

6063 Al Alaşımının Yaşlandırılmasında Çözündürme Sıcaklığının İç Yapı ve Yorulma Özelliklerine Etkisi

Mustafa Tayanç
Yardımcı Doçent

Gülcan Toktaş
Araştırma Görevlisi

Makina Müh. Bölümü
Balıkesir Üniversitesi
Çağış Kampüsü
10145 BALIKESİR

Bu çalışmada beş farklı çözündürme sıcaklığından (510, 520, 530, 540 ve 550°C) yapay yaşlandırılan 6063 alüminyum alaşımında, çözündürme sıcaklığının iç yapı, akma, çekme ve 10^7 çevrim için yorulma dayanımına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinden; çözündürme sıcaklığı 530°C'ye kadar artarken dayanım değerleri ve yorulma dayanımı/çekme dayanımı (σ_y/σ_c) oranının arttığı, bunun üzerindeki sıcaklıklarda yaşlandırılan numunelerde ise azaldığı görülmüştür. 530°C sıcaklıkta çözültüye alındıktan sonra yaşlandırılan numunelerin iç yapısında çökelen Mg_2Si fazının daha ince ve homojen bir dağılım gösterdiği gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 6063 Al Alaşımı, Yaşlanma, Yorulma, İç Yapı.

GİRİŞ

Alüminyum-Magnezyum-Silisyum alaşımları (AA 6000 serisi) orta derecede mukavemet, korozyon ve gerilimli korozyon direnci gerektiren uygulamalarda kullanılan alaşımlardır. AA 6000 serisi alaşımlar mimari uygulamalarda, hava, deniz, otomotiv ve elektrik endüstrilerinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu alaşımların dayanımları ekstrüzyon işlemini müteakip 200°C 'nin altındaki sıcaklıklarda yapılan yapay yaşlandırma işlemleri ile artırılabilir [1]. Ekstrüzyon ile üretilen alüminyum ürünlerinin %80'ninden fazlasını AA 6000 serisi alaşımlar, bunların %70'ini de AA 6063 alaşımı oluşturmaktadır [2]. 6063 alaşımlı malzemeler inşaat sektöründe; kapı, pencere çerçeveleri ve panjur profillerinin imalinde, otomobil endüstrisinde; araba gövde panelleri ve tır kasası profilleri yapımında, mobilya, askı, resim çerçevesi ve yüksek mukavemetli iletkenlerin üretiminde kullanılırlar [3].

Bu çalışmada yaşlandırma öncesi çözündürme

sıcaklığının (510-520-530-540 ve 550°C) 6063 alaşımının iç yapı ve yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneyler üç grupta yapılmıştır. Birinci grupta 6063 alaşımı beş farklı çözündürme sıcaklığında 45 dakika tutularak 170°C' de 11 saat yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. İkinci grupta yaşlandırılan numunelerin metalografik yapıları incelenmiştir. Üçüncü grupta ise yaşlandırılmış numuneler yorulma deneylerine tabi tutulmuşlardır.

Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

Deneylerde Seydişehir Alüminyum Tesisleri'nde üretilmiş ve 350-400°C sıcaklıkları arasında ekstrüzyon işlemi uygulanmış 16 mm çaplı silindirik Etial-60 çubukları kullanılmıştır. Malzemenin spektral analizi ve yaşlandırma işlemi uygulanmadan evvel yapılan bir seri deneylerden elde edilen mekanik özellikleri Tablo 1 'de verilmiştir.

Tablo 1. 6063 alaşımının kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Bileşim (% Ağırlık)	Cu	Fe	Si	Zn	Mn	Mg	Ti	Cr	Diğerleri	Toplam
	0.10	0.30	0.3-0.7	0.10	0.20	0.4-0.9	0.10	0.05	0.05	0.15
Mekanik Özellikler	Akma Dayanımı [MPa]		Çekme Dayanımı [MPa]		% A ₅	% Z	Darbe enerjisi [J]		Sertlik [BSD]	
	63.7		119		25.3	73.5	77		50.6	

