlandırma işlemi adı verilen çok aşamalı yaşlandırma işlemi geliştirilmiştir (Risanti vd., 2009). İkincil yaşlandırma olarak da anılan bu işlem alaşımların yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılmasından sonra daha düşük sıcaklıklarda tutularak mikroyapısal gelişim prosesine verilen isimdir (Marceau vd., 2010) ve birçok çalışmada farklı şekillerde ikincil yaşlandırma ısı işleme uygulanmıştır (Risanti vd., 2009, Buha vd., 2008, Buha vd., 2006, Lumley vd., 2004, Buha vd., 2007). Risanti ve arkadaşları (2009) tarafından AA 6061 alaşımına uygulanan kesikli yaşlandırma işlemi sematik olarak Şekil 1'de gösterilmiştir.

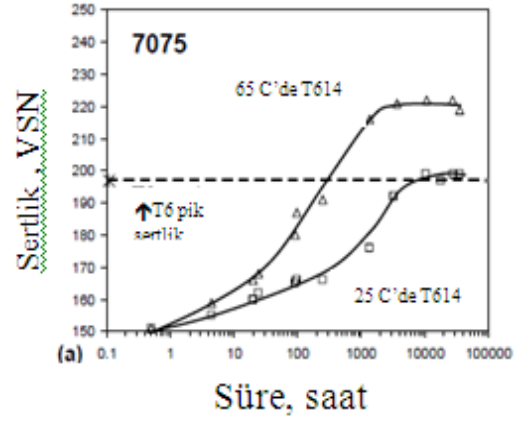


Şekil 1. İkincil yaşlandırma ısı işleminin uygulanması [5]

Şayet sertleşebilir alüminyum alaşımları ilk önce 150 °C gibi yüksek sıcaklıklarda alt yaşlandırılır, su verilir ve ardından 25-65 °C gibi düşük sıcaklıklarda ısı işlem uygulanırsa ikincil yaşlandırma meydana gelebilir. Bu, düşük sıcaklıklarda ince çökeltilerin çekirdeklenmesini ve ekstra mukavemet artışı sağlamaktadır. Bu işlem yazarlar tarafından T614 işlemi olarak sınıflandırılmakta ve 6 ve 4 rakamlarının arasındaki I harfi, İngilizcede interrupted ifadesinin (kesikli) karşılığı olarak kullanılmaktadır ve alaşımlar normal olarak T6 işlemine benzer mukavemet özellikleri sergilemektedir. Şayet bu alaşımlar yüksek bir sıcaklıkta (T616) yeniden yaşlandırılırsa, eşzamanlı kırılma tokluğunda artış ile birlikte çekme özelliklerinde daha yüksek artış (% 10-15) meydana gelebilmektedir. Lumley ve arkadaşları, çözündürme işleminden sonra Ta, Tb ve Tc olarak 3 aşamalı bir yaşlandırma işlemi planlamışlardır. Burada Ta yaşlandırma sıcaklığı ve Tb oda sıcaklığı veya 65 °C gibi düşük sıcaklık, Tc'i ise bir deneyde Ta'dan daha düşük (T6I6), bir başka deneyde ise daha yüksek (T6I76) olarak uygulanmıştır. Bunun dışında çözündürme işleminden sonra Ta alt yaşlandırma ve su verme, 25-65 °C'de (Tb) yaşlandırma (T6I4) işlemi uygulamışlardır. Şekil 2'de böyle bir işlem yapılarak 25°C ve 65°C'de elde edilen sertlik değerleri

geleneksel T6 yaşlandırma işlemi pik değeri ile mukayeseli olarak verilmiştir (Lumley vd., 2004).

İkincil yaşlandırma işleminde, genel olarak ilk yaşlandırma aşamasında 150-200 °C gibi yüksek sıcaklıklar (Ta), bekleme aşamasında 25-65 °C gibi düşük sıcaklıklar (Tb) ve son yaşlandırma işleminde 150-200 °C gibi yüksek sıcaklıklar (Tc) kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda bekleme aşamasında genel olarak 100 °C gibi nispeten daha yüksek sıcaklıklar tercih edilmemiş ve ilk yaşlandırma aşamasının süresinin etkisi irdelenmemiştir. Bu amaçla literatürde bulunmayan bekleme sıcaklığının (Tb) yükseltilmesi ve aynı zamanda birincil yaşlandırma işlem aşamasının (Ta) süresinin kısaltılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada endüstride yaygın olarak kullanılan AlSi10Mg döküm alaşımında bu iki parametrenin sertlik ve aşınma dayanımı üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 2. Yaşlandırma ve ikincil yaşlandırma işleminin 7075 alaşımının sertliğe etkisi [9]

