

EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Alüminyum Alaşımının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırılması Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Bahadır ACAR^{1,*} , Kaan DAĞ¹ 

¹Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. AR-GE Merkezi, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 06.07.2021

Kabul: 01.09.2021

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum Alaşımı

Isıl İşlem

T6

Sertlik

Çekme Dayanımı

Yapay Yaşlandırma

ÖZET

Alüminyum alaşımları havacılık, savunma sanayi, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda alüminyumun tercih edilmesininin sebepleri hafif olması, işleme kolaylığı sağlaması ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletmesidir. Alüminyum alaşımlarının mühendislik malzemesi olarak kullanılabilmesi için, ısı işlem sürecinin başarılı bir şekilde tamamlanması gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarının farklı kimyasal analizlere sahip alüminyum alaşımlarının ısı işlem süreçleri de farklılık göstermektedir. Alüminyum alaşımlarından EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımına uygulanan T6 ısıl işleminde, farklı sürelerde yapay yaşlandırma yapılmıştır. Yapılan yapay yaşlandırma da metalografik ve mekanik özelliklere etkisi ele alınmıştır. Seçilen EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alüminyum alaşımı T6 ısıl işleme tabi tutularak, yaşlandırma sıcaklık ve süre eğrileri çıkartılmıştır. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesinde sertlik ölçümleri ve çekme dayanımı esas alınmıştır. Bulgular sonucunda EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin sertlik değerlerinde ve çekme dayanımında değişimler gözlemlenmiştir.

Aging of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Aluminum Alloy in T6 Heat Treatment and Investigation of Mechanical Properties

ARTICLE INFO

Received: 06.07.2021

Accepted: 01.09.2021

Keywords:

Aluminum Alloy

Heat Treatment

T6

Hardness

Tensile Strength

Artificial Aging

ABSTRACT

Aluminum alloys are used in many areas such as aerospace, defense industry and automotive. The reasons why aluminum has been preferred in recent years are that it is light, easy to process, and conducts heat and electricity as well as copper. In order for aluminum alloys to be used as engineering materials, the heat treatment process must be completed successfully. The heat treatment a process of aluminum alloys with different chemical analyzes also differs. In the T6 heat treatment applied to the EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy, one of the aluminum alloys, artificial aging was performed at different times. The effect of artificial aging on metallographic and mechanical properties is also discussed. The selected EN AC 46000 (AlSi9Cu3) aluminum alloy was subjected to T6 heat treatment and aging temperature and time curves were obtained. In the examination of the effect of aging temperature and time on mechanical properties, hardness measurements and tensile strength were taken as basis. As a result of the findings, changes were observed in the hardness values and tensile strength of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu makalenin amacı, alüminyum dökümünde kullanılan EN AC 46000 alaşımının sıcaklık sabit tutularak süre değişimine göre mekanik özelliklerinin değişimi gözlemlenmesidir. Amaç sonunda EN AC 46000 alüminyum alaşımının T6 yapay yaşlandırma sonucu mikroyapı özellikleri, sertlik değerleri ve çekme testine göre değerlendirilip sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile döküm işlemi gerçekleşen EN AC 46000 alüminyum alaşımında T6 ısıl işlem prosesi farklı sürelerle bağlı olarak uygulanmıştır.

Alüminyum-silisyum alaşımları, çelik ve dökme demirlerden sonra en çok kullanılan metaldir. Bakır ve alaşımlarına göre 3 (üç) kat daha hafif olmasına rağmen yüksek dayanıma sahip olması, alüminyumun otomotiv sektöründe kullanım miktarını hızlı bir şekilde yükseltmektedir. Yurtdışında kullanılan alüminyumun yaklaşık 1/3'ü otomotiv sektörü tarafından kullanılmaktadır. Ağır ve hafif araçlarda, hava yolu taşımacılığında, demir yolu ulaşım sisteminde yük taşıma ve gemi sanayinde de kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde güvenilir olması, konforlu olması, büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif ve mukavemeti yüksek malzemelerin geliştirilmesi için daha fazla alüminyum kullanımı yapılmaktadır [1].