Isıl İşlem Deneyleri

Isıl işlem deneylerinde 1280°C sıcaklık değerine ulaşabilen yatay borulu atmosfer kontrollü Notherm marka programlanabilir ısıl işlem fırını kullanılmıştır. Yorulma ve iç yapı numuneleri beş farklı çözündürme sıcaklığında (510, 520, 530, 540 ve 550°C) 45 dakika tutulup oda sıcaklığında beş gün ön yaşlandırmanın ardından 170°C 'de 11 saat süreyle yapay olarak yaşlandırılmışlardır. Numuneler çözündürme sıcaklığındaki tavlama işleminden sonra suda, yapay yaşlandırma işleminden sonra ise havada soğutulmuşlardır.

Yaşlandırma koşullarının (çözündürme sıcaklık ve süresi, yaşlandırma sıcaklık ve süresi) belirlenmesinde daha önce yapılan konu ile ilgili çalışmalardan faydalanılmıştır [4]. Çözündürme sıcaklıklarının seçiminde alaşımın katı çözünürlüğünü belirleyen solvüs-solidüs sıcaklık aralığında ve ötektik sıcaklığın altında olması göz önüne alınmıştır.

Metalografik Muayene

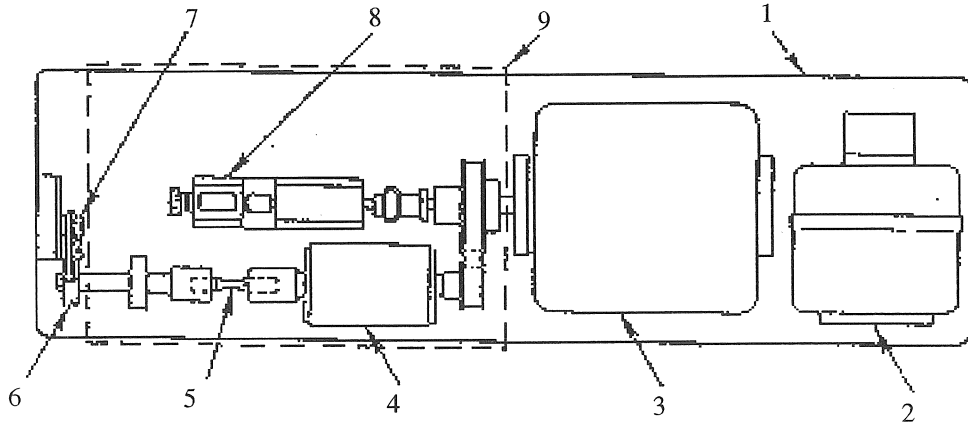
16 mm çapında ve 20 mm yüksekliğindeki ısıl işlem görmüş (çözündürme + yaşlandırma) numuneler standart metalografik yöntemlerle hazırlanmıştır. Yüzeyler sırasıyla 400, 600, 800, 1000 ve 1200 no'lu zımparalarla zımparalanmış ve

elmas pasta ile parlatma işlemini müteakip numune yüzeyleri 10-20 saniye süreyle Keller ayırıcına (2-5 ml HNO₃, 1,5 ml HCl, 1 ml HF, 95 ml Su) daldırılarak dağlanıp ışık mikroskobu ile 600X büyültmede iç yapı fotoğrafları çekilmiştir.

Yorulma Deneyleri

Malzemelerin yorulma özellikleri uygulanan gerilmenin türü, büyüklüğü, frekansı, deney numunesinin boyutu, imalat şekli (döküm-hadde-ekstrüzyon vb.), ısıl işlem durumu (çözündürme tavlama süresi-yaşlandırma tavlama süresi), kimyasal bileşim, yüzey pürüzlülüğü, çevresel koşullar v.b. birçok parametreden etkilenmektedir [5]. Yorulma deneylerinde uygulanan gerilmenin büyüklüğü dışındaki tüm parametreler değiştirilmeden (aynı tutularak) ve tam değişken gerilmenin büyüklüğü 10-140 MPa. arasında değiştirilerek çözündürme sıcaklığının yorulma dayanımına etkisi incelenmiştir.