2. Deneysel Çalışmalar

Deneysel çalışmada kullanılan AlSi10Mg döküm alaşımının bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir. Ergitme işlemi için 7 Kg Al kapasiteli ergitme ocağı kullanılmıştır. Sıvı işlemleri gerçekleştirilen AlSi10Mg alaşımı 200 °C'ye ısıtılmış olan ASTM standardına uygun kokil kalıplara dökülmüştür. Dökülen numunelere uygulanan ısı işlem süreçleri Tablo 2 ve Şekil 3'de verilmiştir. Dökülmüş halde ve ısı işlem yapılmış numunelerden metalografik incelemeler için örnekler alınmış, zımpara ve parlatma işlemlerinden sonra Keller dağılayıcı kullanılarak dağılama işlemi gerçekleştirilmiştir. Öte yandan sertlik testi için numuneler, 1200 Mesh zımpara kullanılarak hazırlanmıştır. Sertlik testleri için Instron Wolpert Marka Dia Testor 1551 model cihaz ve 5 Kg yük kullanılmıştır. Sertlik testi sonuçları, 5 noktadan bulunan değerinin ortalaması olarak alınmıştır. Mikroyapı ve aşınma yüzeyi incelemeleri için sırasıyla Prior marka optik mikroskop ve JEOL JSM-6060 LV marka tarama elektron mikroskobu

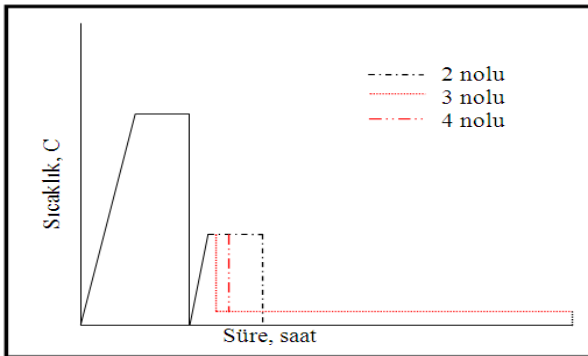
kullanılmıştır. Aşınma testleri için 6 mm çapında 30 mm uzunluğunda silindirik numuneler hazırlanmıştır. Aşınma testleri, pin on disk tipi abrasif aşınma test cihazında, 20 ve 30 N yükler altında, 0.2 m/sn kayma hızında, 180 Mesh zımpara kullanılarak 10 m. kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Abrasif aşınma kayıpları 0.1 mg hassasiyete sahip hassas terazi kullanılarak tespit edilmiştir. Her bir deney şartı ve numune için 3 adet ölçüm yapılmıştır.

Tablo 1. Çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi (% Ağı.)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr
9,42	0,38	0,05	0,431	0,36	0,015
Ni	Zn	Ti	Pb	Al	
0,04	0,06	0,1	0,011	Kalan	

Tablo 2. AlSi10Mg döküm alaşımına uygulanan ısıtım işlem süreçleri

Numune No	İşlem
1	Isıl işlemsiz (dökülmüş halde)
2	530 °C'de 4 saat tuz banyosu 60 °C suda su verme, 170 °C'de 4 saat yaşlandırma
3	530 °C'de 4 saat tuz banyosu 60 °C suda su verme, 170 °C'de 10 dk yaşlandırma, 100 °C'de 135 saat yaşlandırma
4	530 °C'de 4 saat tuz banyosu 60 °C suda su verme, 170 °C'de 30 dk yaşlandırma, 100 °C'de 135 saat yaşlandırma



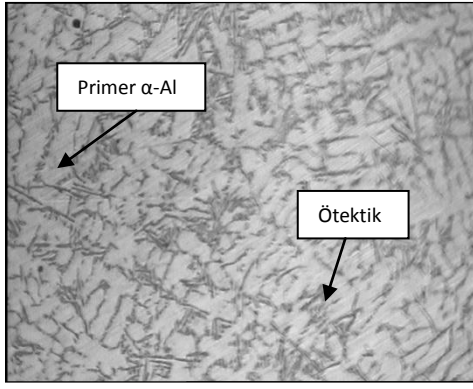
Şekil 3. Deneysel çalışmada kullanılan AlSi10Mg alaşımına uygulanan ısıtım işlem süreçleri

3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

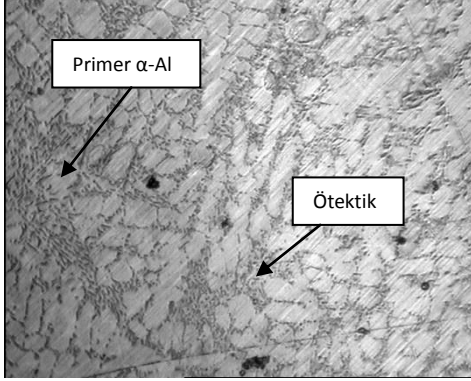
3.1. Mikroyapısal Özellikler

Dökülmüş halde ve ısıtım işlem yapılmış AlSi10Mg alaşımının mikroyapıları Şekil 4 a-d'de gösterilmiştir.