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Bu da imal usullerindeki farklılıkların olduğunu göstermektedir. Plastik deformasyon ile şekil verilebilen dövme alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal kompozisyona sahiptirler. Her iki grup içinde bulunan alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılmaktadır. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları için yapılan ısıl işlem çökeltme sertleşmesiyle elde edilmektedir. Çökeltme sertleşmesi, alüminyum alaşımlarında istenilen mukavemeti elde etmek için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanabilir dövme alüminyum alaşımlarının 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri olmak üzere üç ana grubu bulunmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökeltmeyle sertleştirilemez, mukavemetinin artırılabilmesi için sadece soğuk işleme yapılmalıdır. Katı eriyik mukavemetlendirmesi, pekleşme ve dağılım mukavemetlendirmesiyle güçlendirilirler [5]. Isıl işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımlarının ise 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileriyle üç ana grubu bulunmaktadır [2]. Çökeltme sertleşmesi için kimyasal analizde tek fazlı bir yapı elde etmek amacıyla T1 sıcaklığına kadar ısıtılır ve alaşımdaki bütün fazların tek fazda çözünmesine kadar bekletilir. Daha sonra ani su verme işlemi ile yaşlandırma prosesi yapılır [3].

Alüminyumun çok fazla kullanım alanı bulunmaktadır. Bugün dünyada, 24.300.000 ton/yıl üretim ile alüminyum, demir-çelik üretiminden sonra en çok üretimi yapılan ikinci metal konumunda bulunmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve alüminyum alaşımlarının özelliğinden kaynaklanan avantajı nedeni ile alüminyumun kullanıldığı alanların hızla artmaktadır. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

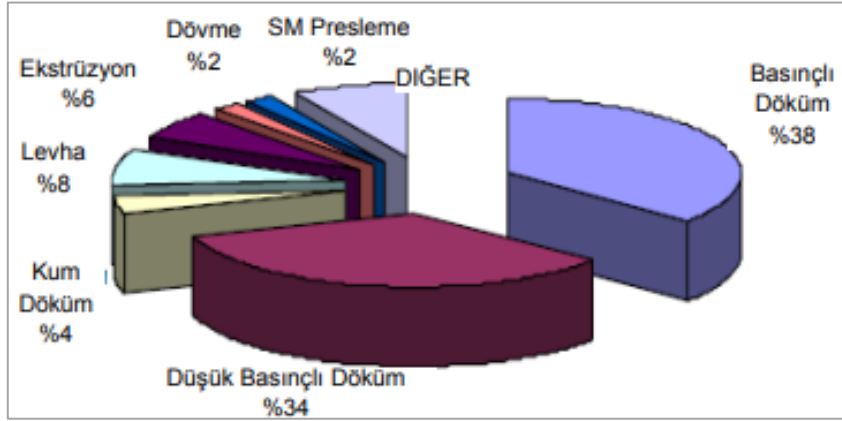
Tablo 1. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı (Distribution of aluminum by areas of use) [6]

Sektörler	Oran (%)
Ulaşım	25
İnşaat	24
Ambalaj	15
Elektronik	10
Genel Mühendislik	9
Mobilya, Ofis Eşyaları	6
Demir Çelik, Metalurji	3
Kimya ve Tarım Ürünleri	1
Diğer	7

Otomotiv sektöründe günümüzde artan rekabet ve çevre duyarlılığı otomobil üreticilerini yeni arayışlara itmiştir. Üretimde verimliliği korurken işletme maliyetlerini minimuma indirgeyen bir üretim anlayışı ile çevreyi daha az kirleten, malzeme geri dönüşümünün çok daha kolay olduğu, emniyet ve konforu bir arada bulunduran ve ayrıca yakıt tasarrufu sağlayan otomobiller üretilmeye başlanmıştır [7]. Üretim yöntemine göre otomotiv alanında alüminyum kullanımı bir hayli fazladır. Döküm yöntemi ile alüminyumdan imal edilen kompresör gövdeleri, havalı grup gövdeleri, dişli

kutusu gövdeleri, yakıt pompası gövdeleri, jantlar, başlıca örnekler arasındadır. Otomotiv sektöründe kullanılan alüminyumun %85'e yakını döküm yöntemiyle üretilmektedir[8].