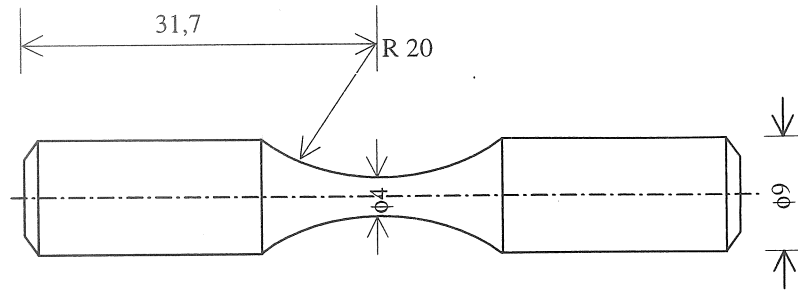
Deneylerde 2850 dev/dak devirli ve numune kırıldığında elektrik motoru akımını kesen bir mikro anahtara sahip Hi-Tech marka döner eğme gerilmeli yorulma cihazı kullanılmıştır. Yorulma deneylerinde kullanılan cihazın üst görünüş resmi Şekil 1 'de verilmiştir.



Şekil 1. Döner Eğme Gerilmeli Yorulma Cihazı. 1.Taban, 2.Açma kapama düğmesi, 3.Motor, 4.Merkezleme kirişi, 5.Yorulma numunesi, 6.Yükleme ve dengeleme sistemi, 7.Mikroanahtar, 8.Devir sayıcı, 9.Koruyucu panel

Yorulma deneylerinde genel olarak her bir çözündürme sıcaklığı (510, 520, 530, 540 ve 550°C) için 12 adet numune, 4 adet gerilme noktası ve her

nokta için de 3 adet numune kullanılmıştır [6]. Yorulma deneylerinde kullanılan numunenin şekli ve boyutları Şekil 2 'de verilmiştir.



Şekil 2. Yorulma numunesinin şekli ve boyutları

Cihazın uyguladığı eğme gerilmesinin büyüklüğü aşağıdaki bağıntı ile verilmiştir [7].

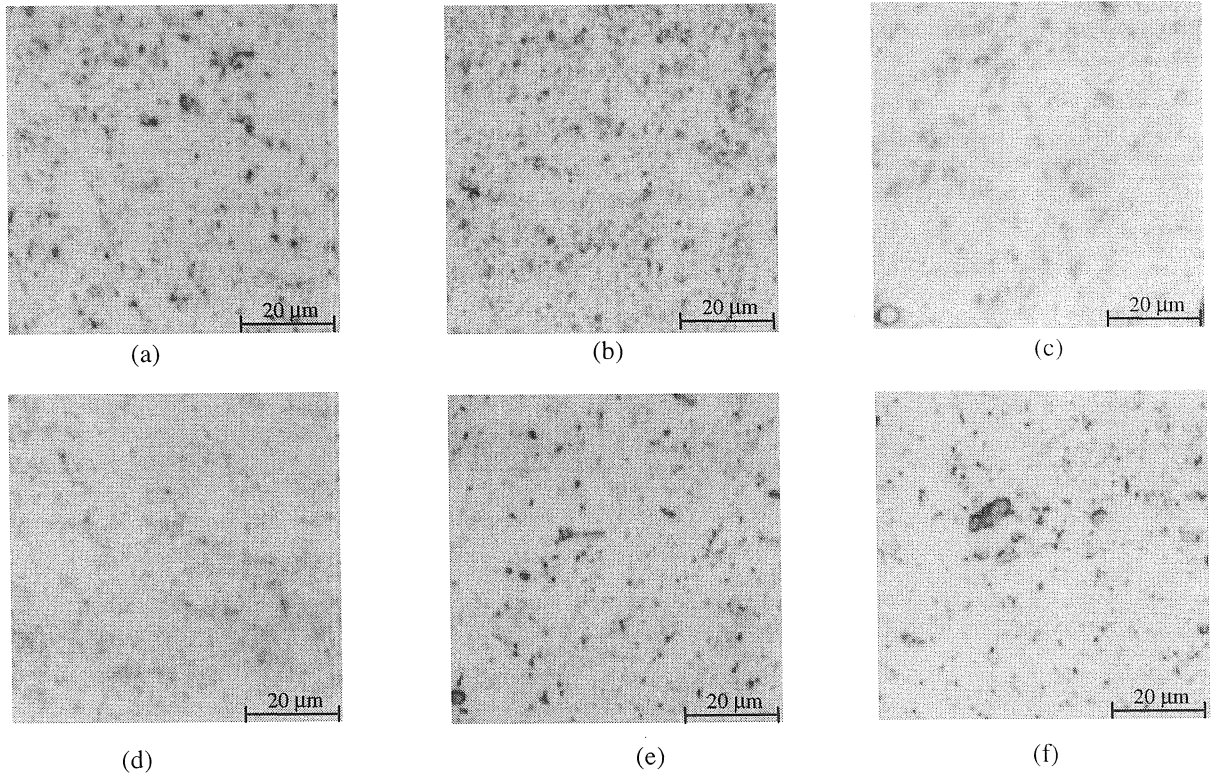
$$\sigma = \frac{125,7 * P * 32}{\pi * 4^3} = 20 * P \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)$$