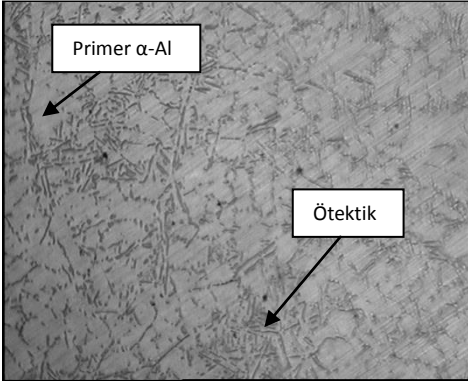
Döküm AlSi10Mg alaşımının primer α -Al dendritleri ve dendritler arası bölgede bulunan kaba ötektik karışımından oluşan bir mikroyapıya sahip olduğu görülmektedir. Isıl işlem ile birlikte ötektik yapıda incelleme ve ötektik silisyumda bir incelleme ve küreleşmenin meydana geldiği görülmektedir. Geleneksel yaşlandırılmış N2 ve diğer yaşlandırma işlemi uygulanmış N3 ve N4 numunelerinde silisyumun nispeten daha homojen dağıldığı belirlenmiştir. Sharma ve arkadaşları (2005) tarafından yapılan çalışmada yaşlandırma işleminden sonra dendritik yapının dağıldığı ve ötektik silisyumun küreleştiği belirlenmiştir. Döküm alaşımlarında ikincil fazların yaşlandırma işlemi üzerine etkileri ile ilgili alaşım bileşimlerine bağlı olarak farklı açıklamalar bulunmaktadır. Sjölander ve Seifeddine (2010) tarafından Al-Si-Mg sisteminde katılaşma sırasında oluşabilen Mg içeren fazların, Mg_2Si ve π -Fe fazları olduğu ifade edilmektedir. Bunun yanında β -Fe ve π -Fe oranlarını, katı eriyikte çözünmüş haldeki Mg içeriği kadar, alaşımdaki Mg ve Fe içeriği ve katılaşma hızının belirlediği ifade edilmektedir. Möller ve arkadaşlarının (2010) Al-7Si alaşımında yapmış oldukları çalışmada % 0,4 Mg bileşimine kadar alaşımdaki Mg'un çözündürme işlemi ile katı eriyiğe girdiği, bu oranın üzerinde Mg bulunduğu zaman artan miktarın katı eriyiğe girmediği Taylor ve arkadaşlarının verilerinden elde edilen sonuçlara dayanılarak ifade edilmiştir. Bu araştırmacılara göre düşük demir içeriğine (% 0.1-0.14) sahip 356 ve 357 malzeme Al7SiMg alaşımında, daha yüksek magnezyumun, daha yüksek sıcaklıklara kadar Mg içeren π ($FeMg_3Si_6Al_8$) fazının kararlılığını arttırdığı, ikinci olarak Mg_2Si 'un çözünme sıcaklığını arttırdığı ve yüksek sıcaklıklarda magnezyum içermeyen β -AlFeSi₅ fazını bastırdığı ifade edilmektedir. Bu çalışmada kullanılan malzeme % 0.38 Fe ve % 0.36 Mg, % 0.431 Mn içermektedir. Kullanılan bu bileşime bağlı olarak farklı ikincil çökeltilerin oluşabileceği ve bunlarında ısıtım süreçlerini etkileyebileceği ve alaşımın demir içeriğinin oldukça önemli olduğu düşünülmektedir. Demirin önemi, Mg ve Fe içeren π fazının oluşumunu teşvik etmesi ve böylece mukavemeti arttıran katı eriyikten magnezyumu gidermesidir. Yüksek Mg içeren alaşımlarda eriyiğe sokma ısıtım işlemi sırasında π fazının kalıcı olduğu, eriyiğe sokma işlem sıcaklıklarında yüksek Mg içeren alaşımlarında β fazından ziyade π ($FeMg_3Si_6Al_8$) fazının ana demir içeren faz olduğu belirtilmektedir. Demirin alüminyumda katı eriyebilirliği çok düşük (%0.05) olduğu için, demir genellikle Al-Fe veya Al-Fe-Si intermetalitiği olarak ikinci faz formunda bulunmaktadır. Fe, Mn, ve Mg içeren ötektik altı ve ötektik alaşımlarda üç ana faz oluştuğu ve bunların da α -Al₁₅(FeMn)₃Si₂ (α -Fe), β -Al₅FeSi (β -Fe), π -Al₈FeMg₃Si₆ (π -Fe) olduğu ifade edilmektedir (Cao ve Campbell, 2006). Bu araştırmada ikincil bu fazlar üzerine mikroyapısal bir çalışma gerçekleştirilmemiştir.