Alüminyum alaşımlarına ısı işlem uygulanabilmesi için Cu, Mg, Fe, Mn, Sn ve Zn elementlerinin varlığının gerekliliği vurgulanmaktadır. Çünkü bu elementler ısı işlem sonucunda çökeltiler (Mg_2Si , $Mg_3Mn_2Al_{18}$, $Al-FeSi$, $AlCuMgSi$, $CuAl_2$ vb.) oluşturmak için gerekmektedir. Oluşturulan bu çökeltiler ise dayanımı ve sertliği geliştirmektedir. [9] Otomotiv sanayinde üretim tekniğine göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Otomotiv sanayinde üretim tekniğine göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Classification of aluminum alloys according to the production technique in the automotive industry) [10]

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan alüminyum alaşımı, ticari bir alüminyum alaşımı olup kimyasal analizi Tablo 2'de verilmiştir. Alüminyum alaşımı soğuk kamara metal enjeksiyon makinesinde (yüksek basınç) döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yüksek basınç döküm yöntemi ile dökülen numuneler $460^{\circ}C$ - $480^{\circ}C$ 'de çözeltiye alınıp ardından su verilmiştir. Ardından numuneler farklı sürelerde T6 ısı işlemi uygulanmıştır. Şekil 2'de T6 (yapay yaşlandırma) ısı işleminin prosesi verilmiştir.

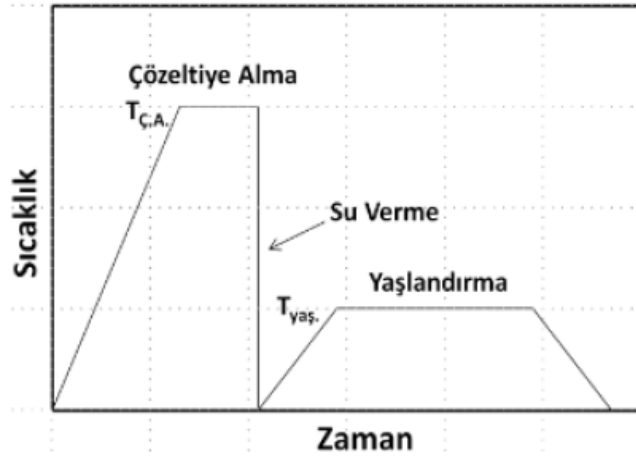
EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alüminyum alaşımından toplamda 30 adet numune döküm işlemi yapılmıştır. Dökülen numunelerden EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) malzemesinin işlem görmeden mikroyapı ve çekme test işlemleri yapılacaktır. Daha sonra EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) malzemesi 60 dakika, 120 dakika, 180 dakika ve 240 dakika yapay yaşlandırma işlemi yapılarak sonuç incelemesi yapılmıştır. Hazırlanan numunelere $460^{\circ}C$ - $480^{\circ}C$ 'de çözeltiye alınıp ardından su verilmiştir. Su verme işleminden hemen sonra fırında $180^{\circ}C$ 'de suni (yapay) yaşlandırma işlemine alınmıştır.

Tablo 2. EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alaşımına ait kimyasal birleşim (Chemical composition of EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alloy)

ALAŞIM		ELEMENTLER				
		Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)
EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$)	Min.	8.00	0.60	2.00	0.00	0.15
	Max.	11.00	1.10	4.00	0.55	0.55
		Cr (%)	Ni (%)	Zn (%)	Pb (%)	Ti (%)
	Min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max.	0.15	0.55	1.20	0.35	0.20

Tablo 3. EN AC 46000 döküm koşulları (EN AC 46000 casting conditions)

Malzeme Cinsi	Malzeme Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	Arka Pompa Basıncı	2. Faz Akümülatör Basıncı
EN AC 46000	640 ±10 °C	100 °C	145 ±10 bar	148 ±10 bar
3. Faz Akümülatör Basıncı	Enjeksiyon Basıncı	1. Faz Enjeksiyon Basıncı	1. Faz Hızı	2. Faz Hızı
120 ±10 bar	250 ±10 bar	140 bar	% 30 ±3	2.5 Tam Tur
3. Faz Hızı	Kalıp Kapalı Kalma Süresi	Kalıp Açık Kalma Süresi	İtici Bekleme	3. Faz uygulama Süresi
2.5 Tam tur	2 sn	10 sn	1 sn	45 sn