Burada tekrarlı gerilme σ olup büyüklüğü 0,5-7 N arasında yükler kullanılarak formül 1'e göre hesaplanmış, esas alınan yük ve gerilme çevrim sayısı literatür ve uygulamadaki değerlere göre belirlenmiştir.

DENEYLERİN SONUÇLARI VE İRDELEME

Metalografik Deneylerin Sonuçları

Beş farklı sıcaklıkta (510-520-530-540 ve 550°C) 45 dakika bekletilerek suda soğutulup 5 gün ön yaşlandırmanın ardından 170°C 'de 11 saat süreyle yapay yaşlandırılan numunelerin ve ısı işleme görmemiş numunenin ışık mikroskobu ile 600X büyütmede çekilen iç yapı fotoğrafları Şekil 3 ' te verilmiştir.



Şekil 3. Yaşlandırılmış numunelerin iç yapılarının çözündürme sıcaklıkları ile değişimi.
(a) Geldiği gibi, (b) 510°C, (c) 520°C, (d) 530°C, (e) 540°C, (f) 550°C

Literatürden faydalanarak Şekil 3 'te iç yapı fotoğraflarındaki siyah noktaların yaşlandırma işlemi sonucunda çökelen fazı (Mg_2Si) gösterdiği söylenebilir [8]. Mikroyapılardan görüldüğü üzere fazın (Mg_2Si) en ince, sık ve homojen dağıldığı iç yapı çözündürme sıcaklığının $530^\circ C$ olduğu işlemden sonraki yaşlandırma işleminde görülmektedir.

$530^\circ C$ çözeltiye alma sıcaklığında homojen, ince ve sık dağılmış ikinci faz (Mg_2Si) miktarı, bu sıcaklıkta uniform bir katı eriyik oluşması, bu sıcaklıktan hızlı soğutma esnasında aşırı doymuş katı çözelti içerisinde oluşan çok sayıda kusurun (boşluk ve dislokasyon) ikinci fazın oluşabilmesi için daha çok sayıda çekirdek oluşumunu sağlamasıyla açıklanabilir. Bundan başka yüksek çözeltiye alma sıcaklıklarında katı eriyik içerisinde daha fazla Si atomu çözüneceğinden ve Si atomları da Mg atomlarına nazaran daha yavaş yayındığından Si atomunun çekirdek oluşumunda etkili olması, yüksek sıcaklıkta çok sayıda çözünen Si atomu sayısının ikinci faz oluşması için çekirdek sayısının artmasına sebep olabileceği de ikinci fazın (Mg_2Si) iç yapıda ince, sık ve homojen dağılmasına neden olabilir [9].

$540^\circ C$ ve $550^\circ C$ çözündürme sıcaklıklarında iç yapıdaki Mg_2Si fazının daha kaba taneli ve daha az sayıda olduğu kolayca görülmektedir (Şekil 3). Bu fazın miktarının azalmasının sebebi yüksek sıcaklıklardan hızlı soğutma esnasında oluşan aşırı doymuş katı eriyikte tane sınırlarında çökelebileceği düşünülen düzensiz mikron boyutlu saf Si çökeltilerinin yaşlandırmada yeterli miktarda dengeli Mg_2Si fazının çökmesine daha az imkan vermesine bağlanabilir [10].