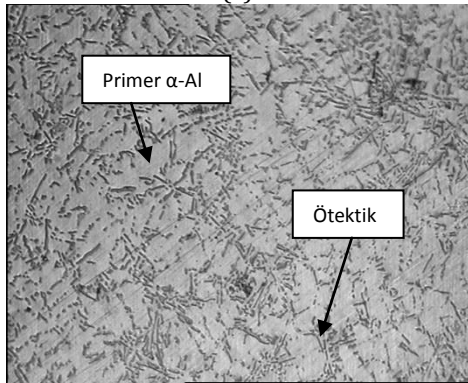
(a)



(b)



(c)

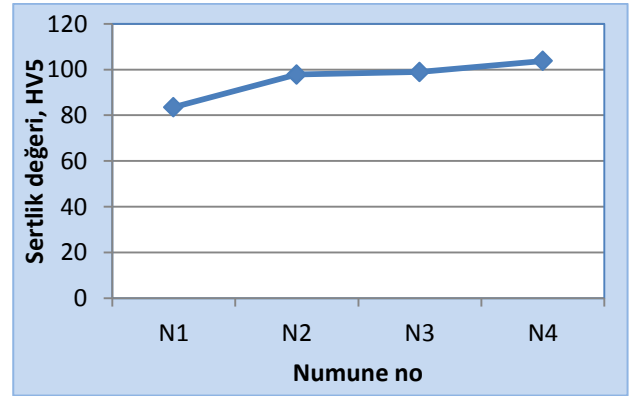


Şekil 4. Numunelerin mikroyapısı, a) 1, b) 2, c) 3, d) 4 nolu numune, X70

3.2. Sertlik ve Aşınma Testi Sonuçları

Yapılan farklı ısıl işlem süreçlerinin döküm alaşımı sertliğine etkilerini tespit etmek için HV5 sertlik testi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen numunelerde ısıl işlem şartlarının sertliğe etkileri Şekil 5'te

gösterilmiştir. Sertlik sonuçları incelendiğinde, AlSi10Mg alaşımına uygulanan geleneksel T6 yaşlandırma işlemi ile Vickers sertlik değerinin yaklaşık olarak % 17 oranında artış gösterdiği görülmektedir. 170 °C'de 30 dk. yaşlandırma işlemi ve daha sonra, 100 °C'de 135 saat düşük sıcaklıkta yaşlandırılan numunede ise sertlikte % 24,4 oranında artış meydana gelmiştir. 170 °C'de yapılan işlemin 30 dk. dan 10 dk.'a düşürülmesi ile döküm durumuna göre sertlik değerinde artış % 18,3 değerine düşmüştür. Sertlik açısından yapılan ilk yaşlandırma işlem süresinin 30 dakikaya kadar artması olumlu sonuç temin etmektedir. Lumley ve arkadaşlarının (2004) 7075 alaşımında yapmış olduğu çalışmada 25 °C'de yapılan ikincil yaşlandırma işlemi sertlik sonuçları, geleneksel T6 yaşlandırma pik sertlik sonucunun altında kalırken, 65 °C'de yapılan ikincil yaşlandırma sertlik sonuçları geleneksel T6 pik sertlik değerinin % 10 daha üzerindedir (Şekil 2). Imurai ve arkadaşlarının (2010) A356 döküm alaşımında gerçekleştirdikleri çalışmada, T6I6 ikincil yaşlandırma işlemi uygulanması ile geleneksel T6 yaşlandırma işlemine göre % 8 oranında daha yüksek mikro sertlik değeri elde edilmiştir.

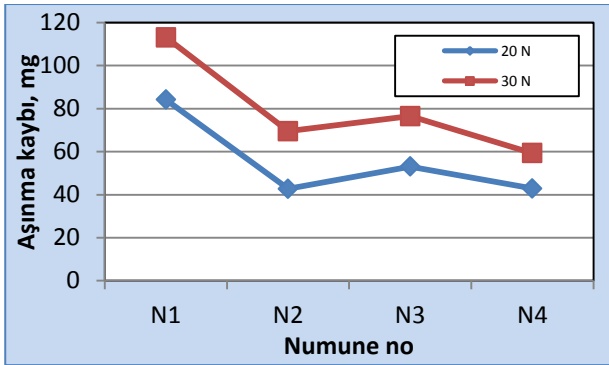


Şekil 5. Numunelerin sertlik değerleri, HV5

Şekil 5 incelendiğinde döküm durumu N1 numunesinin, geleneksel yaşlandırma uygulanan N2 numunesi ve 530 °C'de 4 saat tuz banyosu 60 °C suda su verme, 170 °C'de sırasıyla 10 ve 30 dk. yaşlandırma, 100 °C'de 135 saat yaşlandırma uygulanan N3 ve N4 numunesine göre en düşük sertliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu numuneden sonra en düşük sertlik değerini, geleneksel T6 yaşlandırma işlemi uygulanmış N2 numunesi sergilemiştir. Diğer numunelerde ise alt yaşlandırma işleminin 30 dk uygulandığı N4 numunesinin, 10 dk alt yaşlandırma işlemi yapılan N3 numunesine göre daha yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Dolayısıyla alt yaşlandırma işleminde, işlem süresinin artması sertlik değerini arttırmaktadır. Literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalarda gerek geleneksel ve gerekse ikincil yaşlandırma işlemlerinde bu çalışmaya göre daha uzun işlem süreleri uygulanmıştır (Risanti vd., 2009,