Şekil 2. T6 ısıl işlem prosesi (T6 heat treatment process)

Yaşlandırma işlemi yaparken tüm numuneler fırında olup süreler göre fırından hızlı bir şekilde alınmıştır. Fırının sıcaklığının korumak amacıyla yapılan bu işlemlerde max. 5°C'lik kayıp olmuştur. Bu kayıp metalografik olarak bir problem oluşturmamıştır. Sertlik ölçümü, EMCOTEST Brinell sertlik cihazında 62.5 kgf yük altında 2.5 mm çaplı bilye kullanılarak 8 saniye test süresinde ölçümü yapılmıştır. 180°C sıcaklığında 60 dakika, 120 dakika, 180 dakika ve 240 dakika olacak şekilde suni yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Alınan numuneler mikroyapıların incelenmesi için kesilerek bakalite alınmıştır. Bakalit alma işleminden sonra numuneler zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur.

Numuneleri zımparalama işlemi sırasında 80 grid, 240 grid, 600 grid, 1200 grid ve 2400 grid zımpara kağıtları ile yapılmıştır. Yapılan işlem sonucunda alüminyum alaşımları için kullanılan cuhada sırasıyla 3 µm ve 1 µm solüsyon ile yapılmıştır. Yapılan solüsyon işleminden sonra alüminyum alaşımları için kullanılan 0.5 cm³ hidroflüorik asit ve 99.5 cm³ su karışımı hazırlanarak hazırlanan dağlayıcı da 5-10 sn bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri NİKON MA 200 ters elektron mikroskobu ve CLEMEX yazılımı ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

Çekme deneyi için SHIMADZU 10 kN'luk çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme cihazı için her numune için 3 kez test yapılarak ortalaması alınmıştır. Yapılan çekme testinde 3 dk/mm ile çekme testi yapılmıştır. Çekme testinde EPSİLON marka Clip-On ekstensometre kullanılmıştır. Ekstansometre ile uzama, yüzde uzama kontrollü yapılarak sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3. Çözeltiye alma ve yaşlandırma fırını (Solution and aging furnace)

Şekil 3'te ısıtım işlemi için kullanılan PROTHERM laboratuvar tipi ısıtım işlemi fırını yer almaktadır. 480°C'de çözeltiye alınan numuneler hızlı bir şekilde suda soğutulmuştur. Daha sonra her numune birer saat ara ile ısıtım işlemi fırınına alınarak yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4. Yüksek basınç yöntemiyle EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşım numunesi (EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy sample with high pressure method)