Yorulma Deneylerinin Sonuçları

Beş farklı çözündürme sıcaklığında ($510-520-530-540$ ve $550^\circ C$) 45 dakika tavlanylup suda soğutularak çözeltiye alma işleminden sonra 5 gün ön yaşlandırmanın ardından $170^\circ C$ 'de 11 saat yapay yaşlandırılan yorulma numuneleri ile yapılan yorulma deneyi sonuçları Şekil 4 'te verilmiştir

Şekil 4'ün incelenmesinden çözündürme sıcaklıkları $510-530^\circ C$ arasında arttığında noktaların dağılımından da görüldüğü gibi yorulma dayanımlarının az miktarda arttığı gözlenebilir. $530^\circ C$ 'de çözeltiye alınan numuneler 10^6 nın üstündeki çevrim sayılarında maksimum yorulma dayanımı göstermişlerdir. Bu sonuç daha önce 6063 alaşımı ile aynı yaşlandırma koşullarında ($T_{\text{çöz}}= 510, 520, 530, 540$ ve $550^\circ C$; $t_{\text{bekleme}}=45$ dak; $T_{\text{yaş}}= 170^\circ C$; $t_{\text{yaş.süresi}}=11$ saat) yapılan çekme deneyi sonuçları ile de uygunluk göstermektedir [9]. $510-$

$530^\circ C$ çözündürme sıcaklıkları arasında akma ve çekme dayanımlarında belirgin artışlar görülmüştür. Bundan dolayı $510-530^\circ C$ arasında yorulma dayanımının çekme ve akma dayanımına paralel olarak artışı uygun ve beklenen bir sonuçtur.

$510-530^\circ C$ arasında yorulma dayanımındaki bu artışın çözündürme sıcaklığı arttıkça tam bir homojen katı eriyik elde edildiğine ve su verme sonucu oluşan aşırı doymuş katı eriyik içerisinde çekirdek ve daha sonra Mg_2Si oluşumu için daha çok yüksek enerjili kusur bölgelerinin (dislokasyon, boşluk...) oluşumuna ve oluşan ikinci fazların daha küçük ve sık olarak matriste dağılmasına bağlanabilir.

Çözündürme sıcaklıkları 540 ve $550^\circ C$ arasında değiştiğinde yorulma dayanımı değerlerinde belirgin düşüşler görülmektedir (Şekil 4). Bu sonuç ta yine daha önce aynı alaşım ile aynı yaşlandırma koşullarında yapılan çekme deneyleri sonucu elde edilen çekme ve akma dayanımlarında meydana gelen değişimlerle uyum içindedir [9].

Tablo 2. Çözündürme sıcaklığının akma ve çekme dayanımına etkisi [9]