Marceau vd., 2010, Buha vd. 2008, Buha vd., 2006, Lumley vd., 2004, Buha vd., 2007, Imurai vd., 2010)

180 Mesh zımpara, 20N ve 30 N yük altında numunelere uygulanan abrasif aşınma deney sonuçları Şekil 6'da görülmektedir. Abrasif aşınma grafiği incelendiğinde, döküm durumu numunenin 20 N ve 30 N yük altında sırasıyla 84,15 mg ve 113,15 mg aşınma sergilediği, belirlenmiştir. Geleneksel yaşlandırma işlemi uygulanmış N2 numunesinde ise, 20 ve 30 N yük için aşınma miktarında azalma sırasıyla % 49 ve % 38 olarak gerçekleşmiştir. Döküm durumu numunesine göre, N3 numunesinde aşınma miktarında sırasıyla % 37 ve % 32, N4 numunesinde ise % 49 ve % 47 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Dolayısıyla 20 N yük altında abrasif aşınmada en fazla azalma geleneksel yaşlandırma numunesi N2 ve alt yaşlandırılmış N4 numunesinde meydana gelirken, 30 N yük altında ise N4 nolu numunede meydana gelmiştir. Yapılan abrasif aşınma testleri sonucu elde edilen aşınma yüzeyi tarama elektron mikroskop görüntüleri Şekil 7'de verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde döküm durumu numunede derin ve geniş aşınma izlerinin bulunduğu ve numunenin yoğun aşınma hasarı sergilediği gözlenmektedir. Tüm numunelerde aşınma testi sırasında oluşan abrasif aşındırıcının izleri belirgin şekilde görülmektedir.

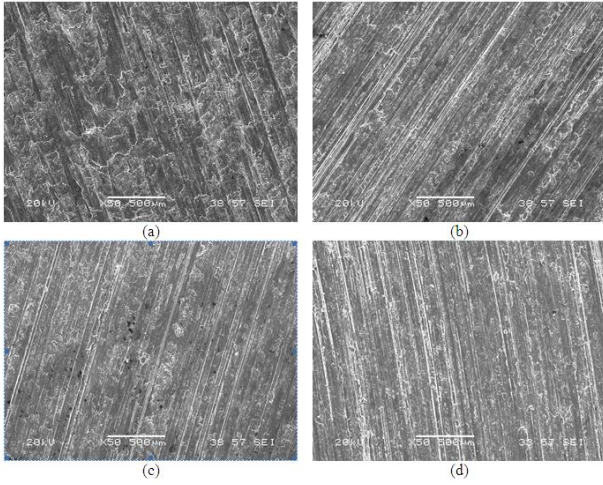


Şekil 6. Numunelerin 20 ve 30 N yük ve 180 Mesh zımparada aşınma miktarları

Shah ve arkadaşlarının (2007) yapmış olduğu çalışmada, ısıl işlem uygulanmış alaşımda, matriks mukavemetlenmesi ve daha yüksek matriks sertliği nedeniyle döküm haliyle kıyaslandığı zaman matriksin çatlama eğiliminin daha az olduğu belirlenmiştir. Aşınma yüzey görüntülerinde mevcut aşınma mekanizmalarının kazıma ve mikrokesme olduğu görülmektedir. Özellikle döküm durumu numunede kazıma tipi aşınma mekanizmasının yoğun olarak meydana geldiği ve matriks malzemenin yumuşak olmasından dolayı, aşınma oyuklarının yan kısımlarına doğru kabarmaların meydana geldiği görülmektedir. Benzer aşınma mekanizması diğer numunelerde düşük oranlarda görülmekle beraber N3 ve N4 nolu numunelerde söz konusu aşınma

mekanizmasının etkinliğini oldukça yitirdiği ve mikro kesme mekanizmasının etkili olduğu görülmektedir[Şekil 7]. Abrasif aşınma şartlarında malzeme birincil olarak kazıma ve mikrokesme ile uzaklaştırılmaktadır (Sharma vd., 2005, Sjölander ve Seifeddine 2010, Shah vd., 2007). Bu mekanizmada sert abrasif partiküller tarafından malzemeye penetrasyonu gerektirmektedir. Bu yüzden abrasif bir ortamda kayma sırasında aşınma hızının kontrolünde alaşımın sertliği büyük bir önem taşımaktadır(Shah vd., 2007).