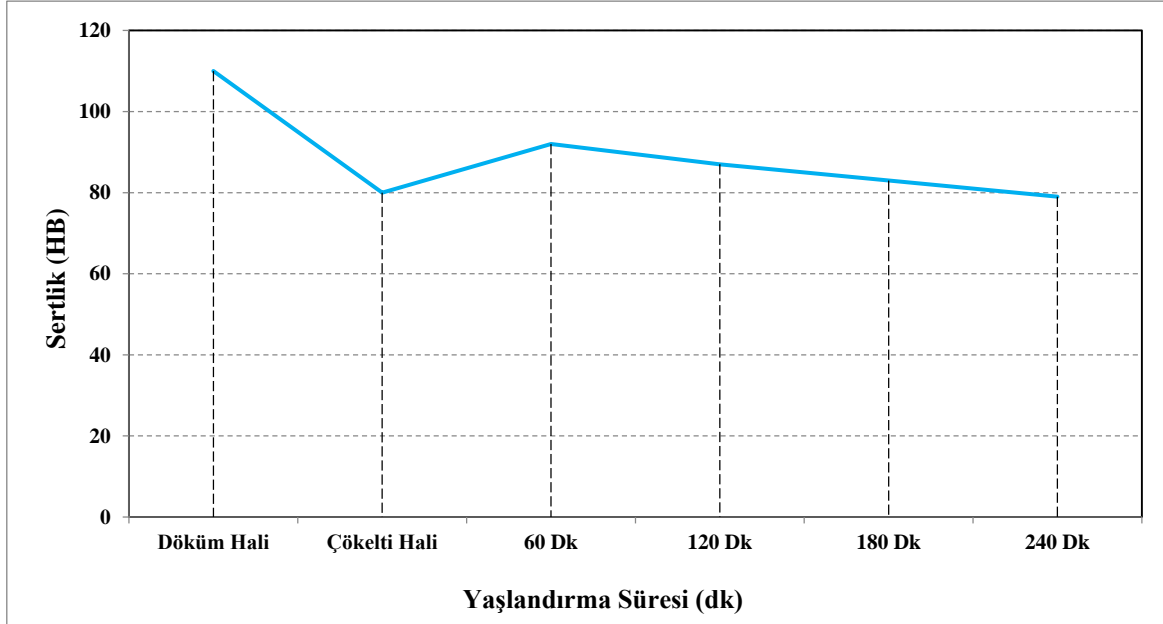
Şekil 4'te soğuk kamalı yüksek basınçlı enjeksiyon makinesinden çıkan numunelerdir. Soğuk kamalı yüksek basınçlı döküm makinesinde kalıp tasarımından sonra soğuk kamalı enjeksiyon makinesine bağlandıktan sonra döküm işlemi yapılmıştır. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımı için yaşlandırma işleminden sonra parçalar üzerinde mekanik özellikler incelenmiştir.

Soğuk kamalı yüksek basınçlı dökümde Tablo 3'te verilen parametrelere ile döküm işlemi gerçekleştirir. Döküm işleminin ardından kalıptan çıkan numuneler havada soğumaya bırakıldı. Ardından T6 yapay yaşlandırma işlemi farklı sürelerde yapılmıştır.

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1. Sertlik Deneyi (Hardness test)

480 °C’de çözeltiye alınan ve 180°C’de 1saat, 2saat, 3 saat ve 4 saat süre ile yaşlandırılan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik-zaman (HB) grafiği hazırlanmıştır (Şekil 5).



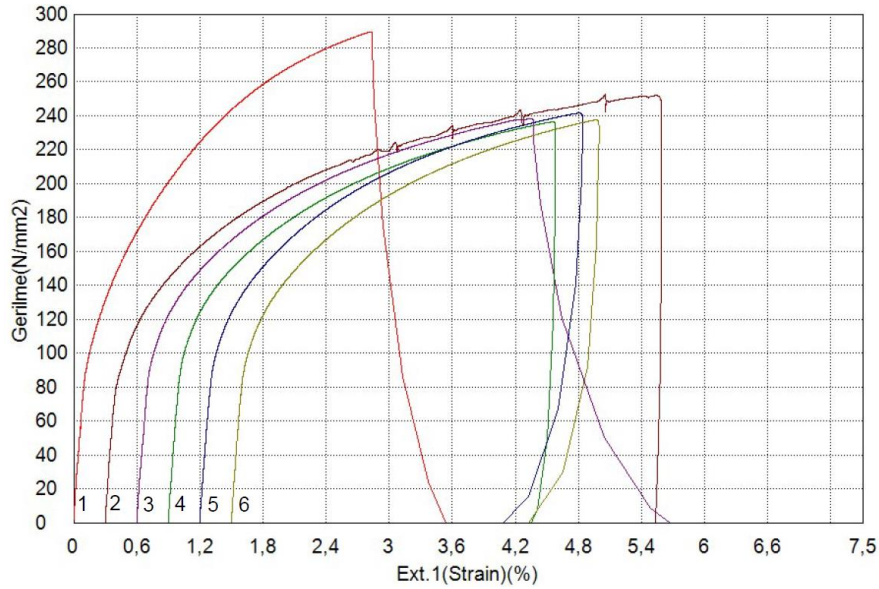
Şekil 5. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik- zaman grafiği (Hardness-time graph of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy)

Şekil 5’de verilen grafikte görüldüğü üzere yaşlandırma yapılmadan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımı en yüksek sertliğe sahiptir. Çözeltiye alındıktan sonra alaşımın sertlik değeri zamana bağlı olarak düşmektedir. 60 dakika sonunda 92 HB sertlik değerine düşmüştür. Her 60 dakika sonunda sertlik değeri azalma meydana gelmiştir.