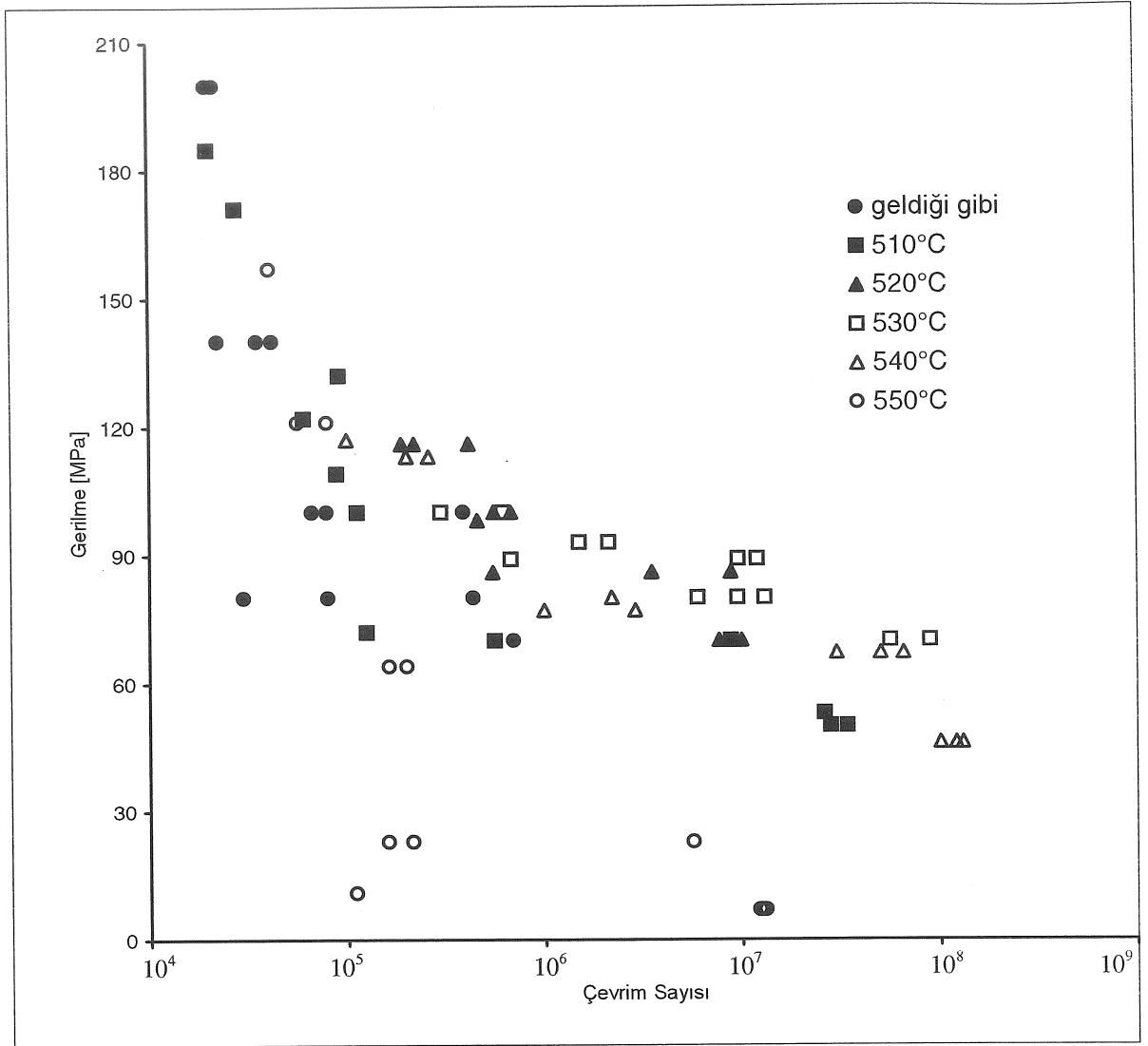
Çözündürme sıcaklığı [$T_c, ^\circ C$]	$\sigma_{(0,2)}$ [MPa]	σ_c [MPa]
510	214	267
520	240	275
530	268	281
540	249	264
550	243	257

Çözündürme sıcaklıkları ile yorulma, akma ve çekme dayanımlarının değişimi Şekil 5 'te verilmiştir.

540 ve $550^\circ C$ çözündürme sıcaklıklarında yorulma dayanımlarındaki azalma iç yapı ile ilişkilendirilerek, iç yapıda oluşan ikinci fazların daha az ve kaba olmasına ve bunların da uygulanan tekrarlı eğme gerilmelerine çok fazla direnç göstermemesine bağlanabilir. $530^\circ C$ üzerindeki çözündürme sıcaklıklarında yorulma dayanımında meydana gelen düşme miktarı çekme ve akma dayanımında meydana gelenlerden daha fazladır (Şekil 5).

Çözündürme sıcaklığına bağlı olarak 10^7 çevrim sayısı için yorulma dayanımı σ_y 'nin σ_c 'ye oranı (σ_y/σ_c) Şekil 6'da gösterilmiştir. Görüldüğü gibi $530^\circ C$ çözündürme sıcaklığında σ_y/σ_c oranı maksimum değere ulaşmaktadır ($\sigma_y/\sigma_c = 0,284$).