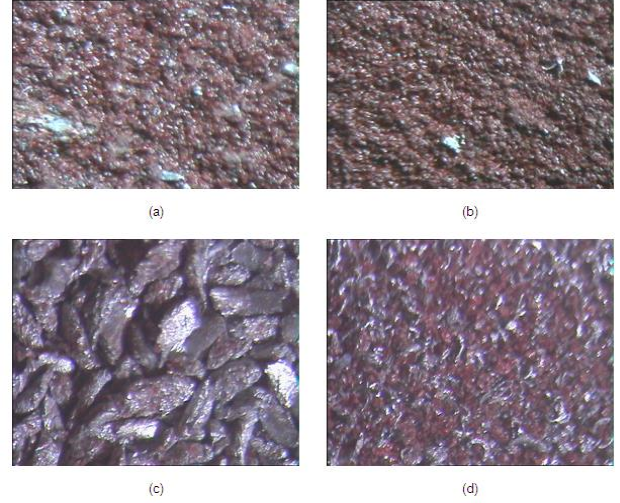
Shah ve arkadaşlarının (2007) yapmış olduğu çalışmada % 0,3 Mg içerikli Al- % 4, 12 ve 20 Si alaşımlarında 510 °C for 8 saat çözündürme işlemi 150, 170, 190, 210 and 230 °C'de 12 saat yaşlandırma işleminde, artan silisyum içeriği ile aşınma direncinin artış gösterdiği ve her üç alaşımda da artan yaşlandırma sıcaklığı ile sertlik ve aşınma direncinin önemli oranda arttığı belirlenmiştir. Sharma ve arkadaşları (2005) tarafından % 0,3Mg içeren % 4, 8, 12, 16, 20 Si alaşımına 510 °C'de 4 saat çözündürme işlemi 170 ve 210 °C'de 12 saat yaşlandırma işlemi uygulanmış olup, artan silisyum ve yaşlandırma sıcaklığı ile sertlik ve aşınma direncinde önemli gelişme sağlandığı ifade edilmektedir. Al-Si-Mg alaşımının ısıl işlemi, çökeltme (Mg₂Si) sertleşmesine, silisyum kristallerinin küreleşmesine ve sert silisyum partikülleri ile alüminyum arasında artan bağa neden olmaktadır. Bu faktörler Al-Si-Mg alaşımlarının sertliğinin artışına, incelmış ve küreleşmiş silisyum partiküllerinin daha iyi dağılımına ve böylece de çatlak başlama ve ilerlemesinin geciktirilmesine ve böylece ısıl işlemden sonra alaşımların aşınma direncinin artırılmasına neden olarak gösterilebilir. Öte yandan Anesh ve Dwivedi (2007) tarafından yapılmış olan bir başka çalışmada, 170 °C'de 12 saat yaşlandırılan ve 450 °C - 550 °C sıcaklıkta 8 saat çözündürme işlemi yapılan % 0,3 Mg içerikli, % 8, 12 ve 16 Si içeren numunelerde, artan çözündürme işlem sıcaklığı ile aşınma direncinin önemli oranda arttığı tespit edilmiştir. Bu araştırmacılar yaşlandırılmış malzemelerde aşınma direncinin artmasını matriks ve ötektik silisyumda meydana gelen değişime dayandırmışlardır. Buna göre Al/Si arayüzeyinde yüksek gerilim konsantrasyonu nedeniyle çatlakların çekirdeklendiği, bu çatlaklara rağmen sert silisyumun belirli bir dereceye kadar dayandığı ifade edilmektedir. Yaşlandırma işlemi durumunda ise Al/Si arayüzeyinde çatlakların çekirdeklenmesine daha düşük eğilim nedeniyle, ısıl işlem uygulanmış malzemeler döküm durumuna göre daha düşük aşınma oranı sergilediği ifade edilmektedir. Birçok çalışmada T616 işlem yapılmış alaşımların, alaşım bileşimi ve kullanılan işlem şartlarına bağlı olarak, eşzamanlı olarak sertlik, çekme özellikleri ve kırılma tokluğunda % 5-30 arasında gelişme olduğu tespit edilmiştir. Kesikli yaşlandırmanın bu faydalı etkisinin, son yaşlandırma



Şekil 7. 30 N yük, 180 Mesh zımpara ve 0,2 ms⁻¹ kayma hızında aşındırılan numunelerin tarama elektron mikroskop görüntüsü, X50

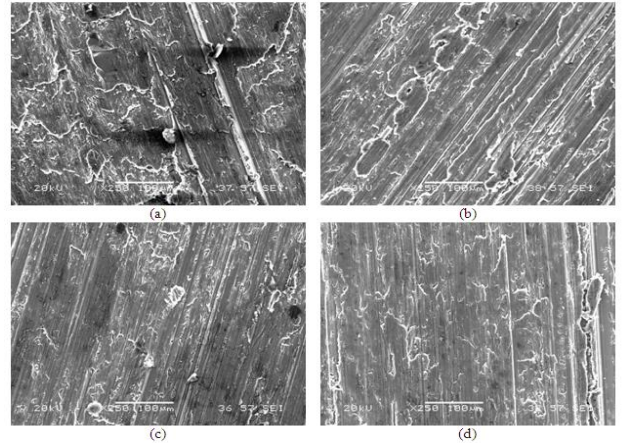
mikroyapısında ince şekilde dağılmış çökeltileri çekirdekleyebilecek olan bekleme sırasında oluşan ikincil çökeltilerden ortaya çıktığına inanılmaktadır (Gao vd., 2007).