3.2. Çekme Deneyi (Tensile test)

Tablo 4’te görüldüğü üzere işlem yapılmadan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin uzama değeri en düşük seviyededir. Bununla birlikte çözelti halinde iken (hızlı soğutma yapıldığında) uzama oranı en yüksek seviyededir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının uzama miktarı standartlarda % 0.5-3 arasındadır. Yaşlandırma prosesi ile birlikte uzama miktarı düşüşe geçmekte fakat sınır üzerinde bir uzama miktarına sahiptir. Uzama miktarının sınır üzerinde olması ile birlikte sertlik değeri de düşmektedir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin çekme ve akma dayanımı doğru orantılı bir şekilde düşmektedir (Şekil 6).

Çekme testi sonuçlarına göre EN AC 46000 alüminyum alaşımında uzama miktarına bakılarak T6 ısıl işlemi uygulandığı süre boyunca alüminyum alaşımında sünekliğin arttığını söyleyebiliriz.



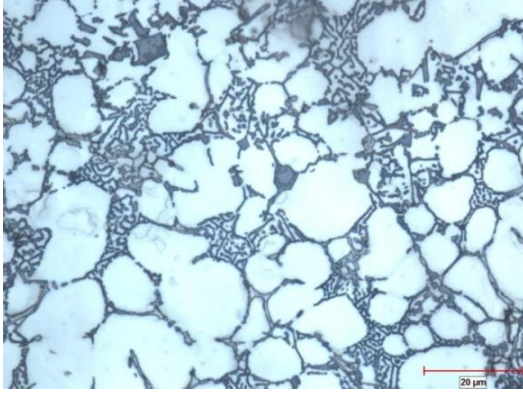
Şekil 6. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının döküm halinde (1), çözültüye alınmış (2), 60 dk yaşlandırma (3), 120 dk yaşlandırma (4), 180 dk yaşlandırma (5), 240 dk yaşlandırma (6) F-ΔL çekme grafiği (EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy as cast (1), dissolved (2), 60 min aging (3), 120 min aging (4), 180 min aging (5), 240 min aging (6) F-ΔL tensile graph)

Tablo 4. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının çekme test sonucu (Tensile test result of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy)

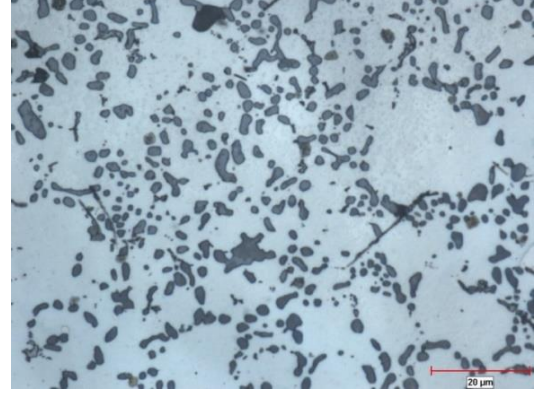
	Çekme Dayanım (N/mm ²)	Akma Dayanımı (N/mm ²)	İlk Boy (mm)	Son Boy (mm)	% Uzama
Döküm hali	289.430	230.695	130.0	131.41	2.82
Çözültüye alma	252.537	223.848	130.0	132.37	4.74
60 dakika yaşlandırma	238.411	213.546	130.0	131.87	3.74
120 dakika yaşlandırma	236.359	211.696	130.0	131.82	3.64
180 dakika yaşlandırma	234.522	203.832	130.0	131.80	3.60
240 dakika yaşlandırma	230.515	199.328	130.0	131.73	3.46