William ve Pei-Chung [11] alüminyum alaşımlarının yüksek çevrim sayısındaki yorulma ömürlerini sonlu eleman yöntemi kullanarak incelemişler ve bu çalışmalarında alüminyum alaşımlarında ($6061-T^6, 2014-T^6, 2024-$

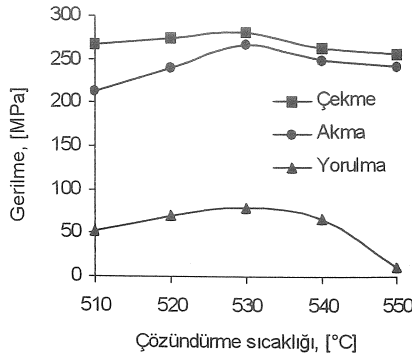


Şekil 4. Çözündürme sıcaklığına bağlı olarak yorulma değerlerinin değişimi

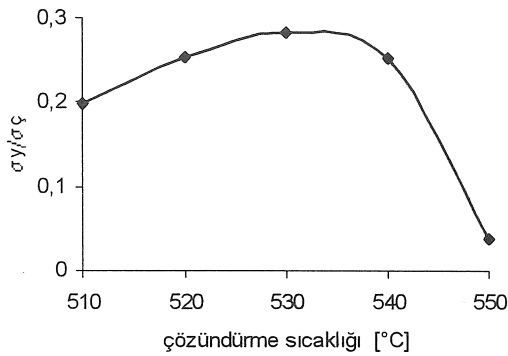
T^6 7075- T^6) 10^8 çevrim sayısındaki yorulma dayanımının çekme dayanımına oranını (σ_y/σ_c) 0,26 olarak bulmuşlar ve bunun da deneysel sonuçlarla uygunluğunu ispatlamışlardır. Bu çalışmada çözündürme sıcaklıkları 520, 530 ve 540°C olduğunda 10^7 çevrim sayısındaki yorulma dayanımı/çekme dayanımı oranları da sırasıyla (0,254-0,284 ve 0,253) olmakta ve bu değerler de $\sigma_y/\sigma_c=0,26$ oranına uygunluk göstermektedir.

Jiang , Hong, Lei [12] 6063 alaşımını 530°C 'de 30 dakika süreyle çözeltiye alarak 160°C 'de 1 saat ve 64 saat yapay yaşlandırarak yaptıkları çekme ve

yorulma deneylerinde yetersiz yaşlanmış numune (160°C 'de 1 saat bekletilen) için $5*10^6$ yük çevrim sayısında σ_y/σ_c oranını 0,81, tam yaşlanma durumunda ise (160°C 'de 64 saat bekletilen) 0,64 olarak bulmuşlardır. Hemen hemen aynı yaşlandırma koşullarında (530°C/45 dakika/5 gün ön yaşlandırma /170°C/11 saat) 10^7 çevrim sayısı için bu değer 0,284 olarak bulunmuştur. σ_y/σ_c oranları arasındaki bu belirgin farkın çevrim sayısının bu çalışmadakinin yarısı kadar olmasından ve yaşlandırma koşullarının farklılığından ileri geldiği söylenebilir.



Şekil 5. Çözündürme sıcaklığı ile akma, çekme ve 10^7 çevrim için yorulma dayanımlarının değişimi



Şekil 6. Çözündürme sıcaklığına bağlı olarak σ_y/σ_ϕ oranının değişimi

SONUÇLAR

Çözeltiyeye alma sıcaklığının iç yapı, akma, çekme ve yorulma dayanımlarına etkisinin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen bulgulardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. Çözeltiyeye alma sıcaklığı 510-550°C arasında değiştirildiğinde, ikinci faz (Mg_2Si) partiküllerinin matrikste en ince, en sık ve homojen olarak dağıldığı sıcaklık 530°C olarak tespit edilmiştir.
2. Çözündürme sıcaklığı 510-530°C arasında artarken çekme, akma ve yorulma dayanımları artmaktadır. Bu sıcaklık aralığında σ_y/σ_ϕ oranı doğrusal bir artış göstermektedir.
3. Çözündürme sıcaklığı 530-550°C arasında arttığında akma, çekme ve yorulma dayanımları azalmakta, yorulma dayanımındaki azalma daha fazla olmaktadır.