Şekil 7a'da görülen aşınma yüzeyi incelendiğinde, yüzeyde aşınma çiziklerinin yanı sıra yüzeyde yoğun pürüzlenmelerin ve yoğun aşınma hasarının meydana geldiği, ısıl işlem görmüş numunelerde olduğu gibi aşınma kanallarının devamlılığının olmadığı dikkati çekmektedir. Buradan aşınma sürecinde döküm durumu numunenin sahip olduğu düşük sertlik ve uygulanan yüksek yük (30N) nedeniyle aşındırıcı partiküllerin alaşıma batması neticesinde, aşınma sonucu oluşan alüminyum partiküllerinin aşındırıcı partiküller arasındaki boşlukları doldurarak aşındırma görevini sürekli olarak gerçekleştiremediği düşünülmektedir. Bu durumun anlaşılması için numunelerin aşınma atıkları boyut ve şekillerine, Şekil 8'de döküm durumu ve 170 °C'de 30 dakika yaşlandırılmış, 100 °C'de 135 saat yaşlandırılmış numunenin aşınma atıkları görülmektedir. Şekilde döküm durumu numunenin hem daha fazla miktarda ve hem de daha büyük boyutta aşınma atıklarına sahip olduğu ve aynı zamanda aşınma atıkları içerisinde daha fazla oranda zımpara tozlarının yer aldığı görülmektedir. Bunun da sebebi daha yüksek süneklige ve tokluğa sahip döküm durumu numunenin zımpara üzerindeki aşındırıcı partikülleri kopardığı ve kırdığı düşünülmektedir. Isıl işlem görmüş numunenin ise daha ince tozlardan oluşan aşınma atıklarına sahip olduğu ve zımpara yüzeyine alaşım yapışmasının daha az meydana geldiği görülmektedir. Sharma ve arkadaşlarının (2005) daha önce Al12Si0,3 Mg alaşımında 3 N gibi düşük yük uygulandığı için döküm durumu numunede mikro kesme tipi aşınma



Şekil 8. Aşınma testinde kullanılmış olan zımparalar ve aşınma atıkları, a) ve c) 1 nolu b) ve d) 4 nolu numune a) ve b) X 0.63 c) ve d) X1.6

mekanizması meydana gelmiştir. Bunun sebebi yükün düşük olmasından dolayı, aşındırıcı partiküllerin arası malzemeye ile dolmadığı için sürekli aşınma izleri oluşabilmektedir. Ayrıca söz konusu çalışmada Al12Si0,3Mg döküm durumu



Şekil 9. 30 N yük, 180 Mesh zımpara ve 0.2 ms⁻¹ kayma hızında test edilen numunelerin tarama elektron mikroskop görüntüsü, a)1, b) 2, c) 3 d)4 nolu numune, X250

numune 98 VHN sertlik değerine sahip iken, bu çalışmada kullanılan alaşımın silisyumun içeriğinin daha düşük (%10 Si) olmasından dolayı sertliğinin daha düşük olması nedeniyle, abrasif aşındırıcı partiküller numuneye çok daha fazla batma gerçekleştirmiştir. Şekil 9'da N1 numunesinde görülen yüksek büyütme oranlarında, döküm durumu numunesinde aşınma yüzeyleri incelendiğinde, aşınma oyuklarının bölgesel olarak devamlılığa sahip olduğu görülmektedir. Döküm durumu numunesi N1 ile kıyaslandığı zaman, N4 numunesinin çok farklı aşınma yüzeyi sergilediği görülmektedir. Geleneksel yaşlandırma işlemi uygulanan N2 numunesinin aşınma yüzeyinde, diğer numunelere göre kısmen

daha fazla sürekli ve derin oyuklar görülmektedir. Daha sonra N3 nolu numunede oyuklar hafif şekilde görülmektedir. Söz konusu özellikler numunelerin sertliği ile paralellik göstermektedir. Numunelerin uygulanan yaşlandırma işlemine bağlı olarak sertliği artarken, bariz şekilde aşınma kanallarının derinliğinin ve genişliğinin azaldığı dikkati çekmektedir. Numuneler arasında en yüksek sertliğe sahip N4 numunesinde aşınma kanallarının derinliği ve genişliğinin en az olduğu görülmektedir.

4. Sonuçlar

AlSi10Mg alaşımlarına uygulanan geleneksel ve ikincil yaşlandırma işlemi sonucu aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Döküm durumuna göre, geleneksel yaşlandırma işlemi ile sertlik değerinin % 17 oranında artış, abrasif aşınma kaybının ise 20 N yükde % 49, 30 N yükde ise % 38 azalma gösterdiği belirlenmiştir.

30 dk. ikincil yaşlandırma işlemi ile döküm durumuna göre sertlik değerinin % 24,4 oranında arttığı, abrasif aşınma kaybının ise 20 N yükde % 49, 30 N yükde ise % 47 oranında azalma gösterdiği tespit edilmiştir.