3.3. Mikroyapı İncelemesi (Microstructure Investigation)

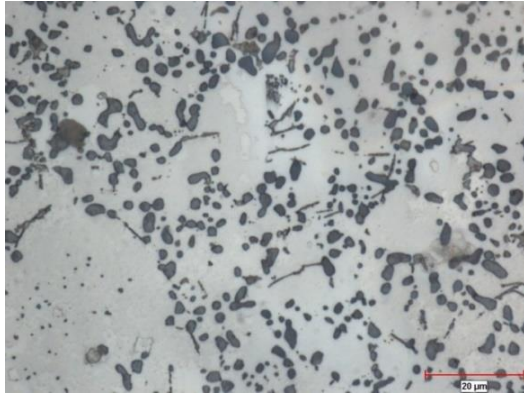
Mikroyapı incelemeleri için Keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlama sonrası NikonEclipse MA-200 ters metal mikroskobunda ClemexVisionLight görüntü analiz yazılımı kullanılarak 1000x büyütme yapılarak mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Alınan mikroyapı görüntülerine göre yaşlandırma prosesinin uzaması ile birlikte tanecikler bir araya toplanmıştır. Taneciklerin bir araya toplanması ile birlikte mukavemet azalmıştır. Buna eş değer olarak sertlik değeri de düşmüştür. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin dentrit yapılarının oluşmasından dolayı çekme dayanımı en yüksek olan yapıdır. Yaşlandırma prosesi ile birlikte dentrit yapıların kaybolduğunu mikroyapılardan görülmektedir (Şekil 7).



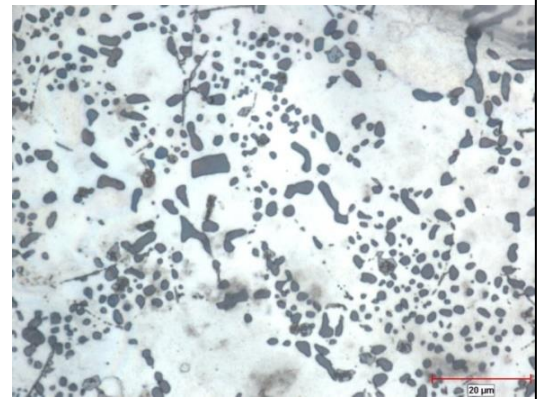
a. Döküm hali mikroyapısı



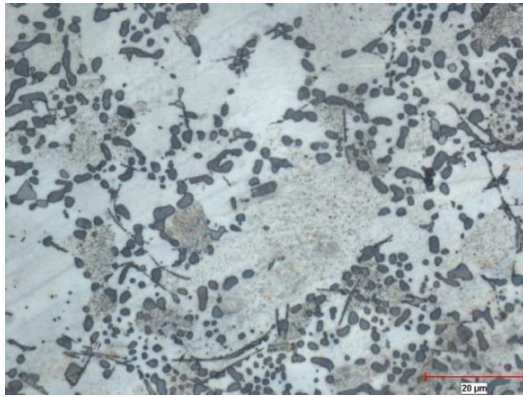
b. Çözeltiye alınmış hali mikroyapısı



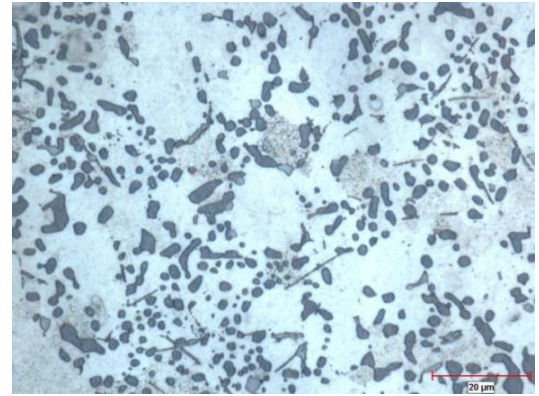
c. 60 dk yaşlandırma mikroyapısı



d. 120 dk yaşlandırma mikroyapısı



e. 180 dk yaşlandırma mikroyapısı



f. 240 dk yaşlandırma mikroyapısı

Şekil 7. Mikroyapı görüntüleri (Microstructure images)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Bu çalışmada yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle üretilen parçalara yapay yaşlandırma (T6) sonucunda sertlik, çekme testi ve mikroyapı incelemeleri yapılarak sonuca ulaşılmıştır.
- Döküm halinde aldığımız numunede sertlik ve çekme dayanımı en yüksek sonucu elde edildi. Döküm halinde dentrit yapıların oluşumu ile birlikte en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca malzemeye yapılan çözeltiye alma işleminden itibaren yaşlandırma prosesinde tanelerin bir araya toplanmaya başladığını gördük. Tanelerin bir araya