4. Yorulma ve akma dayanımının çözündürme sıcaklığına (T_C) ve iç yapıya duyarlılığının çekme dayanımına oranla daha fazla olduğu gözlenmektedir.
5. 10^7 çevrim sayısında en yüksek yorulma dayanımı 530°C 'de çözeltiyeye almadan sonra yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir.
6. 10^7 çevrim sayısındaki yorulma dayanımının çekme dayanımına oranının (σ_y/σ_ϕ) en yüksek olduğu değer 530°C 'de 45 dakika çözeltiyeye alınan ve 170°C 'de 11 saat yapay yaşlandırılan numunelerde 0,284 olarak belirlenmiştir.

THE EFFECT OF SOLUTION TEMPERATURE ON MICROSTRUCTURE AND FATIGUE PROPERTIES IN AGEING OF 6063 AL ALLOY

In this study, the effect of solution temperature to microstructure, yield, tensile and fatigue strength of 10^7 cycles in 6063 aluminium alloy that is artificially aged from five different solutionizing temperatures (510, 520, 530, 540 and 550°C) is investigated experimentally. From the test results, it is obtained that the solutionizing temperature increasing to 530°C, strength values and ratio of fatigue strength/tensile strength (σ_f/σ_t) are increased and in the specimens artificially aged at temperatures above this, the values are decreased. In the microstructure of artificially aged specimens after solutionized at the temperature of 530°C, it is observed that the precipitated Mg_2Si phase is finer and has more homogeneous distribution.

Keywords: 6063 Al Alloy, Ageing, Fatigue, Microstructure.

KAYNAKÇA

1. Mechanical Spectroscopy of Al-Mg-Si Industrial Alloys, www.igahpse.epfl.ch/mmc/almgsi.html.
2. Onurlu S., Homojenizasyonun AA 6063 Alüminyum Alaşımının İç Yapısı ve Özelliklere Etkisi, *Ph.D.Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1993.
3. Edgar A., Starke JR., Heat Treatable Aluminium Alloys, *Treatise on Materials Science and Technology*, vol:3
4. Şimşek A.T., Al-Mg-Si Alaşımını Oda Sıcaklığında Ön Yaşlandırmanın Yapay Yaşlandırmadan Sonraki Mekanik Özelliklere Etkisi, 2. *Alüminyum Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 1987.

5. Tayanç M., Soğuk Deformasyonun Çelik Halat Tellerinin Yorulma ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi Bildiriler Kitabı, cilt 1, sayfa 823-828, Mayıs 1997, İstanbul.
6. Metallerin Yorulma Deneyi Genel Prensipleri, Türk Standartları Enstitüsü, TS 1487, Şubat 1974.
7. Instruction Manual, Rotating Fatigue Machine, HSM.19mk.2., Issue 1. August, 1993.
8. Zhang J., Wang Y. ve Yang B. Effects of Si Content on the Microstructure and tensile strength of an in situ Al/Mg₂Si Composite *J. Mater. Res.*, Vol 14, No 1, Jan 1999.
9. Tayanç M., Zeytin G., Yaşlandırma Koşullarının 6063 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 1. Isıl İşlem Sempozyumu Bildiriler Kitabı, sayfa 59-69, Ekim 1998, İstanbul.
10. Moons T., A Comparative Study of Two Al-Mg-Si Alloys for Automative Applications, *Scripta Materialia*, 35,8,939, 1996.
11. William J. Baxter ve Pei-Chung Wang, Finite Element Prediction of High Cycle Fatigue Life of Aluminium Alloys, *Metallurgical Transactions A*, Vol. 21A, pp. 1151-1159, May 1990
12. Jiang D. M., Hong B. D.; Lei T. C., Fatigue Fracture Behaviour of Underaged Al-Mg-Si Alloy, *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 24, pp. 651-654, 1990, U.S.A.