İkincil yaşlandırma işleminde 170 °C'de alt yaşlandırma işlem süresinin 30 dakikadan 10 dakikaya düşmesi ile sertlikte, % 5 oranında bir azalma, aşınma miktarında ise, 20 N yükde % 19, 30 N yükde ise % 17 oranında bir artış olduğu belirlenmiştir.

30 dk.lık 170 °C'de alt yaşlandırma ve ardından 100 °C'de 135 saat ikincil yaşlandırma yapılan numunenin, 4 saat 170 °C'de geleneksel T6 yaşlandırma işlemi uygulanan numuneye göre sertlikte yaklaşık % 6 artış, 30 N yük altında aşınma kaybında yaklaşık % 14 oranında bir azalma elde edilmiştir.

Gerek geleneksel, gerekse ikincil yaşlandırma işlemleri ile silisyum morfolojisinde iyileşme, homojen dağılım, ikincil fazlar ile matriks arasında gelişmiş bağlanma ve matriksde sağlanan yaşlanma sertleşmesi neticesi aşınma dayanımının arttığı anlaşılmaktadır.

Aşınma mekanizması olarak döküm durumu numunelerde kazıma aşınma mekanizması hakim iken, geleneksel yaşlandırılmış malzemede kazıma ve mikrokesme aşınma mekanizmasının etkili olduğu, ikincil yaşlandırılmış 4 nolu numunede ise mikrokesme mekanizmasının etkin olduğu belirlenmiştir.

Kaynaklar

Ammar H.R., Moreau C., Samuel A.M., Samuel F.H., Doty H.W., 2008. Influences of alloying elements, solution treatment time and quenching media on quality indices of 413-type Al-Si casting alloys, *Materials Science and Engineering A* 489, 426-438

Anesh, S.R., Dwivedi, D.K., 2007. Solutionizing temperature and abrasive wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys" *Materials and Design* 28, 1975-1981

Buha J., Lumley R.N., and Crosky A.G., 2006. Microstructural Development and Mechanical Properties of Interrupted Aged Al-Mg-Si-Cu Alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A Vol 37 A*, 3119- 3130

Buha J., Lumley R.N., Crosky A.G., Hono K., 2007. Secondary precipitation in an Al-Mg-Si-Cu alloy," *Acta Materialia* 55, 3015-3024

Buha J., Lumley R.N., Crosky A.G., 2008. Secondary ageing in an aluminium alloy 7050, *Materials Science and Engineering A* 492, 1-10

Cao X. and Campbell, J., 2006. Morphology of β -Al₅FeSi Phase in Al-Si Cast Alloys, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 5 pp. 1303 - 1312

Gao, N., Starink, M. J., Kamp, N. Sinclair, I., 2007. Application of uniform design in optimisation of three stage ageing of Al-Cu-Mg alloys, *J Mater Sci* 42, pp 4398-4405

Hwang J.Y., Doty H.W., Kaufman M.J., 2008. The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys" *Materials Science and Engineering A* 488, 496-504

Imurai, S., Kajornchaiyakul, J., Thanachayanont, C., Pearce, J.T.H., Chairuangsri, T., 2010. Age Hardening and Precipitation Behavior of an Experimental Cast Al-Mg-Si Alloy Treated by T6 and T6I6 Heat Treatments. *Chiang Mai J. Sci*, 37(2) : 269-281

Li R.X., Li R.D., Zhao Y.H., He L.Z., Li C.X., Guan H.R., Hu Z.Q., 2004. Age-hardening behavior of cast Al-Si base alloy, *Materials Letters* 58, 2096-2101

Lumley R.N., Polmear I.J., Morton A.J., 2004, Temper Developments Using Secondary Ageing, *Materials Forum Volume 28*, 85-95

Marceau R.K.W., Sha G., Lumley R.N., Ringer S.P., 2010. Evolution of solute clustering in Al-Cu-Mg alloys during secondary ageing, *Acta Materialia* 58, 1795-1805

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.

Moller H.M., Govender, G. Stumpf, W.E., Pistorius, P.C., 2010. Comparison of heat treatment response of semisolid metal processed alloys A356 and F357, *International Journal of Cast Metals Research Vol* 23, No 1 pp 37-43

Risanti D.D., Yin M., Rivera P.E.J. Díaz del Castillo, Zwaag S. van der, 2009. A systematic study of the effect of interrupted ageing conditions on the strength and toughness development of AA6061, *Materials Science and Engineering A* 523, 99-111

Shah, K.B. Kumar, S. Dwivedi D.K. 2007. Aging temperature and abrasive wear behaviour of cast Al-(4%,12%,20%)Si-0.3% Mg alloys, *Materials and Design* 28 1968-1974

Sharma, R. Anesh, D.K. Dwivedi, 2005. Influence of silicon (wt.%) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys, *Materials Science and Engineering A* 408, 274-280

Sjölander, E., Seifeddine, S., 2010. The heat treatment of Al-Si-Cu-Mg casting alloys, *Journal of Materials Processing Technology* 210, 1249-1259