toplanması ile birlikte sertlik değeri, çekme dayanımı ve akma dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Daha sünek bir malzeme elde edilmiştir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) % uzama miktarı 0.5-3 arasında olması gerekirken yaşlandırma prosesi ile birlikte uzama miktarı % 3 sınırının üzerine çıkmıştır.

- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle yapay yaşlandırma (T6) ısıtılmasının mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. 110 HB sertlik değerinden 80 HB sertlik değerine bir düşüş ve daha sünek malzeme elde edilmiştir.
- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının yüksek basınçlı döküm yönteminden sonra uygulanan T6 ısıtılması sonucunda EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik değerinde düşüşler.
- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alüminyum alaşımının yüksek basınçlı döküm sonunda sertlik miktarının düşürülmesi istenen durumlarda yapılmalıdır.
- Ayrıca EN AC 46000 alüminyum alaşımının sünekliliğinin artırılması istenen durumlarda yaşlandırma prosesi uygulanmalıdır.
- Çalışma sonucunda, döküm halinde çıkan numune ile 4 saat yaşlandırma yapılan numune arasında 60 N/mm^2 çekme dayanımı farklı olmuştur. Ayrıca malzeme sertliğinde yaklaşık olarak 30 HB sertlik farkı bulunmaktadır.
- Yapılan yaşlandırmalar arasında mekanik özelliklerin değişmediği gözlemlenmiştir. Çözeltiye alınan numuneler 1 saat yaşlandırma prosesi yapıldıktan sonra istenilen sertlik düşüşü yakalanmıştır. 110 HB'den 90 HB'ye düşüş yaşanmaktadır.
- Yapılan çalışma ile EN AC 46000 alüminyum alaşımı kullanılarak mekanik özelliklerin azaldığı sonucuna varılmıştır.
- EN AC 46000 alüminyum alaşımı çökeltiliye alma halinde en yüksek sünekliliğe sahiptir. T6 ısıtılma işlemi sırasında geçen zaman boyunca çökeltiliye alma haline göre süneklilik miktarı azalmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Teknik yazıda kullanılan test metotları için Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. firmasına ve test numunelerinin dökümünde yardımcı olan Sn. Özgür GÖKÇİL'e teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Alüminyum Komisyonu, 24. Dönem Çalışma Raporu, https://www.metalurji.org.tr/arsiv/05_sektorel_rapor/aluminyum_raporu.pdf.
2. W.F. Smith, Material science and engineering, University of Central Florida, USA, 2001.
3. A.E. Geçkinli, Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemi, 2. Isıtılma İşlem Sempozyumu, İstanbul/TÜRKİYE, 07-08 Şubat 2002.
4. Alüminyum alaşımlarının ısıtılma işlemlerinin esasları, Kocaeli Üniversitesi, <https://docplayer.biz.tr/12743335-Aluminyum-alaşimlarinin-ısıtılma-islemlerinin-esasi.html>
5. E. Demir, Alüminyum alaşımlarda ısıtılma işlem etkilerinin incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008.
6. https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2b.pdf, 12.04.2021.
7. M. Özcömert, Otomotiv endüstrisinde alüminyum, İstanbul Ticaret Odası, <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-68.pdf>, 2006.
8. M. Dünder, G. Güngör, Otomotiv sektöründe alüminyum uygulamaları ve sürekli döküm tekniği ile üretilmiş alüminyum levha alaşımları, 2008.
9. H. Hasırcı, Effects of heat treatment parameters on the abrasive wear behaviours of the eutectic AlSi alloy, Politeknik Dergisi, 18, 7-13, 2015.
10. T.A. Başer, Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı, Mühendis ve Makina, 53: 635, 51-58, 2013.